

Conservación y manejo de los recursos genéticos forestales:

En plantaciones y bancos de germoplasma (*ex situ*)

3

Recursos genéticos forestales



Conservación y manejo de los recursos genéticos forestales:

En plantaciones y bancos de germoplasma (*ex situ*)

3

Recursos genéticos forestales



Este volumen pertenece a la serie de tres guías sobre la conservación y manejo de los recursos genéticos forestales, que incluyen:

Volumen 1. Conservación y manejo de los recursos genéticos forestales: visión general, conceptos y algunos métodos sistemáticos

Volumen 2. Conservación y ordenación de recursos genéticos forestales: en bosques naturales ordenados y áreas protegidas (*in situ*)

Volumen 3. Conservación y manejo de los recursos genéticos forestales: en plantaciones y bancos de germoplasma (*ex situ*)

Este documento ha sido elaborado como un esfuerzo conjunto entre la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el Centro de Semillas Forestales de Danida (CSFD) y Bioversity International, y se basa en las contribuciones de un gran número de instituciones asociadas, nacionales, regionales e internacionales, de todo el mundo.

El 1 de enero de 2004, el Centro de Semillas Forestales de Danida (CSFD) pasó a formar parte del Centro Danés para el Bosque, Paisaje y Planificación, KVL. El nuevo centro, conocido como *Bosque y Paisaje de Dinamarca* (FLD) en la Universidad Real de Veterinaria y Agricultura (KVL), es un centro independiente para investigación, enseñanza, asesoramiento e información referentes al bosque, el paisaje y la planificación. El objetivo de desarrollo de las actividades internacionales del FLD es contribuir a mejorar el bienestar de las generaciones actuales y futuras, con especial hincapié en las poblaciones pobres mediante una mejor planificación, el manejo sostenible y el uso de árboles, bosques, paisajes y otros recursos naturales. Las actividades internacionales se financian en parte por la Asistencia Danesa para el Desarrollo Internacional. Contacto: Forest & Landscape, Hørsholm, Kongevej 11, DK-2970, Hørsholm, Dinamarca.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación es el organismo especializado de las NU en agricultura, silvicultura, pesca y desarrollo rural. La FAO proporciona información y apoyo técnico a los países miembros, incluyendo todos los aspectos de la conservación, uso sostenible y manejo de los recursos genéticos forestales. Contacto: FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Roma, Italia.

Bioversity International es un organismo internacional autónomo, de carácter científico, que busca contribuir al bienestar actual y futuro de la humanidad mejorando la conservación y el aprovechamiento de la agrobiodiversidad en fincas y bosques. Es uno de los 15 Centros auspiciados por el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAI), una asociación de miembros del sector público y privado, que apoyan la ciencia para reducir el hambre y la pobreza, mejorar la nutrición y la salud de la población, y proteger el ambiente. Bioversity tiene su sede principal en Maccaresse, cerca a Roma, Italia, y oficinas en más de 20 países. Bioversity opera mediante cuatro programas: Diversidad al Servicio de las Comunidades, Comprensión y Manejo de la Biodiversidad, Asociaciones Colaborativas de Carácter Mundial, y Cultivos de Subsistencia para una Vida Mejor.

Muchos miembros del personal directivo de la FAO, FLD e Bioversity International han participado en la preparación de la versión en inglés de esta guía. Se debe especial agradecimiento al Dr. Alvin Yanchuk, del Servicio Forestal de la Columbia Británica (BCFS), Canadá, quien, con el apoyo de la FAO, emprendió la difícil tarea de revisar y armonizar las numerosas y diferentes contribuciones técnicas a esta publicación, y a su participación como coautor de algunos capítulos. Los autores desean agradecer a la Dra. Barbara Vinceti, de Bioversity International, su dedicación y esfuerzo cuidando al máximo los múltiples detalles que fueron necesarios para completar la publicación de este volumen. También hay que agradecer a Lesley McKnight, Ayudante de Investigación, BCFS, por su colaboración en la redacción del texto y las referencias. Se reconoce también con agradecimiento la orientación general, las contribuciones y el estímulo permanente del Cuadro de Expertos de la FAO en Recursos Genéticos Forestales.

Aunque el personal de las tres principales instituciones asociadas ha participado en cada uno de los capítulos de los tres volúmenes, asumiendo la plena responsabilidad institucional por su contenido, en cada uno de los capítulos se indican los autores principales. Estos autores son responsables del contenido final, pudiendo acudir a ellos aquellos lectores que busquen información adicional o aclaración de los puntos analizados.

La versión en español de esta publicación fue posible gracias al apoyo financiero del Centro de Investigación Forestal del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (CIFOR-INIA) de España y corresponde a la traducción de la versión original en inglés producida en el 2004. La traducción del texto estuvo a cargo de Fernando Barrientos y Alberto Barrientos y la revisión posterior del texto a cargo de Ricardo Alía, Margarita Baena, Jesús Salcedo, Xavier Scheldeman y Barbara Vinceti.

Cita

FAO, FLD, Bioversity International. 2007. Conservación y manejo de recursos genéticos forestales. Vol. 3: en plantaciones y bancos de germoplasma (*ex situ*). Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, Roma, Italia.

Foto de la cubierta: *Dipterocarpus alatus* de Tailandia. Las *Dipterocarpaceae*, que constituyen el componente principal de los bosques tropicales húmedos del sureste de Asia, son ejemplo de una familia cuyas semillas recalcitrantes constituyen un gran inconveniente para su cultivo y dificultan también el almacenamiento *ex situ* de la semilla. (Ida Theilade/FLD)

ISBN 978-92-9043-718-5

ISBN 92-9043-718-9

© Bioversity International, 2007

ÍNDICE

Prólogo	v
Capítulo 1. MÉTODOS INTEGRADOS PARA LA CONSERVACION EX SITU Y EL USO DE LA DIVERSIDAD GENÉTICA FORESTAL	1
<i>por Weber Amaral y Alvin Yanchuk</i>	
Capítulo 2. METODOLOGIAS PARA LA CONSERVACIÓN EX SITU	3
<i>por Weber Amaral, Alvin Yanchuk y Erik Kjær</i>	
2.1 Introducción	3
2.2 ¿Qué temas es necesario considerar?	3
2.2.1 Objetivos de la conservación	4
2.2.2 ¿Se está plantando actualmente la especie, o no?	4
2.2.3 La conservación evolutiva frente a la conservación estática	5
2.2.4 Estado de conservación	7
2.2.5 Capacidad institucional	7
Capítulo 3. ESTRATEGIAS DE MUESTREO PARA LA CONSERVACIÓN EX SITU	9
<i>por Alvin Yanchuk y Søren Hald</i>	
3.1 Introducción	9
3.2 El concepto de población para la conservación <i>ex situ</i>	9
3.3 Tamaños de las muestras para colecciones <i>ex situ</i>	10
3.4 Muestreo entre diferentes poblaciones	15
3.5 Planificación y documentación de fuentes de semilla y mapas	16
Capítulo 4. CONSERVACIÓN EX SITU MEDIANTE SELECCIÓN Y MEJORAMIENTO GENÉTICO	19
<i>por Alvin Yanchuk</i>	
4.1 Introducción	19
4.2 Selección de especies objetivo	19
4.3 Procesos genéticos	20
4.4 Estudios genéticos, selección en poblaciones naturales o naturalizadas, ensayos y mejoramiento genético	21
4.4.1 Selección de una población base	22
4.4.2 Ensayo de progenies y diseños de ensayos de campo	24
4.4.3 Selección en edades anteriores a la edad normal de aprovechamiento	25
4.5 Interacciones genotipo x ambiente	25
4.6 Mejoramiento genético y ensayo de una generación avanzada	26
4.6.1 Diseños de apareamiento	26
4.6.2 Ensayos y selección de la siguiente generación de árboles	28
4.6.3 Estructura de la población de mejoramiento genético	28
4.7 Caracteres de interés y costos de evaluación	30
4.8 La biotecnología y su papel en la mejoramiento genético	31
4.9 Conclusiones	32
Capítulo 5. ESTABLECIMIENTO Y MANEJO DE RODALES DE CONSERVACIÓN EX SITU	33
<i>por Ida Theilade, Alvin Yanchuk y Søren Hald</i>	
5.1 Introducción	33
5.2 Finalidad de los rodales de conservación <i>ex situ</i>	33
5.3 Materiales y métodos para el establecimiento de rodales de conservación <i>ex situ</i>	34
5.3.1 Planificación de rodales de conservación <i>ex situ</i>	34
5.4 Establecimiento de rodales <i>ex situ</i>	38

5.4.1	Técnicas de vivero	38
5.4.2	Preparación del sitio	39
5.4.3	Trazado	39
5.4.4	Demarcación	40
5.4.5	Identidad de la descendencia de un solo árbol	40
5.4.6	Manejo inicial	40
5.4.7	Manejo del fuego	41
5.4.8	Protección	41
5.4.9	Manejo	41
5.5	Experiencias con rodales para conservación <i>ex situ</i>	42
5.5.1	Fronosas en Indonesia	42
5.5.2	Pinos tropicales de Centro América	44
5.5.3	La regeneración – cuello de botella de los rodales de conservación <i>ex situ</i>	45
5.6	Sugerencias para desarrollar poblaciones para conservación <i>ex situ</i>	45
5.6.1	Consideraciones generales sobre el establecimiento de rodales para conservación <i>ex situ</i>	45
5.6.2	¿Rodalet de conservación puros o mezclados?	46
5.6.3	Cooperación internacional y preocupaciones de los donantes sobre la conservación <i>ex situ</i>	46
5.7	Discusión y conclusiones sobre el papel de los rodales de conservación <i>ex situ</i>	48
Capítulo 6. CONSERVACIÓN EX SITU MEDIANTE ALMACENAMIENTO Y UTILIZACIÓN		51
<i>por Ida Theilade, Leonardo Petri y Jan Engels</i>		
6.1	Introducción	51
6.2	Aplicación práctica del conocimiento de la biología de las semillas forestales	52
6.2.1	Categorías para el almacenamiento de la semilla	52
6.2.2	Almacenamiento de semillas ortodoxas	55
6.2.3	Almacenamiento de semilla no ortodoxa	57
6.3	Otras técnicas para el almacenamiento de especies no ortodoxas	57
6.3.1	Crioconservación	58
6.3.2	Conservación de brinzales	59
6.3.3	Conservación in vitro	60
6.3.4	Almacenamiento de polen	60
6.3.5	Almacenamiento de ADN	61
6.4	Algunas consideraciones sobre el almacenamiento de árboles mediante conservación <i>ex situ</i>	61
6.4.1	Consecuencias genéticas de la conservación <i>ex situ</i>	61
6.4.2	Limitaciones de la ciencia y la tecnología	62
6.4.3	¿Cuál es el papel específico del almacenamiento de árboles <i>ex situ</i> ?	63
Capítulo 7. CONCLUSIONES		67
<i>por Alvin Yanchuk</i>		
Referencias		69
Siglas y Abreviaturas		77
Índice		79
Glosario de Términos Técnicos		85



PRÓLOGO

Los bosques son los depositarios más importantes de la biodiversidad terrestre. Proporcionan una amplia variedad de productos y servicios a la población de todo el mundo. Los árboles y otras plantas leñosas del bosque ayudan a sostener a otros muchos organismos y han desarrollado mecanismos complejos para mantener unos altos niveles de diversidad genética. Esta variación genética, tanto inter como intraespecífica, sirve para una serie de finalidades de fundamental importancia, permitiendo a árboles y arbustos reaccionar frente a los cambios del medio ambiente, incluidos los ocasionados por plagas, enfermedades y el cambio climático. También proporciona los elementos básicos para la evolución futura, la selección y el uso humano en el mejoramiento genético para una amplia variedad de estaciones y usos. Y, en distintos niveles, sostiene valores estéticos, éticos y espirituales de los seres humanos.

El manejo forestal para fines productivos y protectores puede y debe ser compatible con la conservación, mediante una programación bien fundamentada y la coordinación de actividades a nivel nacional, local y eco-regional. La conservación de la biodiversidad forestal, que comprende los recursos genéticos forestales, es fundamental para el sostenimiento del valor productivo de los bosques y para mantener el estado sanitario y la vitalidad de los ecosistemas forestales y, con ello, mantener sus funciones protectoras, ambientales y culturales.

Una importante amenaza para los ecosistemas forestales es la conversión de los bosques para otros usos del suelo. La creciente presión de las poblaciones humanas, que aspiran a unos mejores niveles de vida, sin la debida consideración sobre la sostenibilidad del uso de un recurso que sirve de base para tales desarrollos, es motivo de preocupación a este respecto. Aunque es inevitable que se produzcan en el futuro cambios en el uso del suelo, tales cambios se deben programar para ayudar a conseguir la complementariedad de las metas de conservación y desarrollo. Esto puede lograrse incluyendo los temas de conservación como componente importante en la programación del uso del suelo y en las estrategias de manejo de los recursos.

El principal problema actual para lograr las metas de conservación es la falta de estructuras institucionales y políticas adecuadas que hagan posible considerar las opciones sobre el uso del suelo y de manejo práctico, que sean aceptables para todos los interesados, y puedan ser aplicadas eficazmente, vigilándolas y corrigiéndolas con regularidad para atender las nuevas necesidades y las que puedan surgir en adelante. Las decisiones sobre la conservación de los recursos genéticos forestales no deben adoptarse de forma aislada sino como componente integrante de los planes nacionales de desarrollo y de los programas nacionales de conservación.

La clave para el éxito depende por tanto del desarrollo de programas que armonicen la conservación y la utilización sostenible de la diversidad biológica y los recursos genéticos forestales, dentro de un mosaico de opciones de uso del suelo. La posibilidad de mantener la acción a lo largo del tiempo se basará en unos auténticos esfuerzos para atender las necesidades y aspiraciones de todas las partes interesadas. Ello exigirá una colaboración estrecha y continuada, el diálogo y la participación de los interesados en la programación y ejecución de los programas correspondientes.

No hay, en principio, obstáculos técnicos fundamentales que no puedan resolverse para cumplir los objetivos de la conservación. En los últimos años, se han iniciado una serie de actividades para fortalecer la conservación y la utilización sostenible de los recursos genéticos. Sin embargo, la experiencia práctica de estas actividades se ha documentado insuficientemente y las “lecciones aprendidas” han recibido escasa atención y raramente se han aplicado a escala mayor. De la experiencia, resulta evidente que unas medidas prudentes y oportunas y unos programas basados en los mejores conocimientos disponibles, pueden hacer una contribución fundamental para la conservación de los recursos genéticos forestales. Se considera, por tanto, de la máxima importancia que esta experiencia, junto con los conocimientos actuales sobre la teoría de la conservación, se pongan a disposición de todos mediante unas directrices y procedimientos generalizados que sirvan como inspiración a los demás dedicados a tales actividades de conservación.

Esta guía es el tercer volumen de una serie de tres que tratan de la conservación de los recursos genéticos forestales (árboles y arbustos). Este volumen se ocupa de los requisitos técnicos y de algunos métodos aplicados y experiencias con la conservación *ex situ* y el manejo de los recursos genéticos forestales. Describe el papel de la conservación *ex situ* y analiza algunas de las estrategias que pueden emplearse: el desarrollo ordenado de poblaciones *ex situ*, así como los métodos de almacenamiento, en el campo y en bancos semilleros, para los recursos genéticos *ex situ*. Con los volúmenes 1 y 2 y con otras publicaciones que están tratando también de temas de conservación genética forestal a niveles regionales (como OIMT 2000), esperamos haber podido proporcionar a los usuarios de estos manuales una visión de conjunto de los métodos de conservación que pueden emplearse para el manejo de los recursos genéticos forestales en todo el mundo.



M. Hosny El-Lakany
Director-General Adjunto
Departamento de Montes
FAO



Niels Ehlers Koch
Director
Bosque y Paisaje
Dinamarca



Emile Frison
Director General
Bioversity International

MÉTODOS INTEGRADOS PARA LA CONSERVACION *EX SITU* Y EL USO DE LA DIVERSIDAD GENÉTICA FORESTAL

por Weber Amaral y Alvin Yanchuk



La conservación *ex situ* de los recursos genéticos de árboles forestales trata principalmente del muestreo y el mantenimiento de la mayor cantidad posible de variación genética que existe dentro de y entre las poblaciones de las especies seleccionadas como objetivos. La conservación *ex situ* requiere niveles importantes de intervención humana, ya sea en forma de recolecciones simples de semillas, amacenamiento y plantaciones de campo o de métodos más intensivos de mejoramiento genético y fitomejoramiento. A diferencia de los viveristas de cultivos agrícolas, los viveristas forestales no pueden producir rápidamente nuevas variedades, ni pueden producir con prontitud nuevas variaciones entre poblaciones. Por ello, la diversidad genética existente entre poblaciones es importante y fundamental para la conservación de los recursos genéticos forestales, especialmente porque puede referirse al mantenimiento a largo plazo de la diversidad genética en poblaciones viables. Esto sugiere también que hay que dar una atención especial a la conservación de la variación genética intraespecífica en poblaciones periféricas o aisladas, porque podrían poseer niveles superiores de características tales como resistencia a la sequía, tolerancia a diversas condiciones del suelo (Sterne y Roche 1974), o rasgos que ayudarán a protegerlas del futuro cambio climático (Muller-Starck y Schubert 2001).

Como se analizó en los volúmenes 1 y 2, un programa completo de conservación genética requerirá en el fondo una cierta combinación de conservación *in situ* y *ex situ*. No obstante, hay muchas situaciones en que la conservación *ex situ* se convierte en el punto central de un programa de conservación genética, y este volumen trata de sus objetivos, temas y métodos. Éste es un componente crítico de muchos de los planes y redes de conservación en la mayoría de especies cultivadas, pero puede tener también un papel importante con los árboles forestales. Características importantes de un programa de conservación *ex situ*, para cualquier especie son las siguientes:

- se trata de una importante medida de apoyo, si otros medios de conservación *in situ* son impracticables o no están disponibles;
- asegurar la conservación de una amplia variedad de la diversidad (fenotípica y genotípica) disponible en una especie
- manejar la regeneración de la especie fuera de su ámbito natural de origen (**procedencia**) de forma más controlada (lo que permitirá un mayor desarrollo de la población o poblaciones para uso o conservación).

Al igual que con todos los esfuerzos de conservación, los recursos disponibles juegan un papel fundamental en la determinación de qué estrategia concreta puede desarrollarse para cualquier programa específico de conservación *ex situ*. Con la falta de tecnología y recursos suficientes para evaluar el conjunto de variación genética disponible dentro de las poblaciones o entre ellas, con gran frecuencia las colecciones *ex situ* están basadas en colecciones que representan poblaciones de diferentes zonas o áreas ecológicas, e individuos dentro de estas poblaciones que pueden presentar variaciones fenotípicas normales o especiales en los caracteres morfológicos. Aunque es conveniente muestrear poblaciones teniendo conocimiento genético de una especie determinada, muchos de los principios del muestreo genético son tan sólidos que aún es posible realizar una tarea

razonable de captación de diversidad genética, sin tal conocimiento. Además, los diversos tipos de tejidos o semillas que se pueden recoger y seguidamente almacenar, archivar o replantar, desempeñan un importante papel en la capacidad para mantener y conservar la diversidad genética *ex situ*.

En el Capítulo 2, se exploran aún más los aspectos de la conservación *ex situ* estática, frente a la dinámica (véase el volumen 1, capítulo. 2.4), y en el capítulo 3 se analizan aspectos importantes del muestreo de poblaciones. El desarrollo de poblaciones mediante diversos medios que tradicionalmente se consideraban como mejoramiento de árboles, se trata en el capítulo 4, que amplía nuestro análisis previo sobre los aspectos de la conservación “dinámica”. En el capítulo 5 se presentan algunos principios y experiencias importantes que tienen el objetivo específico de conservar recursos genéticos en plantaciones *ex situ* y el capítulo 6 examina muchos de los métodos para la conservación *ex situ* en diversas instalaciones de almacenamiento, tratamientos y utilización.

METODOLOGÍAS PARA LA CONSERVACIÓN *EX SITU*



por Weber Amaral, Alvin Yanchuk y Erik Kjær

2.1 Introducción

Las decisiones sobre qué estrategias y métodos de conservación *ex situ* se deben aplicar para una especie determinada, dependerán no sólo de sus características biológicas, modelos de variación genética y estado actual de conservación, sino también de cuánto se conoce sobre su silvicultura básica y manejo. La conservación *ex situ* debe considerar también qué parte de la planta se muestreará y conservará: árboles enteros, semilla, tejidos o material genético en cultivo; y por cuánto tiempo. Quizás aún más importante es la capacidad institucional de las organizaciones implicadas y la disponibilidad de financiación a mediano y largo plazo para realizar una conservación *ex situ* con éxito.

2.2 ¿Qué temas es necesario considerar?

En el Recuadro 2.1 se aclaran y determinan diversos niveles de jerarquía genética que pueden considerarse, y algunas opciones disponibles para cada uno de ellos. Hay que hacer hincapié, sin embargo, en que es difícil desarrollar una serie general de directrices que puedan aplicarse a todas las situaciones. A fin de desarrollar una estrategia eficaz de conservación *ex situ*, hay que tratar una serie de cuestiones clave referentes al objetivo de la conservación, el origen del material a conservar, el uso actual y el estado de conservación.

Recuadro 2.1 Niveles de jerarquía genética y su relación con la conservación *ex situ*

- **Genes:** Importantes genes funcionales, para resistencia a enfermedades, por ejemplo podrían cartografiarse utilizando marcadores moleculares (Harkins *et al.* 1998). Con las nuevas tecnologías moleculares, el gen podría ser secuenciado para examinar la posible base molecular de la resistencia, e incluso clonarlos e introducirlos en la misma o en otra especie. Sin embargo, la conservación de tales genes significa normalmente conservar los genotipos reales en que se encuentran.
- **Genotipos:** Son individuos que parecen ser representativos de la población, o de algún carácter de interés (ya sea fenotípicamente o de réplicas clonales). A fin de mantener el genotipo, el material se debe captar mediante reproducción vegetativa. La recolección de semilla procedente de un individuo, no preserva generalmente el genotipo de dicho individuo.
- **Poblaciones (procedencias):** Aunque estamos normalmente interesados en conservar la variación genética que es representativa de las poblaciones, se nos

continúa

solicita en definitiva muestrear un número suficiente de individuos que representen las frecuencias de genes en tal población. Surge entonces la cuestión de cómo asignar recursos de muestreo como número de árboles, tipo de tejido, p. ej. semilla, costo del muestreo, dentro de y entre poblaciones.

- **Ecosistemas:** No podemos medir la variación genética de un ecosistema, porque la variación genética intraespecífica es propiedad de una especie y las poblaciones representativas pueden trascender varios tipos diferentes de ecosistemas (seco o húmedo, cálido o frío, asociación y competencia con diferentes especies, etc.). La única forma en que podemos decir que estamos “muestreando ecosistemas” para variación genética, es muestrear poblaciones, en un intento por captar la variación genética que se ha desarrollado entre poblaciones como resultado de acontecimientos históricos de colonización, diferentes presiones de selección, o flujo de genes.

2.2.1 Objetivos de la conservación

Cuando se definen los objetivos de las colecciones *ex situ* o un programa de conservación, el primer paso es establecer algunos objetivos aproximados para el muestreo o captación de diversidad genética. En otras palabras, ¿pretendemos conservar una muestra local representativa de una especie, una muestra representativa de la variación geográfica o de procedencia, variación genética representativa de una procedencia o un rodal, o simplemente un solo genotipo? (En el capítulo 3 se analizan con más detalle temas genéticos relacionados con el tamaño de la muestra). El segundo paso es determinar cuál puede ser el uso futuro del material. ¿Es para incluirlo en actividades de mejoramiento genético de árboles, directamente en programas de plantación o para la restauración de la especie en el hábitat natural? Para que sea eficaz, la conservación *ex situ* requerirá un aporte continuo en cuanto a fondos y personal. La experiencia ha demostrado generalmente que tal compromiso a largo plazo sólo existirá si los objetivos han sido claramente definidos y si hay algún interés en utilizar en el futuro las especies o procedencias en cuestión. Si no existe tal interés, los esfuerzos pueden verse como una conservación por su propio interés, con poco valor a largo plazo y los programas que dependen totalmente de la financiación externa es probable que se abandonen (Theilade *et al.* 2001).

2.2.2 ¿Se está plantando actualmente la especie, o no?

El próximo factor a considerar es si el material se está usando actualmente para plantación o reforestación. Las especies climáticas tropicales más valiosas no se eligen actualmente para programas de plantación. Este grupo de especies es particularmente difícil de conservar *ex situ*, porque se puede conocer poco sobre plantación y manejo silvícola. En la mayoría de los casos, es probable que exista poca información disponible sobre su biología, regeneración, comportamiento de la semilla (por ejemplo, longevidad en el árbol, técnicas de recolección y almacenamiento), polinización, polinizadores, etc. Obviamente, para especies de las que se dispone de poca información sobre manejo, la conservación *in situ* puede ser la única opción realista. No obstante, si esto no es posible, debido a las amenazas al hábitat natural o al limitado control sobre el manejo de las poblaciones *in situ*, entonces la conservación *ex situ*, particularmente en **rodales de conservación genética** que imitan las condiciones naturales, pueden ofrecer la mejor forma de conservación *ex situ* (véase también el capítulo. 5 de este volumen y el Capítulo 2.4 del volumen 1). Diferentes herramientas para imitar las condiciones naturales incluyen la plantación de cultivos de protección, la plantación de rodales de múltiples

especies y los pasos para apoyar a la futura regeneración natural. Como es poco probable que exista abundante información para muchas de estas especies, tales rodales serán con frecuencia de carácter muy experimental. Esto representa un desafío para la conservación de especies forestales, pero si los rodales son diseñados adecuadamente, pueden dar valiosa información sobre el comportamiento de la especie o procedencia y, más generalmente, sobre cómo ordenar, utilizar o quizás restaurar la especie en el futuro.

2.2.3 La conservación evolutiva frente a la conservación estática

La cuestión de proteger o no los procesos genéticos, es importante cuando se desarrolla una estrategia apropiada para la conservación *ex situ*. Como se describió anteriormente en el volumen 1 (véase Capítulo 2.4), los procesos genéticos incluyen todos los procesos que originan cambios en las frecuencias de genes, por ejemplo la selección natural (adaptación al ambiente reinante) y la selección, intencionada o no intencionada, en respuesta a los sistemas de manejo. El oficial de conservación tendrá que decidir si la estrategia de conservación tratará de mantener las frecuencias de genes de la población original y evitar así cualquier efecto de los procesos genéticos (**conservación estática**) o si la atención debe centrarse en apoyar la adaptación actual y permitir que las frecuencias de genes cambien de acuerdo con las fuerzas selectivas locales y apropiadas (**conservación evolutiva**) (Guldager 1975).

Conservación evolutiva

La conservación de la especie dentro de su hábitat natural (conservación *in situ*) es el ejemplo más normal de la conservación evolutiva o “dinámica”, pero en definitiva trata de preservar el potencial de adaptación de la especie a largo plazo. La conservación evolutiva puede, sin embargo, tener lugar también *ex situ* en rodales plantados, donde se permite actuar a las fuerzas selectivas y donde los árboles plantados pueden regenerarse mediante semillas, en lugar de hacerlo mediante propagación vegetativa en ciclos generacionales. Los métodos de conservación evolutiva pueden variar, pero normalmente se ubicarían en dos categorías generales:

- (a.) situaciones en que la especie, procedencia o familias pueden experimentar y experimentarán alguna selección en el ambiente actual y en el futuro en sus lugares de ensayo (en lugar de centrarse en la conservación de genotipos específicos)
- (b.) situaciones en que el programador de la conservación desea deliberadamente conservar características de importancia para el uso de la especie como troncos rectos y alto potencial de crecimiento.

El método (a) puede denominarse **conservación evolutiva estricta**, con el fin de facilitar y apoyar la selección natural en favor de su adaptabilidad. El método mencionado anteriormente, en el que la conservación *ex situ* se realiza en rodales que imitan la condición natural de la especie, es un ejemplo de conservación evolutiva estricta. El método (b) puede denominarse **conservación evolutiva con utilización**, y puede obtenerse en rodales de conservación que se desarrollan en condiciones similares a las plantaciones ordenadas. En general, la conservación *ex situ* más eficaz se obtiene combinando la actividad de conservación con la utilización activa de la especie (véase el Capítulo 4).

Los programas de plantación existentes podrían servir como valiosos medios para la conservación *ex situ*, mientras exista un control estricto y un conocimiento detallado de los orígenes de la plantación (por ejemplo, fuentes de semilla, tamaños efectivos de población, etc.). Los programas de mejoramiento de árboles pueden servir también como programas eficaces de conservación, particularmente aquellos con grandes componentes de ensayos de procedencias y familias (véase el Capítulo 4). Finalmente, en casos en que se considera

valiosa una especie pero no se utiliza mucho en la actualidad, la domesticación y el aumento del uso de la especie, pueden mejorar su estado de conservación (véase por ejemplo volumen 1, Recuadro 2.7 sobre *Prunus africana*). Cuando las especies o procedencias se conservan a través de un uso controlado, esto debe hacerse mediante múltiples estaciones que representen una gama de condiciones diferentes, con el fin de conseguir que la interacción genotipo x ambiente no ocasione disminuciones del potencial genético para el uso futuro en diferentes ambientes (Guldager 1975). En el Capítulo 4 se analizan con más detalle diferentes métodos en los programas tradicionales de mejoramiento de árboles que consideran una conservación evolutiva fuertemente dirigida.

Conservación estática

La conservación estática (tratada anteriormente en el volumen 1, Capítulo 2.4) se caracteriza por el hecho de que un grupo de genotipos son normalmente los objetivos de la conservación. Este método es muy apropiado cuando el objetivo es conservar genotipos identificados y comprobados de valor demostrado, o cuando no es posible establecer plantaciones *ex situ* con opciones de conservación evolutiva.

Para el mantenimiento de los genotipos, se pueden mantener y proteger en bancos clonales o archivos clonales, clones propagados vegetativamente. Para algunas especies, la conservación estática puede aplicarse también mediante la conservación de lotes de semilla en bancos semilleros o mediante crioconservación. Estos métodos se describen con más detalle en el Capítulo 6. Finalmente, puede obtenerse también cierto grado de conservación estática en rodales de conservación basados en brinzales cuando el manejo pretende eliminar efectos de “selección natural” local, por ejemplo, aplicando el aclareo sistemático. Sin embargo, hay que destacar que siempre tendrá lugar un cierto grado de adaptación a las condiciones locales, sobre todo en conexión con el recambio de generación y porque sólo sobrevivirán los individuos razonablemente bien adaptados al ambiente reinante. Un método general para adoptar decisiones cuando se elaboran criterios específicos sobre la conservación *ex situ*, se presenta en la Figura 2.1.

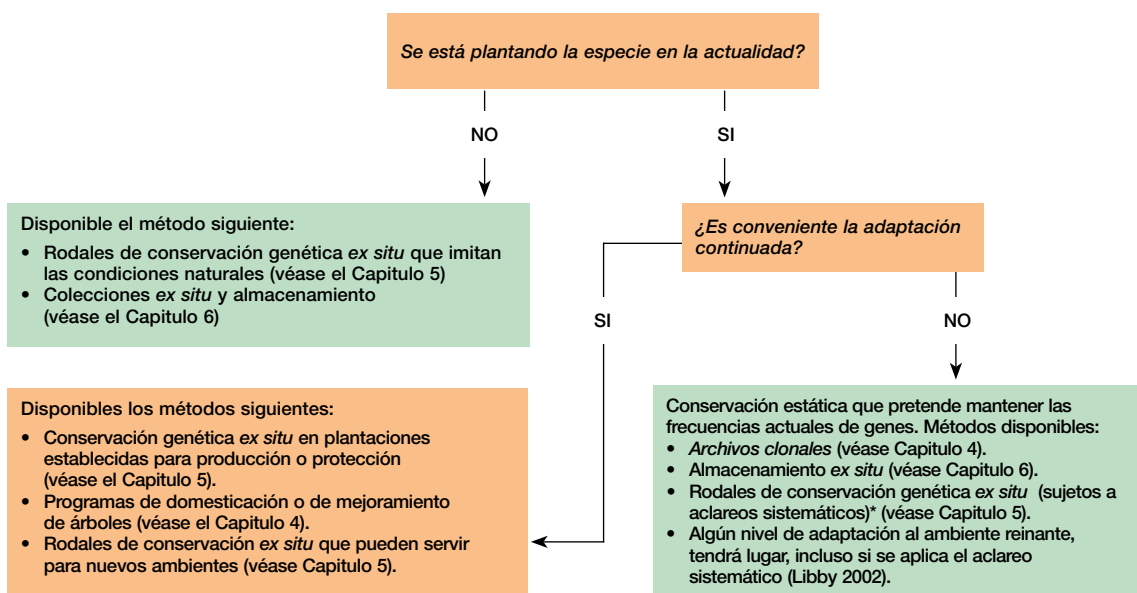


Figura 2.1 Criterios de toma de decisiones para la conservación *ex situ*

2.2.4 Estado de conservación

Es necesario considerar el estado actual de la especie o procedencia de interés, ya que afectará a las posibilidades y métodos utilizados para el muestreo (véase el Capítulo 3). Si la especie o procedencia está en peligro inmediato de extinción y sólo quedan unos pocos individuos reproductivamente aptos, la acción inmediata es el criterio más importante, casi con independencia de la metodología de conservación. En este caso, es probable que todo el material remanente deba muestrearse, pero los métodos a aplicar para las especies que estén en grave peligro dependerán del estado y la biología de la especie; el sistema de conservación seleccionado debe establecerse con rapidez a fin de evitar nuevas pérdidas de diversidad genética.

En muchos casos, una combinación de almacenamiento *ex situ* y establecimiento en rodales, ofrecerá la conservación más segura de las especies o procedencias fuertemente amenazadas. En muchas situaciones, es probable que la floración y la producción de semilla sean limitadas en especies o procedencias fuertemente amenazadas. En estos casos, el establecimiento de rodales de conservación basados en material propagado vegetativamente puede ser la única opción posible. Reuniendo el material remanente en uno o más rodales, puede asegurarse el subsiguiente cruzamiento lejano de individuos y la producción de semilla.

2.2.5 Capacidad institucional

Al desarrollar la estrategia de conservación, hay que considerar cuidadosamente la capacidad de las organizaciones implicadas. La propia naturaleza de las actividades implicadas en la conservación *ex situ* –colecciones de germoplasma, almacenamiento, propagación, manipulación de semillas y brinzales, viveros, plantación, establecimiento de ensayos, seguros de campo, bancos clonales, plantaciones de reserva- hace importante que existan capacidades institucionales durante un largo período de tiempo. Los rodales *ex situ* dependen de la supervivencia y eficacia continuadas no sólo de las instituciones encargadas, sino también de personal convenientemente especializado que los establecen y pueden no estar presentes durante el período completo de tiempo en que deben mantenerse los rodales *ex situ*. Aunque estos rodales suelen ser de gran valor, si no se utilizan de alguna forma, pueden llegar a contemplarse como un drenaje de los limitados recursos de las instituciones donde están situados (Raven 1981).

Como se mencionó anteriormente, las muchas dudas sobre un compromiso institucional continuado pueden mitigarse si la conservación *ex situ* está estrechamente vinculada a la utilización. Los programas *ex situ* tienen normalmente éxito si la cosecha de semilla, o la producción de otro material reproductivo, es económica, o si la conservación *ex situ* está integrada en programas activos de mejoramiento genético o investigación. En cualquier caso, la capacidad institucional continuada sigue siendo uno de los principales criterios para la conservación *ex situ* y es un aspecto que habrá que afrontar seriamente en la etapa inicial de programación.

Donde las capacidades institucionales son débiles, puede ser conveniente tratar de conseguir una coordinación nacional e internacional con otras instituciones gubernamentales y de investigación (véase el Capítulo 5). Será probablemente necesario desarrollar una estrategia integrada de conservación *ex situ* para una especie que pueda traspasar las fronteras nacionales o estatales, ya que la distribución de las especies y, por tanto, las variaciones genéticas, no consideran fronteras políticas. Los aspectos institucionales y la coordinación regional se analizan con más detalle en el volumen 1, Capítulos. 4 y 5.

ESTRATEGIAS DE MUESTREO PARA LA CONSERVACIÓN *EX SITU*



por Alvin Yanchuk y Søren Hald

3.1 Introducción

En principio, los requisitos de información para planes de muestreo eficientes en conservación *ex situ*, son en gran parte los mismos que para los programas de conservación *in situ* (véase el Volumen 2, Capítulo 2). Sin embargo, como veremos más adelante, las limitaciones físicas y financieras de la mayoría de los métodos de conservación *ex situ* determinarán qué tipo y cuánta de variación genética puede muestrearse y, por tanto, conservarse. Aunque siempre es deseable captar la mayor cantidad posible de variación genética, el número total de árboles muestreados debe ser manejable.

La conservación *ex situ* requiere analizar cómo muestrear entre y dentro de las poblaciones, o incluso a nivel de árboles individuales (e.g., número de semillas por árbol). Por eso, con el fin de representar adecuadamente una población, primero hay que determinar una muestra representativa de cada rodal y luego proceder a muestrearla. Como se mencionó en el Capítulo 1, también es importante tener en cuenta el número de poblaciones de las que se va a obtener la muestra.

Las prioridades sobre qué rodales y qué árboles muestrear tienen que basarse en información sobre las probables diferencias genéticas o el valor potencial del material (por ejemplo, poblaciones remotas o poblaciones que se sabe que tienen atributos especiales) y el nivel de riesgo para las poblaciones, así como la capacidad para recoger realmente el germoplasma y almacenarlo. Como se mencionó anteriormente, puede darse el caso de que las amenazas al acervo genético remanente sean tan grandes que las decisiones resulten fáciles de adoptar: todo el material remanente debe ser muestreado y representado.

3.2 El concepto de población para la conservación *ex situ*

La representación geográfica de las poblaciones de árboles, o de la procedencia de los árboles, es un concepto central que hay que considerar cuando se diseñan estrategias de muestreo para la conservación *ex situ*. La **variación ecotípica** (hábitat específico o adaptaciones a ambientes específicos) entre poblaciones, y la diferenciación, pueden manifestar diferencias genéticas distintivas en muchos atributos, dado un tiempo suficiente. Es de esperarse que ocurra **variación clinal** cuando la diferencia genética entre poblaciones es más gradual, reflejando presiones menos selectivas sobre la distribución de la especie. Independientemente del modelo de variación en la especie, éstas son consideraciones corrientes en el establecimiento de los objetivos del muestreo, ya que un muestreo ecológico representativo de procedencias puede ser un componente importante para las conexiones futuras entre la conservación *in situ* y *ex situ* en el campo; esto es, el potencial para restaurar poblaciones locales de árboles forestales, después de una pérdida o una perturbación importante (los esfuerzos de reforestación deben utilizar procedencias locales, si están disponibles). Naturalmente, también se hacen colecciones *ex situ* en relación con el desarrollo de futuros ensayos y trabajos de mejoramiento genético (véase Capítulo. 4).

Por tanto, las estrategias de recolección deben reconocer el aspecto central de procedencia como la unidad de recursos genéticos (Brown y Hardner 2000). Aunque

el concepto de procedencia no tiene una definición precisa (las fronteras exactas de las poblaciones de intracruzamiento son difíciles de definir en presencia de lo que es normalmente un todo continuo genético), tiene importantes implicaciones prácticas y debe considerarse al documentar las colecciones de semillas y el material vegetativo.

Barner (1975) sugirió las siguientes características para describir una procedencia:

- Puede definirse por medio de límites físicos o geográficos, identificables en el campo.
- Se compone de una comunidad de árboles, potencialmente de intracruzamiento (que difieren probablemente de otras procedencias en constitución genética, por distancia, separación fisiográfica o hábitat ecológico).
- Es lo bastante extensa como para permitir la recolección de suficiente material reproductivo para representar lo que consideramos normalmente como una población (suficientes individuos, con suficiente material disponible de cada árbol).

En resumen, el concepto de procedencia ayuda a cumplir los objetivos de muestreo de acervos de genes para conservación *ex situ*, en la medida en que divide el muestreo entre poblaciones para optimizar la cantidad de variación genética a la vez que mantiene el número y el tamaño de las muestras dentro de unos límites prácticos.

3.3 Tamaños de las muestras para colecciones *ex situ*

Existen muchos métodos de estimación y, por tanto, una extensa variedad de recomendaciones sobre el tamaño de muestra requerido para conservar cierto nivel de variación genética. Los valores varían en la bibliografía de 50 a 5000, pero el número depende de la biología, la estructura genética actual de la especie, y otros muchos factores relacionados con los objetivos de la conservación. A continuación se dan algunos ejemplos de aspectos para tener en cuenta y métodos de muestreo que pueden ser útiles a la hora de muestrear materiales para la conservación de recursos genéticos:

- Cuando de conservar se trata, es importante relacionar los métodos de muestreo con los objetivos de conservación. Aunque todos los métodos de muestreo serán menos eficaces a medida que se aumente el tamaño de las muestras, es posible aproximarse a la proporción o el tipo de variación genética que se pueden captar. De ahí que actualmente sea importante en la conservación *ex situ* que el encargado de conservar pueda cuantificar la variación genética que es factible y práctico mantener.
- Como se indicó en el Volumen 2, la conservación *in situ* de recursos genéticos se centra en gran parte en (1) conservar bajas frecuencias de genes que pueden ser de valor en el futuro, y en (2) conservar poblaciones suficientemente grandes para mantener un equilibrio entre la mutación y la deriva genética que permita lograr una variación genética cuantitativa (adaptativa). Por lo tanto, las poblaciones mantenidas *in situ* deben ser relativamente grandes a fin de continuar evolucionando bajo las presiones ambientales actuales y futuras; las cifras previstas varían de 1000 a 5000 individuos dependiendo de muchos factores demográficos (Lynch 1996) (véase el Volumen 1, Capítulo 6). Como esto se refiere al muestreo para conservación *ex situ*, habría que hacer unas colectas importantes y almacenar el germoplasma a fin de cumplir algunos objetivos de la conservación *in situ*. Esto se puede hacer con algunas especies de coníferas, con características biológicas como el tener grandes cosechas de semilla de polinización abierta. Sin embargo, hay que distinguir o documentar si los objetivos del muestreo para conservación *ex situ* son conservar genes de bajas frecuencias (junto con una variación genética adaptativa) o centrarse exclusivamente en la variación genética adaptativa.

- Brown y Hardner (2000) sugieren que la región o área donde se encuentra la especie debe dividirse en zonas ecogeográficas distintas y recolectar al azar un número limitado de individuos (unos 50 por población) (y lo ideal, si es posible, de unas 50 poblaciones). Esta frecuencia de muestreo se considera suficiente para alcanzar un nivel mínimo de 59 gametos no relacionados, lo que permite la inclusión al menos de una copia del 95% de los alelos que existen en la población elegida con una frecuencia $>0,05$. (Para especies con apareamiento completamente aleatorio, este objetivo equivale a 30 individuos, mientras que en una especie completamente de intracruzamiento, se requieren 60 individuos; por conveniencia podemos redondear esta cifra a 50 individuos no relacionados al azar, para hacer posibles algunas de estas varianzas en sistemas de mejoramiento genético entre plantas). La recolección de muestras procedentes de unos 50 sitios asegurará el muestreo de al menos una copia de todos los alelos comunes ($P > 0,05$) que existen en más del 5% de las poblaciones, con una probabilidad aproximada del 90%.
- La fórmula bien conocida $1 - [1/(2N_e)] \times 100$, donde N_e es el tamaño efectivo de la población de la muestra, o el número de árboles muestreados si puede suponerse que no están relacionados (Lande y Barrowclough 1987), pronostica la proporción aproximada de heterocigosidad o variación genética aditiva captada en la muestra (representado en la Figura 3.1). Una vez más, este tipo de variación genética adaptativa (aditiva) es la variación más importante para el mejoramiento genético de las características adaptativas de crecimiento y evolutivas. Es evidente entonces que sólo se requieren algunas docenas de genotipos para captar un buen porcentaje de la importante variación genética de la población.

Obsérvese que la aproximación de la captación de variación genética cuantitativa que se muestra en el gráfico, es para plantas diploides. Si se sabe que la especie o población es poliploide, entonces esta aproximación es probable que sea conservadora y, cuanto mayor sea el nivel de ploidía, más conservadora será.

Por ejemplo, si un oficial de conservación pudiera recoger o captar 20 a 50 individuos no relacionados (por ejemplo, mediante propagación vegetativa), del modelo mostrado en el gráfico de la Figura 3.1, confiaríamos haber perdido sólo del 2,5% al 1% de la variación genética aditiva de tal población. Sin embargo, una población de 50 individuos sólo tendrá

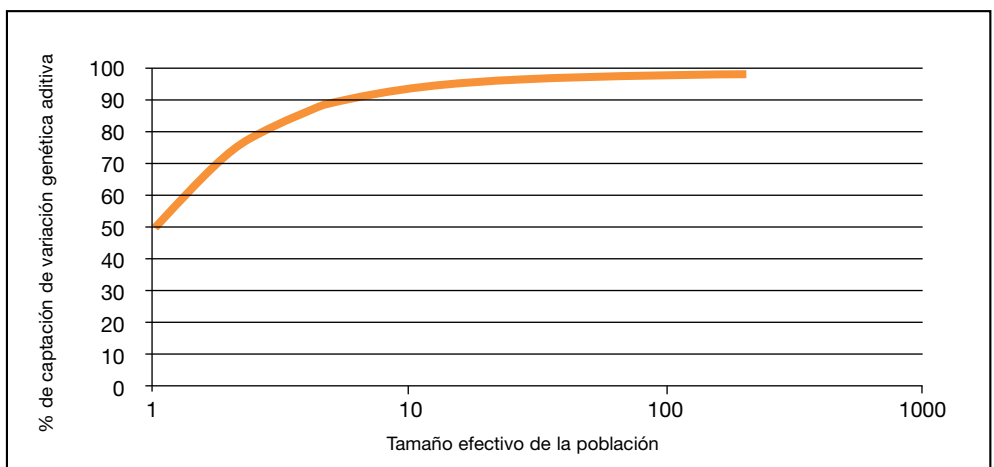


Fig. 3.1 Relación entre el tamaño de la población y el porcentaje de variación genética aditiva conservada (heterocigosidad) en organismos diploides, basado en la aproximación de $1 - [1/(2N_e)] \times 100$

unas pocas copias (quizás 5) de los alelos dominantes originalmente con frecuencias del 10% de la población (Yanchuk 2001a).

- La pérdida con el tiempo de genotipos individuales tanto en programas de conservación in situ como ex situ también habrá que tenerla en cuenta. Por ejemplo, si una plantación ex situ se establece con 1.000 árboles por hectárea, se espera que el número de plantas adultas sobrevivientes disminuya con el tiempo (quizás desde 1.000 brinzales a 400 árboles maduros) como resultado de la competencia o de otros factores. Puede ser necesario tener en cuenta el número de árboles supervivientes e incrementarlo, en la programación y documentación de los objetivos de conservación con el tiempo y en definitiva determinar cuál puede ser el éxito de la conservación. Análogamente, en los dispositivos de almacenamiento de la semilla ex situ puede haber una pérdida debida al diferencial de almacenamiento o a la longevidad de las accesiones de semilla (semillas recogidas de diferentes árboles, por ejemplo), de modo que puede ser necesario que los valores iniciales sean más elevados para permitir tales pérdidas. Sin embargo, es importante señalar que la pérdida de variación genética pasando del orden de 1.000 a 400 genotipos, es muy pequeña (véase la Fig. 3.1). Estas “discrepancias” en los números de muestreo, entre lo que pueden dar normalmente las colecciones de conservación ex situ y lo que puede dar la conservación in situ, son temas esencialmente locales que estarán determinados principalmente por los objetivos de la conservación y las capacidades institucionales y de financiación.

Para algunas de las principales especies comerciales, pueden hacerse colecciones *ex situ* de millares de muestras y se consideran una parte integrante de la estrategia de conservación genética. En el *Pinus radiata*, se ha establecido como parte de la estrategia (véase el Recuadro 3.1) alrededor de 2.000 árboles por población. Para el pino tea (*Pinus taeda*), en la Western Gulf Tree Improvement Cooperative (Cooperativa de Mejora de Árboles del Golfo Occidental), se están conservando indefinidamente en bancos clonales aproximadamente 3.000 selecciones de primera generación (Byram *et al.* 1998), porque representan una gran inversión en la selección de árboles parentales, habiéndose acumulado con el tiempo una valiosa información de los ensayos. En programas más pequeños de mejoramiento genético con menores capacidades institucionales, se pueden mantener menos árboles y conservar aún unos altos niveles de variación genética; no obstante, es importante tratar de documentar qué niveles de conservación genética se pueden mantener mediante el programa de muestreo y conservación.

Recuadro 3.1 **Conservación ex situ de *Pinus radiata***

Los gestores e investigadores de plantaciones de Australia y Nueva Zelanda han sabido desde hace mucho tiempo que sería conveniente la conservación *in situ* de pequeños rodales nativos de *Pinus radiata* en California y México. Sin embargo, se sabía también que estas poblaciones aisladas que estaban amenazadas por la creciente urbanización, el pastoreo y las enfermedades. En 1998 se convocó un taller para discutir las alternativas para la conservación *ex situ* de estos valiosos recursos genéticos. Los genes de frecuencia intermedia y alta (por lo tanto, la mayor parte de la variación genética cuantitativa de interés) se espera que se conserven bien en los programas de mejoramiento genético e investigación de Australia y Nueva Zelanda, de modo que el desafío consistía en desarrollar un programa para conservar los genes de baja frecuencia en un programa factible *ex situ*. Los resultados del taller fueron:

continúa

- Tamaños de población efectiva de unos 2.000 pies sería el tamaño elegido de conservación para cada una de las poblaciones amenazadas. Esto mantendría alelos con una frecuencia corriente de 0,01 en la población.
- La rotación de los bloques de población que existen en Australia y Nueva Zelanda se prolongaría cuanto fuera posible y la semilla se recogería antes de la corta.
- Los bloques de población existentes de menos de 20 ha. se repetirían cuando fuera posible y se establecerían nuevos grupos de 20 ha. cuando fuera necesario.
- Las poblaciones, aparte de las de la Isla de Cedros, son bastante seguras, particularmente las poblaciones de tierra firme que se plantaron en agosto de 2004. La semilla de la Isla de Cedros se sembró en 2003, pero la escasa germinación es probable que imponga que los pocos lotes de semillas adicionales de que dispone tengan también que sembrarse (K. Eldridge, *com. pers.*).



R. Burdon y C. Low (Instituto de Investigación Forestal, Rotorua, Nueva Zelanda), delante de un cartel de la conservación ex situ de Pinus radiata. (Deborah Rogers/UC Davis)

Se evaluaron detalles adicionales, como la contaminación de polen y los costes de sistemas alternativos de producción de semilla, y se definieron nuevas investigaciones. El coste de la polinización controlada, con fines de conservación fue considerado por los participantes de la industria como demasiado elevados para que resulte práctico el sistema, por lo que se utilizará la polinización directa. En este caso, la contaminación de los caudales genéticos de las poblaciones de los bloques de conservación, debida al polen circundante, se convierte en un problema importante. Se espera ordenar los bloques de conservación con las plantaciones circundantes de modo que pueda recogerse semilla relativamente menos contaminada hasta 7 años después del aprovechamiento de las plantaciones circundantes. El *P. radiata* es una de las especies exóticas más importantes plantadas en el mundo y es merecedora probablemente de tales esfuerzos de conservación. Debido a su excepcional importancia para Australia, Nueva Zelanda y Chile, es probable que se disponga, en la actualidad y en el futuro, de capacidades institucionales para realizar de forma eficaz los esfuerzos necesarios. Para otras especies cuya conservación *ex situ* es también necesaria, pero puede disponerse de menos apoyo, se podrían poner en práctica buenas medidas de conservación utilizando el ejemplo del *P. radiata*.

Resumido de Matheson *et al.* (1999) 3,1

Para muchas de las principales especies comerciales, como el *P. radiata* y el *P. taeda*, los objetivos de conservación son algo más amplios y fáciles de cumplir, debido al apoyo económico, la biología de los pinos y la cantidad de información genética disponible sobre tales especies. Sin embargo, para muchas especies tropicales o semiáridas que están bajo la presión humana, sólo se dispone de algunas docenas de poblaciones o incluso de individuos, siendo probable que las medidas de conservación mediante colecciones *ex situ* sean críticas para el futuro de las especies (véase el Recuadro 3.2).

Todo lo anteriormente expuesto sobre métodos y estrategias de muestreo, supone que los genes y la variación genética son un recurso estático. Por ejemplo, los consideramos con frecuencia como “bolas coloreadas en una jarra” y estamos interesados en coger una muestra representativa de “todos los colores de la jarra”. Como se analizó en el volumen 1, los genes y la variación genética no son realmente estáticos pudiendo crearse y alterarse por muchos factores como la mutación y la combinación repetida. Rasmussen y Phillips

(1997) analizan además los diversos mecanismos que pueden alterar la variación genética *de novo*. En el desarrollo de estrategias de conservación genética estamos obligados a utilizar métodos de muestreo más bien sencillos, basados en suposiciones de que la variación genética es en cierta medida estática, incluso aunque nos demos cuenta de que ésta es una noción más bien simplista.

Recuadro 3.2 Algunas especies cuya conservación sólo se considera posible mediante la conservación *ex situ*

Vateriopsis seychellarum

Esta especie de dipterocarpo se encuentra en las Islas Seychelles. Produce una madera de gran calidad, lo que hace de ella una candidata interesante para los programas de reforestación. Hoy día la especie se limita a unas pocas poblaciones muy pequeñas en Mahé. Las poblaciones, en las islas vecinas de Praslin y Silhouette, están actualmente extinguidas debido probablemente a una deforestación primitiva. Las pequeñas poblaciones que quedan en Mahé están bajo la presión del aumento de la agricultura, de plantas invasoras y posiblemente por la ausencia de agentes dispersores. Sin embargo, la capacidad de regeneración de la especie parece ser buena, por lo que se está iniciando un programa de conservación que incluye la plantación de brinzales en otras estaciones de las Seychelles.

Cupressus dupreziana

Esta especie se encuentra en una zona de 200 km² en la meseta de Edehi al este de Argelia, donde está en peligro inmediato de desaparecer por completo. De acuerdo con los estudios del polen fósil de la especie, que demuestra un potencial prometedor para la forestación de regiones áridas, estuvo en otros tiempos muy extendida en el Sahara. Un estudio ha registrado que actualmente sólo quedan 153 especímenes vivos (FAO 1986). Todos los árboles que quedan son viejos (el más viejo tiene por lo menos 2.000 años) y toda la regeneración la destruye el pastoreo de animales. Además, se cree que la capa freática se ha hundido tanto que es imposible la regeneración. La especie se ha regenerado con éxito en jardines botánicos y como parece haber pocas perspectivas para conservar la población natural remanente, se considera que la conservación *ex situ* es la única opción.

Fuente: Base de Datos de Conservación de Árboles WCMC

Monopetalanthus hedinii

Esta especie de leguminosa se encuentra en Camerún, donde se informa que es el miembro del género que está en mayor peligro. Está estrechamente relacionada con el *Monopetalum heitzii* pero parece crecer en mayores proporciones con una tasa de crecimiento relativamente alta. Existe un interés considerable por la especie como árbol potencial para plantaciones. Se ha registrado la presencia de ésta en pequeñas localidades de Muyuka, Eseka, Kribi, Maleke y Lolodorf. Está sometida a la presión de la agricultura y puede haberse extinguido ya en algunas de las estaciones antes citadas.

Fuente: Gérard et al. (1998)

3.4 Muestreo entre diferentes poblaciones

Como se mencionó en el Recuadro 2.1, en definitiva debemos muestrear individuos para estudiar o captar la variación genética; sin embargo, una consideración importante en una experimentación eficiente, es cómo se distribuye el muestreo de individuos a través de la serie de especies de interés, los ecosistemas, las poblaciones dentro de los ecosistemas, o los tipos representativos y número de individuos dentro de cada población. Esto se ha tratado también en el volumen 1, Secciones 3.6, 3.7, con respecto a la definición de prioridades de muestras representativas de ecosistemas y poblaciones dentro de un ecosistema, si las especies están distribuidas como tales. En el volumen 2, Sección 2.2, se presentó la zonificación ecológica del *Pinus merkusii* como otro ejemplo de cómo puede utilizarse la estratificación entre poblaciones, basada en áreas ecológicas. También se trató anteriormente (véase volumen 1, Capítulo 6), cómo la variación genética, dentro de y entre poblaciones, puede ser útil al diseñar en el terreno un método de muestreo. El Recuadro 3.3 describe cómo pueden utilizarse los marcadores moleculares para incrementar el diseño de muestreo dentro de e incluso entre poblaciones, para captar niveles similares de diversidad genética de poblaciones centrales y periféricas (es decir rodales en el borde de la distribución) en el caso de la *Picea sitchensis* (picea de Sitka).

Tal como se muestra en el Recuadro 3.3, si se pueden recolectar múltiples poblaciones para fines *ex situ*, es importante considerar las características de los rodales a partir de los cuales se puede hacer la recolección. En resumen:

- ¿Se están haciendo las recolecciones a partir de especies muy dispersas?
- ¿Están creciendo los individuos de la especie en manchas y sería posible que estas manchas contengan individuos relacionados?
- ¿Deben hacerse las recolecciones a partir de la parte central de la población o de individuos o poblaciones de la periferia?

Recuadro 3.3 Muestreo y diseño para la conservación genética *ex situ* e *in situ* de la *Picea sitchensis*

Las especies vegetales, y las poblaciones dentro de las especies, varían mucho en cuanto a los niveles y modelos de variación genética, lo que sugiere que se necesitan diferentes estrategias de muestreo a fin de captar el máximo de diversidad genética. Sin embargo, para muchas especies la estructura genética de las poblaciones será desconocida antes del muestreo y éste ha dependido generalmente de predicciones a partir de modelos teóricos, pero puede aclararse con el conocimiento del sistema de reproducción y de la distribución de la población. *P. sitchensis* es una especie de amplia distribución con diferentes estructuras de población. En un estudio sobre *P. sitchensis* en el noroeste del Pacífico de Norte América, Gapare (2003) examinó los efectos específicos de variar el área muestreada, dado un tamaño fijo de la muestra de la población, sobre la captación de variación genética neutral (utilizando marcadores genéticos STS) en poblaciones centrales frente a poblaciones periféricas. Las poblaciones periféricas pueden estar ecológica o geográficamente separadas de las poblaciones centrales y con frecuencia se encuentran en los márgenes del ámbito de la especie. Acontecimientos históricos de migración, la proximidad a poblaciones vecinas y los niveles resultantes de flujo de genes, pueden tener efecto sobre la estructura genética y los modelos de variación de ambos tipos de poblaciones, centrales y periféricas.

Los resultados confirmaron que los dos componentes clave de una estrategia de muestreo son (1) el tamaño del área muestreada y (2) el número de individuos muestreados. Específicamente,

continúa

se necesitan mayores tamaños de muestras de población y de áreas muestreadas para captar cantidades comparables de “riqueza alélica” (número promedio de alelos por locus), en las poblaciones periféricas que en las poblaciones centrales, debido a la estructura más espacial de las poblaciones periféricas (individuos que crecen en grupos, que probablemente contendrán individuos emparentados). El muestreo se debe realizar en áreas más extensas en las poblaciones periféricas, a fin de romper esta estructura de vecindad. Por ejemplo, para poblaciones centrales de *P. Sitchensis*, una muestra de 150 árboles, con un espaciamiento interno mínimo de 30–50 m., muestreada a partir de 225–325 ha., sería adecuada para captar el 95% de la riqueza alélica, pero para poblaciones periféricas el área muestreada tendría que ampliarse por lo menos hasta 400 ha. Estos resultados demuestran que los estudios moleculares pueden proporcionar una información importante sobre estrategias de muestreo e incluso sobre el diseño de reservas para la conservación tanto *ex situ* como *in situ*.



Una de las poblaciones más septentrionales y periféricas de la picea de Sitka en la Isla Kodiak, Alaska. (D. Piggot/Yellow Point Propagation)

Resumido por A. Yanchuk, a partir de Gapare (2003)

3.5 Planificación y documentación de fuentes de semilla y mapas

Una vez que se han elegido las poblaciones y se han hecho las recolecciones, es importante que las notas detalladas de cada recolección, incluyendo los métodos de recolección y unos mapas precisos, se dupliquen y almacenen y archiven con seguridad. Los registros cuidadosos han sido en el pasado inestimables para el restablecimiento de los orígenes de poblaciones importantes muchos años después de las recolecciones. Muchos tipos de información han demostrado ser útiles más tarde, incluyendo:

- las coordenadas del sistema de información geográfica (SIG) de los sitios de recolección (incluso por árbol madre si es posible) y, naturalmente, la localización del arboretum o plantación de conservación *ex situ*
- los mapas de carreteras de acceso
- latitud, longitud y altitud (especialmente si no se dispone de coordenadas GIS)
- mapas detallados de situación de los límites del rodal (y si es posible, dibujarlos)
- las posiciones de los árboles dentro de los rodales (si no se dispone de coordenadas GIS), dependiendo del nivel necesario de precisión; unos registros detallados serán útiles cuando haya que muestrear a partir de un número limitado de árboles
- el número aproximado de piñas, conteos o estimaciones del número de semillas o de piezas de material para injertar procedente de cada árbol, así como el tamaño del árbol, edad y forma general
- características generales del rodal (edad media supuesta, densidad en número de pies por hectárea, etc.).

La recolección e información cuidadosa del material genético forestal de toda clase se está convirtiendo también en un tema importante a nivel internacional. Para asegurar la integridad de las muestras genéticas que se hacen y para contar con unos registros cuidadosos sobre la procedencia del material y su posible destino, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE 2001) ha desarrollado un plan para el control del material forestal reproductivo que se transporta en el comercio internacional. Con ello se intenta asegurar que se utilizan ciertas normas, especificaciones y terminología, cuando se recoge semilla para su traslado a otras jurisdicciones. En la actualidad, 22 países participan en el plan, incluyendo países tropicales que están desarrollando su propio intercambio de semillas para fines de reforestación. Las semillas y plantas se producen y se controlan oficialmente de acuerdo con procedimientos comunes armonizados. El Plan de la OCDE sobre Semillas y Plantas Forestales, define cuatro grandes categorías de material forestal reproductivo reconocido para certificación:

- material de fuente identificada (norma mínima)
- material procedente de rodales seleccionados situados en regiones bien delimitadas de procedencia
- material de huertos semilleros no comprobados que puede producir semilla de calidad mejorada
- material comprobado que está genéticamente mejorado.

La adhesión a un sistema formal de documentación ayuda a dar confianza y claridad a los demás que pueden también estar implicados en la conservación y uso del material.

CONSERVACIÓN *EX SITU* MEDIANTE SELECCIÓN Y MEJORAMIENTO GENÉTICO

por Alvin Yanchuk



4.1 Introducción

Comparados con el mejoramiento genético de especies agrícolas, los programas de mejoramiento genético para árboles forestales son relativamente recientes. Sin embargo, sabemos mucho sobre cómo manejar genéticamente y mejorar muchos tipos de especies de árboles forestales. Aunque teóricamente es posible que podamos mantener y desarrollar los recursos genéticos de la mayoría de las especies arbóreas forestales, en la práctica podemos trabajar con intensidad sólo con unas pocas y la mayor parte de nuestra experiencia se ha limitado hasta ahora a especies pioneras y de la zona templada y a sus condiciones ecológicas. Por ejemplo, la silvicultura industrial se concentra probablemente en menos de 50 especies en todo el mundo.

No obstante, hay una jerarquía de niveles de mejoramiento que pueden conseguirse con una gama de posibles inversiones económicas en una especie o en sus poblaciones y que pueden proporcionar un valioso medio no sólo para conservar sino para desarrollar aún más los recursos genéticos de una especie. Por lo tanto, se pueden considerar varios métodos para elaborar un programa y evaluar el uso apropiado del mejoramiento genético y de intervenciones genéticas intensivas con cada especie (Namkoong 2003). Este capítulo describe el papel que pueden jugar varios aspectos de la selección tradicional, el mejoramiento genético y los ensayos de árboles en el desarrollo de algunas especies, creándose con ello unas condiciones muy adecuadas para la conservación *ex situ*. Muchos temas sólo se tratan brevemente, debiendo acudir el lector a los libros clásicos sobre mejoramiento de árboles (como Zobel y Talbert 1984 o Namkoong *et al.* 1988) para información adicional. Sin embargo, intentamos mostrar algunas de las formas no sólo para proteger importantes colecciones de recursos genéticos sino también para mejorarlas respecto a las variaciones genéticas que pueden ser de interés para las actuales y futuras necesidades humanas y ecológicas.

4.2 Selección de especies objetivo

Puede ser conveniente, o incluso necesario, desarrollar un programa de mejoramiento genético para una especie determinada, quizá debido a su valor local o al riesgo de extinción; sin embargo, la especie debe prestarse a una manipulación relativamente fácil para las colecciones (estacas con raíces, enraizamiento, injertado, floración, realización de cruces controlados entre árboles, recolección de semilla, almacenamiento de la semilla, desarrollo de brinzales) y también para ensayos de campo y mejoramiento genético. Por ejemplo, aunque muchas especies de *Abies* parecen ser buenos candidatos para programas tradicionales de mejoramiento genético, es extraordinariamente difícil obtener floración en árboles jóvenes (Owens y Morris 1998). Incluso con semilla adecuada, recogida de árboles padre en el campo proveniente de programas de ensayos de progenies y polinización abierta, los árboles que han sido seleccionados e injertados no han producido semilla en los sistemas tradicionales de huertos semilleros. Análogamente, con muchas especies

tropicales que pueden tener semilla de vida corta o semilla recalcitrante, los ensayos y el mejoramiento genético pueden complicarse por problemas de almacenamiento de la semilla y de germinación. La investigación sobre control de la floración, los mecanismos y factores polinizadores, el potencial de reproducción vegetativa y el potencial de producción de semilla en diferentes condiciones ambientales, pueden determinar si se deben o pueden hacer inversiones en su mejoramiento genético.

Además, debe haber una capacidad razonable para proporcionar un flujo de material desde las plantas donantes a los viveros y de allí al campo, de tal modo que las plantaciones (ya sean ensayos de campo o plantaciones operativas) sobrevivan y se desarrollen para proporcionar la próxima generación de árboles. En otras palabras, se necesita disponer de unos buenos viveros y sistemas silvícolas. A veces la necesidad de alguna atención inmediata para una especie, puede ayudar a motivar la investigación para hacer posible esta situación o mejorarla. Por ejemplo, el descubrimiento de sólo unas pocas docenas de individuos de *Wollemia nobilis* en Australia, ha motivado varias iniciativas de investigación para estudiar una serie de aspectos de la biología de la semilla y del crecimiento de los brinzales (Offord y Meagher 2001) y también de la genética de la especie (Hanson 2001) (véase Volumen 2, Recuadro 4.4, Caso 2). Sin embargo, hay que considerar realmente la capacidad organizativa antes de comenzar cualquier tipo de programa de mejoramiento genético.

4.3 Procesos genéticos

Tradicionalmente se considera que las fuerzas genéticas en poblaciones que pueden ser afectadas por seres humanos son la selección, la migración y el tamaño de la población. La mutación es importante en programas de mejoramiento genético a largo plazo, es decir, de más de 10 generaciones, normalmente no se suele considerar. Aunque es posible actualmente, con la nueva tecnología genética, localizar o lograr genes con ciertas especificaciones, e insertarlos en los genomas para obtener grandes efectos, habrá que manejar todavía los genotipos individuales dentro de los programas tradicionales, que manejan (1) genotipos individuales, (2) poblaciones para muchos caracteres y (3) muchas condiciones ambientales diversas (Namkoong *et al.* 2004).

La selección artificial incluye la selección de individuos para reproducir la siguiente generación, lo que tiene el efecto de cambiar el fenotipo medio para las características



Plantación joven de Pinus radiata en Nueva Zelanda (Deborah Rogers/UC Davis).

heredadas seleccionadas. Para muchos caracteres que parecen estar afectados por muchos genes, el proceso ha funcionado bien y está en concordancia con la experiencia en el mejoramiento fitogenético común. Para caracteres con menor heredabilidad, como los relativos al crecimiento y adaptación; generalmente no es posible un mejoramiento grande e inmediato (es decir en una o dos generaciones de selección fenotípica, selección basada en el carácter observado en un árbol individual). Los caracteres con mayor heredabilidad –como la rectitud, las características de forma, algunos caracteres de resistencia a las enfermedades e incluso algunas características de propiedad de la madera– pueden mejorarse moderadamente mediante selección fenotípica. Por ello, en algunos casos, si el carácter es de mayor heredabilidad, la selección fenotípica puede ser un método mejor ya que el agricultor, el forestal o el viverista forestal pueden seleccionar directamente sobre las características observadas del árbol a la edad

esperada. Ésta puede ser una estrategia muy razonable, particularmente si se dispone de pocos recursos para ensayos genéticos más sofisticados.

Los programas de selección artificial son considerados a veces por los críticos como “antinaturales” y la selección para algunos caracteres de importancia económica inmediata demostrará a la larga que esto es un error. Sin embargo, también es importante señalar que todos los genotipos individuales en la próxima generación, están todavía sujetos a muchas fuerzas de “selección natural”. Mediante cualquier mecanismo que utilicen los seres humanos para seleccionar árboles de interés, mejorarlos y replantar la próxima generación para selección, los cambios dirigidos por el hombre deben funcionar bien todavía en lo que es aún más importante para los desafíos ambientales inmediatos (Libby 2002). Todas las especies exóticas que han sido “naturalizadas” para sus nuevas áreas geográficas, han estado en gran medida sujetas a estas presiones de selección natural y han llegado a ser, sin embargo, importantes especies comerciales (como *Pinus radiata* y *Pseudotsuga menziesii*) ampliando, en realidad, el propio recurso genético. Los otros dos procesos genéticos que afectan a la conservación y al mejoramiento genético de los árboles forestales (migración de genes y tamaño de la población) se analizan en la Sección 4.6.



Rodal adulto de Pseudotsuga menziesii en Vallombrosa, Italia. (Alvin Yanchuk/B.C. Ministerio de Bosque)

4.4 Estudios genéticos, selección en poblaciones naturales o naturalizadas, ensayos y mejoramiento genético



Ensayo de procedencias del abeto Douglas del interior de la Columbia Británica. (Alvin Yanchuk/B.C. Ministerio de Bosques)

Como se mencionó anteriormente, pocas especies de árboles han estado sujetas a estudios genéticos de ámbito extenso (ensayos de procedencias) utilizando principios experimentales comunes de invernadero. Sin embargo, estos estudios han demostrado que, en general, la mayoría de las especies arbóreas forestales tienen modelos de adaptación en relación con el clima de donde tuvieron su origen. No obstante, también se conoce que las adaptaciones no pueden ser perfectas (Namkoong 1969), como resultado de efectos de retraso en la adaptación y normalmente de un vasto flujo de polen entre poblaciones. Además, diferentes especies

han evolucionado con diferentes estrategias para hacer frente a ambientes y climas variables, pudiendo clasificarse como generalistas, intermedias o especialistas. También algunas especies, como muchas del género *Thuja*, que tienen niveles de variación genética los cuales son bastante inferiores a los de la mayoría de las demás coníferas (Yeh 1988, Xie *et al.* 1992), y el *Pinus resinosa* han mostrado una variación genética casi nula (DeVerno y Mossler 1997). Por ello, no pueden hacerse generalizaciones para todas las especies.

Cuando se carece de un conocimiento previo de la variación genética a través de la distribución de la especie, las estrategias de muestreo para nuevos programas de mejoramiento genético han tendido a suponer: (1) que existen diferencias genéticas entre poblaciones, y (2) que éstas siguen gradientes ambientales, ecológicos, climáticos e incluso edáficos, a través de su distribución. Como se analizó en el Volumen 1, Capítulo 2, éste es un supuesto conservador pero que debe hacerse en la mayoría de los casos, con respecto a la “representación ecológica” en el muestreo. Para especies exóticas que se han llegado a naturalizar en un país (denominadas a veces **ecotipos locales**), puede ser importante también considerar los efectos de procedencia. Si las diversas introducciones pueden ser rastreadas hasta sus orígenes, o si ha transcurrido un tiempo considerable desde que fueron introducidas, se pueden haber desarrollado diferencias entre las poblaciones. Estos diferentes ecotipos locales podrían ser un método importante para incluir algunas variaciones entre poblaciones en el muestreo inicial. Por ejemplo, los programas de mejoramiento genético de *Pinus radiata* han podido beneficiarse de las diferencias entre



Un ejemplar de Pinus resinosa, probablemente uno de los más viejos de Norte América, de una edad aproximada de 360 años (Alex Mossler/NRCan, Servicio Forestal Canadiense)

poblaciones tanto en las poblaciones silvestres como en las introducidas y especialmente para aquellas introducciones procedentes de la Isla de Guadalupe, que han demostrado tener una madera de densidad mucho mayor (Rogers *et al.* 2002). Los ensayos de especies o procedencias que permiten entresacar las poblaciones potencialmente valiosas son normalmente el mejor método para comenzar una población base para avanzar en desarrollo y mejoramiento genético. Muchos programas de todo el mundo han comenzado con tales estudios, que varían desde introducciones de coníferas relacionadas a especies totalmente nuevas que pueden tener hábitats similares. Por ejemplo, en varias especies de *Acacia* y *Prosopis*, las introducciones en diversos países para ensayos de poblaciones que podrían ser adecuadas para forraje, leña, etc., pueden servir en la actualidad como población base para continuar la selección y mejoramiento genético de las especies o procedencias que se comportaron bien en diversas condiciones locales (véase el Recuadro 4.1).

Los seres humanos han introducido centenares o incluso millares de especies arbóreas en nuevos ambientes, a lo largo de la historia. Muchas de estas introducciones han fracasado, pero también muchas han tenido éxito. No obstante, la introducción de especies exóticas debe considerarse cuidadosamente, tanto por el potencial positivo como el negativo que pueden tener en los nuevos ecosistemas. Por ejemplo, el *Prosopis* se ha convertido en una “especie de maleza” en su comportamiento en algunos países africanos, por lo que es necesario considerar también la biología de la especie y sus características invasoras. En otras palabras, aunque hay millares de especies que pueden exigir nuestra atención, desde simples colecciones y plantaciones de campo, no todas las introducciones y los esfuerzos subsiguientes de mejoramiento genético pueden ser exitosos.

4.4.1 Selección de una población base

Se considera apropiado tener una operación simple de escogencia del mejor material de árboles que estén establecidos en conservación *ex situ* y posterior a esto entrar a un nivel de selección mas avanzada que implique el desarrollo de una población base (Tomando

los mejores materiales y realizando pruebas de heredabilidad, de rasgos, comportamiento de las progenies, etc.). Muchos de los temas del muestreo genético que se analizaron en el Capítulo 3, son también apropiados aquí; la población inicial “silvestre” o “semisilvestre”, no mejorada, tiene que estar compuesta de unos pocos árboles hasta varios centenares a fin de poder seleccionar suficientes individuos superiores. Por ejemplo, la selección de 50 árboles entre 5.000, representa una proporción del 1%, que sería un rango conveniente. Se requiere una intensidad de selección relativamente alta a fin de hacer mejoras genéticas para el carácter o caracteres de interés, sobre todo para caracteres de baja heredabilidad.

Recuadro 4.1 Ensayos internacionales de especies y procedencias de especies de *Acacia* y *Prosopis*

Antecedentes

En 1983–1987 se recogieron, bajo la coordinación de la FAO, semillas de 281 procedencias de 43 especies, principalmente de *Acacia* y *Prosopis*, en 11 países áridos y semiáridos: Argentina, Chile, India, Israel, México, Níger, Pakistán, Perú, Senegal, Sudán y Yemen.

El almacenamiento y distribución de la semilla estuvo a cargo del Centro de Semillas Forestales de Danida, Dinamarca (CSFD), y las semillas se distribuyeron para evaluación desde 1983 a 1989. Se establecieron ensayos de campo, con fracciones de los lotes de semilla, a cargo de 40 institutos y proyectos, en 22 países. Aunque el proyecto terminó oficialmente en 1987, se consideró necesaria una evaluación global de una serie de ensayos seleccionados, con los países interesados, a fin de lograr un primer conocimiento de la productividad de las especies y procedencias incluidas.



Extracción de goma de Acacia senegal var. senegal utilizando un sunki (herramienta con forma de palo) en una plantación de 12 años en El Obeid, Sudán. (FAO)

Mediciones

Se realizaron mediciones, con la colaboración de los institutos nacionales, la FAO y el CSFD, que proporcionaron también asistencia financiera para la evaluación de los ensayos. Durante 1990 a 1994, se evaluaron 26 ensayos en 6 países (Brasil, Burkina Faso, India, Pakistán, Senegal y Sudán).

Resultados

La replicación de procedencias en el conjunto de los ensayos fue limitada y en consecuencia también es limitada la posibilidad de comparación del comportamiento en los diferentes ensayos y países. Sin embargo, en Senegal los resultados indicaron que algunas procedencias de *A. tortilis* y la procedencia de *A. Senegal*, tenían un gran número de tallos, lo que podría ser una ventaja en la producción de forraje para ganado mayor. Para la producción de peso en seco, las mejores procedencias se encontraron en *P. juliflora*,

continúa

A. nilotica y *A. tortilis*. En algunos ensayos, ninguna especie pareció ir bien y esto, en sí mismo, es una buena información respecto a la idoneidad de estas especies para nuevos tipos de ambientes. Especies de escasa producción fueron *A. aneura*, *A. holoserica*, *A. Senegal* y quizás *P. chilensis*, si bien muchas de estas especies estuvieron representadas sólo por un pequeño número de procedencias, lo que puede no ser representativo del pleno potencial de las especies. Aunque siempre puede haber limitaciones para la introducción de especies o procedencias adecuadas, éstos pueden ser valiosos puntos de partida para una nueva selección y mejoramiento genético, si es posible desde el punto de vista organizativo y si existe la necesidad.

Se han elaborado una serie de informes de evaluación de campo para cada uno de los 26 ensayos, pudiendo observarse en: <http://www.dfsc.dk/pdf/Aridzone%20trials/index.html>

Fuente: Raebild *et al.* (2003a-u, 2004a-e)

4.4.2 Ensayo de progenies y diseños de ensayos de campo

Durante los últimos 30 años los viveristas han utilizado, cada vez más, técnicas que identifican y predicen con más precisión el valor genético, o valía de los árboles padres seleccionados (selección genotípica). El uso de la descendencia de un árbol madre ya sean estaquillas (clones) o brinzales, es una poderosa técnica para examinar el valor genético de cualquier parental. Con muchos árboles descendientes por padre, plantados en todos los sitios de ensayo con



Ensayo de una joven progenie del abeto Douglas de la costa, establecido con un diseño de bloques incompletos. (Michael Stoehr/B.C. Ministerio de Bosques)

un modelo aleatorio, algunos árboles serán una mejor muestra de los microambientes medios y algunos no lo serán, pero, en promedio, la media estadística o valor medio de la selección parental o familiar reflejará la “verdadera” media genética (valor de mejoramiento genético). Es generalmente una práctica común utilizar alrededor de 20 a 30 descendientes por familia, por sitio de ensayo. El incluir más observaciones por familia tiende a ser ineficaz respecto a la finalidad de poder comparar más familias (Cotterill y James 1984; Magnussen 1993). Excepto para algunos caracteres de muy alta heredabilidad, será siempre necesaria una cierta forma de ensayos de progenies para seleccionar una población de “ganadores” para un nuevo mejoramiento genético y selección o para fines de producción de semilla.

Para fines de conservación, las plantaciones de ensayo de progenies se están considerando también como otra forma de plantación de conservación genética *ex situ*: se plantan normalmente en ambientes, climas o hábitats de interés actual o futuro, contienen progenies desde unas pocas decenas hasta incluso algunos centenares de selecciones parentales y hay un mayor nivel de

información (normalmente procedente de las mediciones de progenies). Varios programas en el noroeste del Pacífico de Norte América consideran actualmente las poblaciones especiales de ensayos de progenies como otro instrumento importante de conservación *ex situ* (Yanchuk 2001a; Lipow *et al.* 2002).

En algunos de los primeros planes de ensayos utilizados en el mejoramiento de árboles, se plantaron procedencias genéticas como fuentes de una sola semilla en grandes bloques o en parcelas lineales. Sin embargo, los ambientes de ensayo de árboles forestales son normalmente demasiado desiguales respecto a la humedad o a las condiciones del suelo, lo que puede confundir sobre el crecimiento o la supervivencia de las procedencias genéticas plantadas en grupos, por lo que se han desarrollado diseños de bloques completos al azar (BCA). Con los diseños BCA, como los bloques o replicas se disponen con menor número de árboles por procedencia, familia o clon en cada bloque (con más bloques o replicas en el sitio de ensayo), la eficacia del diseño se hace mayor. Un experimento normal y relativamente sólido de parcelas en hileras sería algo similar al de parcelas en hileras de cuatro árboles, con ocho replicas o bloques. El diseño más eficiente es uno que utiliza parcelas de un solo árbol: éste sería un experimento con 25 a 30 progenies por procedencia genética, lo que significa que hay de 25 a 30 replicas o bloques. Recientemente, muchos programas de mejoramiento genético han considerado nuevos diseños como los de bloques incompletos (BIC) (Fu 2003). Aunque éstos pueden aumentar la eficacia de los ensayos genéticos son más complicados de instalar y el análisis estadístico es más complejo, por lo que sólo deben intentarse si los recursos lo permiten. El criterio más importante es contar con suficientes árboles sanos por procedencia genética creciendo dentro de un ambiente representativo para un buen ensayo.

4.4.3 Selección en edades anteriores a la edad normal de aprovechamiento

Excepto en el caso de algunas especies de crecimiento rápido, como los álamos híbridos o *Eucalyptus* spp., es raro en silvicultura que la edad de selección sea la misma que la edad del aprovechamiento final. Las mediciones o selecciones suelen ser de árboles juveniles, mientras que nosotros deseamos incrementar la productividad de árboles maduros a nivel del rodal. Esto es especialmente cierto para muchas especies madereras, árboles frutales o árboles cultivados para productos secundarios (como la producción de resina) en los que las estimaciones del aprovechamiento final o producción final pueden ser del orden de 20 a 80 años. Si los genes que afectan al carácter a una edad temprana, cambian su expresión a edades más avanzadas, entonces la selección y predicción del mejoramiento genético será incorrecto y el beneficio genético se estimará en exceso. Afortunadamente, cuando se requiere lograr la máxima ventaja por unidad de tiempo, la edad óptima para formas de selección genotípica como la selección de familias es de 6 a 12 años para la mayoría de los caracteres de crecimiento, incluso aquéllos que se hacen importantes a los 25 años de edad o más tarde (Lambeth 1980). Aunque poco puede hacerse para mejorar esta situación, es un concepto importante que el viverista o el forestal deben considerar cuando presenten los posibles beneficios de la selección y mejoramiento genético.

4.5 Interacciones genotipo x ambiente

Sabemos también que determinadas poblaciones, familias o genotipos (como los clones) pueden comportarse de forma diferente en diferentes ambientes, porque los propios genes se expresan de forma diferente bajo condiciones ambientales diversas. Esta **interacción genotipo x ambiente (G x A)** es un tema importante que hay que considerar en todos los programas de mejoramiento fitogenético. Por ello, es importante que en planes iniciales de ensayos, se utilicen

ensayos de campo de múltiples sitios a fin de establecer la magnitud de la interacción $G \times A$ en la población o en familias específicas de interés. A fin de reducir al mínimo las desviaciones que pueden producirse al seleccionar genotipos deseables o familias, deben establecerse en más de un sitio de ensayo y, preferentemente, en un mínimo de tres. Más de tres sitios será útil si la variedad de ambientes o hábitats es grande, pero tiende a no proporcionar una ventaja mucho mayor cuando se buscan genotipos o familias que pueden considerarse estables dentro de una variedad ambiental que se considera apropiada para uno o más grupos de genotipos (Johnson 1997). El establecer poblaciones de ensayo de progenies en más de un sitio, permite también una mayor seguridad de conservación *ex situ* en diferentes ambientes de ensayo. Los análisis genéticos cuantitativos requeridos para interpretar correctamente las interacciones $G \times A$ pueden complicarse y no se pueden discutir plenamente aquí. Procedimientos como los descritos por White y Hodge (1989) deben considerarse durante el análisis de los datos.

4.6 Mejoramiento genético y ensayo de una generación avanzada

Una vez que se ha realizado el rastreo inicial de una población base (de una zona silvestre o de plantaciones naturalizadas, como los ecotipos locales analizados anteriormente) con ensayos de progenie o clonales (como los descritos en la Sección 4.4), la variación genética adaptativa en esta “población de mejoramiento genético” seleccionada, puede mantenerse generalmente con un número tan reducido como de 20 a 50 individuos. La base para este número relativamente reducido, se ha analizado en el Capítulo 3, en lo que se refiere a qué cantidad de variación genética se puede captar en poblaciones de este tamaño. Aunque un número relativamente reducido de padres, quizás 30, puede contribuir a desarrollar una población determinada, de interés para varias generaciones, 3 a 5 poblaciones de este tamaño, con diferentes objetivos de despliegue (diferencias climáticas de hábitats o incluso de caracteres) pueden incluir una extensa variedad de potencial genético y permitirán muchas opciones en el futuro, si los objetivos cambian. Este es el fundamento del sistema de mejoramiento genético de poblaciones múltiples que ha resultado práctico y aplicable en muchos programas de mejoramiento genético en todo el mundo (Namkoong 1976, 1984). El SMPM puede incluso tomar la forma de varios rodales de ensayo independientes y parcialmente avanzados para especies que no están aún intensivamente bajo mejoramiento genético y selección (véase el Capítulo 5 para algunos ejemplos). Para muchas especies que en la actualidad son de valor secundario, éste puede ser un medio más útil de almacenar la variación, p.ej. una serie de ensayos de procedencias puede considerarse una parte de tal sistema de poblaciones establecidas de mejoramiento genético previo.

Se ha demostrado que para que sea factible económica y biológicamente el proseguir con mejórale mejoramiento de un carácter determinado o de un grupo de caracteres, los mejores padres seleccionados, identificados mediante ensayo de progenies (ensayo y selección parental), tienen que aparearse conjuntamente para formar poblaciones recombinantes. Con los planes de cruzamiento controlado, el viverista está creando esencialmente nuevas combinaciones alélicas en la matriz de nuevas progenies a partir de las cuales se continuará la selección. Este método permite al viverista cambiar eficazmente la frecuencia de genes para el carácter de interés. El cambio en las frecuencias de genes para caracteres no seleccionados, o no correlacionados con los caracteres sujetos a selección, estarán regidos por la teoría de muestreo analizada en el Capítulo 3 y Figura 3.1.

4.6.1 Diseños de apareamiento

Hay varias formas mediante las cuales los árboles se pueden aparear entre sí para formar familias para la siguiente generación. El apareamiento completo de todos los cruzamientos posibles

es la situación más deseable, pero generalmente no es práctica y no es económicamente o biológicamente necesaria. El hacer unos pocos cruzamientos en el menor tiempo posible (siempre que cada padre se cruce varias veces, digamos por ejemplo de 2 a 4) tiende a ser un método más rentable.

Los tres métodos principales para aparear especies de árboles forestales vienen dictados normalmente por la biología de la floración de las especies (monoicas, dioicas, edad del árbol, disponibilidad de polen o de flores femeninas y receptividad de éstas, etc.). Estos métodos son:

- **Diseño en nidial:** Se elige un árbol determinado como padre productor de polen y se cruza con dos o más árboles que actúan solamente como hembras y exclusivamente para aquel padre productor de polen. Este diseño se ha utilizado sobre todo en el mejoramiento genético animal.
- **Diseño factorial:** Un árbol sirve exclusivamente como macho o como hembra en algunos pequeños grupos de apareamiento, pero se aparea con más de un macho o hembra que actúa como padre. Ésta es una ventaja que difiere del diseño factorial; por ejemplo, si el viverista elige un grupo de mejoramiento genético de ocho árboles no relacionados y les aparea con un diseño factorial, cuatro padres sólo tienen que dar polen y los otros cuatro sólo tienen que proporcionar piñas femeninas para aislamiento y mejoramiento genético. El número total de cruzamientos en esta situación es por lo tanto de 16.
- **Diseño dialélico:** Los árboles se pueden utilizar como machos o hembras al mismo tiempo; por ejemplo, si un grupo de ocho padres es asignado a un dialelo puede haber hasta 64 cruzamientos como se muestra en la Figura 4.1, que presenta un diseño de apareamiento de este tipo. Sin embargo, esto implicaría progenies de autofecundación y cruzamientos recíprocos que generalmente no se necesitan para la mayoría de los fines prácticos de los programas de mejoramiento genético. Un método de mejoramiento genético dentro de un plan de cruzamiento dialélico, como el de hacer únicamente los cruzamientos *d* en el diseño que se muestra en la Figura 4.1, proporciona todavía al viverista o al mejorador de árboles forestales 16 familias de cruzamiento de hermanos, para seleccionar entre ellos.

		M A C H O							
		1	2	3	4	5	6	7	8
H E M B R A	1	s	d	d	c	c	c	d	d
	2	r	s	d	d	c	c	c	d
	3	r	r	s	d	d	c	c	c
	4	r	r	r	r	d	d	c	c
	5	r	r	r	r	s	d	d	c
	6	r	r	r	r	r	s	d	d
	7	r	r	r	r	r	r	s	d
	8	r	r	r	r	r	r	r	s

s = autocruzamiento;
d = apareamiento de pares dobles (cada padre se cruza cuatro veces);
c = cruzamientos para completar el medio dialélico;
r = cruzamientos recíprocos para el dialelo completo

Figura 4.1 Un diseño hipotético de apareamiento dialélico para ocho árboles seleccionados.

Independientemente del diseño de apareamiento elegido, después de 3 a 5 cruzamientos por árbol, hay una eficacia reducida con respecto a la selección de familias y dentro de las mismas, si se puede plantar un número fijo de árboles en un ensayo (King y Johnson 1993). Por ejemplo, si el viverista seleccionó una población de 50 árboles, dividida la población en series de 10, y aplicado un apareamiento factorial de 5 hembras y 5 machos para cada factorial, habría 25 nuevas familias de plenos hermanos en cada factorial, y un total de 250 nuevas familias a partir de las 50 originales. Aunque éste sería un método óptimo, incluiría una cantidad importante de trabajo y alrededor de dos terceras partes de este número sería adecuado, especialmente si ello permitiese al viverista plantarlas antes. Cómo deben plantarse los árboles es el tema de la siguiente Sección.

4.6.2 Ensayos y selección de la siguiente generación de árboles

Aunque ha habido un debate considerable sobre qué diseños de plantación son los mejores para los ensayos de campo y selecciones de una generación avanzada, el método más eficaz vendrá determinado probablemente por temas locales operativos y prácticos más que por la teoría. Por ejemplo, si se ha establecido un gran bloque homogéneo de una sola familia (por ejemplo, 100 árboles de plenos hermanos en cada bloque, sin réplicas), ello permitirá al viverista una comparación visual mucho mejor de todas las cohortes de tal familia. Con ambientes de ensayo homogéneos, este método puede ser muy eficaz. Por otro lado, los viveristas están normalmente interesados todavía en aplicar la selección a nivel de familia, antes de seleccionar unos pocos árboles individuales dentro de un grupo de las mejores familias. En tales casos, deberían utilizarse los diseños BCA (como se analizó anteriormente), aunque la selección de árboles individuales para la próxima generación es posible aún a partir de una parcela de un solo árbol o diseños BIC. La eficacia de estos ensayos para seleccionar la próxima generación de los mejores árboles procedentes de las mejores familias viene determinada en gran medida por la heredabilidad de los caracteres en selección. Para caracteres con escasa heredabilidad, como el crecimiento, los diseños de parcelas de un solo árbol o pequeñas parcelas serán normalmente más eficaces que las plantaciones en grandes bloques.

4.6.3 Estructura de la población de mejoramiento genético

Como se analizó en el Capítulo 3, muchos de los genes de baja frecuencia, que pueden no tener efectos acusados sobre los caracteres que son actualmente de interés, se perderán por los efectos genéticos del muestreo en pequeñas poblaciones de mejoramiento genético, como los analizados anteriormente. Sin embargo, incluyendo más docenas de individuos, o incluso un centenar, sólo se reducirá ligeramente la posibilidad de estas pérdidas, que son inevitables e ineludibles en la mayoría de los programas de conservación *ex situ*. Afortunadamente, estos genes de baja frecuencia que esperamos perder en poblaciones más pequeñas de mejoramiento genético o desarrollo, no tienen mucho efecto sobre la variación genética para los caracteres en selección. Como se analizó en el Volumen 1, Sección 2.3, deben desarrollarse otros métodos, como los programas de conservación *in situ* y *ex situ* para dar cabida a estos genes. La mayoría de los programas de mejoramiento genético de coníferas en todo el mundo trabajan actualmente con tamaños de población relativamente pequeños en las generaciones F2 y F3 pero mantienen mayores reservas genéticas por medio de alguno de los otros métodos de conservación *in situ* y *ex situ* (véase, por ejemplo Byram *et al.* 1998, Yanchuk 2001a).

Una vez elegido el tamaño de una población, es importante considerar los problemas de parentesco que se crearán con el tiempo en la población de mejoramiento genético, es decir, el intracruzamiento. Esto es generalmente inconveniente, porque tiende a fijar genes recesivos

desfavorables en una población. El intracruzamiento es inevitable en cualquier programa de mejoramiento genético a mediano y largo plazos, y por ello, los viveristas de árboles tienen que diseñar métodos para reducir al mínimo sus efectos acumulados. La subdivisión de la población de mejoramiento genético en grupos que permanezcan separados del intracruzamiento, mencionados a veces como **sublíneas**, es uno de tales métodos. Ello permite al viverista hacer cruzamientos entre árboles seleccionados dentro de las sublíneas, durante generaciones, sin cruzamiento de árboles entre sublíneas. Sin embargo, si un programa es para una especie de menor valor comercial o una que no puede ser mejorada intensivamente por muchas generaciones, el intracruzamiento no debe ser un problema y no será necesario considerar estructuras de población más complejas.

El análisis anterior sobre selección, mejoramiento genético y ensayo, para otra generación de árboles, ya sea para desarrollar recursos genéticos para un mejor uso o para conservar la variación genética disponible para nuevas condiciones, sólo se ha aplicado en muy pocas situaciones porque es muy costoso y requiere un conocimiento técnico importante. No obstante, en algunos casos como en el esfuerzo de “mejoramiento genético de rescate”, en el que puede estar en peligro la existencia continua de una especie, puede ser necesario desarrollar diferentes estrategias de mejoramiento genético. Por ejemplo, el castaño americano (*Castanea dentata*) está reducido a brotes de tocón no reproductivos, en sus anteriores ecosistemas; solamente híbridos recuperados (desarrollados a partir del cruzamiento con unos pocos genotipos de una especie resistente) que pueden mejorarse para volver a segregar un alto porcentaje del genoma del castaño americano, pueden salvar los caudales genéticos locales (véase el Recuadro 4.2). Aunque este procedimiento es conocido más comúnmente en animales en cautiverio, puede hacerse también con los árboles. El mejoramiento genético en estos casos puede incluir la reconstrucción de genomas a partir de retrocruzamientos híbridos, aumentando los antecedentes genéticos puros de variación genética de la especie, mediante el incremento de la representación de los padres híbridos originales.

Recuadro 4.2 **Mejoramiento genético mediante hibridación y retrocruzamiento para restablecer un componente del castaño americano del este de Norte América**

La *Castanea dentata* (castaño americano) fue en otro tiempo una de las especies arbóreas dominantes y más codiciadas de los bosques frondosos del este de Norte América. Sin embargo, alrededor de 1904, una roya, la *Cryphonectria parasitica*, fue introducida en los Estados Unidos procedente de Oriente, probablemente sin ninguna intención a partir de árboles de castaño importados de Asia. La roya, que mató a los árboles al nivel del suelo, se extendió rápidamente por todos los estados orientales de Estados Unidos y en 40 años se destruyeron la mayoría de los árboles de *C. dentata* en los estados orientales, aunque cientos de miles de árboles permanecen como brotes de tocón que raramente alcanzan la fase de floración. Los árboles muertos de castaño que mató la roya comprendían el 50% del valor total de los rodales de maderas frondosas del este.

Los intentos iniciales para obtener genéticamente un castaño resistente a la roya, comenzando mediante la generación de híbridos entre individuos más resistentes de *C. dentata* y parientes de castaño orientales resistentes a la roya, produjeron fenotipos de castaño oriental, bajos y con muchas ramas, que no eran competitivos en los bosques del este (Schlarbaum et

continúa

al. 1994). Sin embargo, una serie de programas están produciendo árboles de *C. dentata* resistentes a la roya con un método de retrocruzamiento que transferirá al castaño americano la resistencia a la roya del castaño chino, aunque reteniendo el conveniente crecimiento, la forma y la adaptabilidad del castaño americano (Burnham 1990). Una progenie fuertemente resistente a la roya se recuperó después del intercruzamiento de los primeros híbridos entre el castaño chino y el americano y aunque se cuenta con que el proyecto completo de mejoramiento genético tarde decenas de años, se confía en que dentro de 5 años pueda haber algunas líneas de árboles fuertemente resistentes a la roya que son como promedio 15/16 del castaño americano y 1/16 del castaño chino. Se necesitará un período más largo de tiempo, de 30 a 50 años, para evitar el intracruzamiento, mediante la transferencia de la resistencia a la roya de varios árboles diferentes de castaño chino hasta un total de 100 líneas como mínimo de castaño americano. Además, actualmente se considera factible el uso de técnicas moleculares para acelerar el proceso de mejoramiento genético. Se podría utilizar un mapa genético del castaño, con las regiones asociadas a la resistencia identificada a la roya, para investigar las nueces germinadas recientemente, en cuanto a su resistencia a la roya. Esto puede permitir evitar varias generaciones de retrocruzamiento, pero produciendo sin embargo árboles que tienen proporciones de parentesco americano similares a los de los árboles producidos utilizando el retrocruzamiento convencional.



Castaño americano nativo en estado silvestre, árbol superviviente que se ha librado de la enfermedad de la roya del castaño.
(Paul Sisco/ACF)

Resumido por A. Yanchuk, de Burnham (1990) y la Fundación Americana del Castaño (www.acf.org)

4.7 Caracteres de interés y costos de evaluación

Independientemente de los caracteres que pueda ser conveniente seleccionar y por último mejorar, el forestal o viverista debe ser capaz de evaluarlos económicamente. Los caracteres que son costosos de medir, como las propiedades de la madera, las características de la resina o algunos tipos de resistencia a enfermedades y plagas, pueden hacer que un programa sea relativamente ineficaz, si los costos son elevados y pueden hacer financieramente difícil el medir suficientes individuos de suficientes familias, en un ensayo de progenies, para aplicar realmente una intensidad adecuada de selección. Aunque ciertos caracteres, como el potencial de crecimiento son de baja heredabilidad, se han obtenido normalmente grandes beneficios porque se pueden evaluar muchos árboles, incrementando con ello la intensidad de selección. Se han estudiado caracteres relativos a las propiedades de la madera (como la densidad de la madera; véase Zobel y van Buijtenen 1989) y se ha demostrado que tienen una heredabilidad mayor que la tasa de crecimiento, normalmente el doble. No obstante, también tiende a ser inferior la variación fenotípica, encima de los costos adicionales de medición de la mayoría de los caracteres relativos a las propiedades de la madera, de modo que los intercambios en cuanto a beneficios deben equilibrarse

siempre mediante estos tres factores (esto es, heredabilidad, variación fenotípica y costo de la evaluación) porque pueden afectar al número de árboles evaluados y a la intensidad subsiguiente de selección que puede aplicarse.

Además, puede haber relaciones genéticas entre dos caracteres de interés. Muchos otros caracteres son también importantes en la selección, mejoramiento genético y conservación, como la resistencia a plagas y enfermedades, la forma de los árboles (que afecta a la calidad de las trozas) y muchas otras propiedades de la madera o características de fructificación. Con independencia de que se estén seleccionando directamente por razones económicas o no, los viveristas han investigado estos caracteres para establecer las relaciones genéticas y fenotípicas que podrían afectar a la selección respecto a otros caracteres “primarios” (normalmente el crecimiento). Por ejemplo, en muchos programas de mejoramiento genético de coníferas, es bien conocido que existe una fuerte relación genética negativa entre el crecimiento en diámetro y la densidad de la madera (Zobel y van Buijtenen 1989), y por tanto, los beneficios genéticos en potencial de crecimiento se reducirán si la densidad de la madera no se reduce también.

4.8 La biotecnología y su papel en la mejoramiento genético

Como se mencionó al principio de este capítulo, se han producido avances técnicos importantes en la fitogenética, no sólo en las tecnologías de clonación para muchas especies de árboles forestales, sino también en el cambio de la fitogenética utilizando tecnologías transgénicas. Sin embargo, también es bien conocido que hay que disponer primero de unos buenos programas silvícolas y de mejoramiento genético antes de que tengan algún potencial para incorporar un valor adicional (Yanchuk 2001b). Las herramientas biotecnológicas pueden contribuir, sin embargo, a la gestión de colecciones *ex situ* (como los bancos clonales y otros bancos de germoplasma), proporcionando mejores herramientas para evaluar los niveles de diversidad genética de las especies arbóreas o almacenar el germoplasma.

La nueva tecnología de los marcadores moleculares, como se ha visto en el Recuadro 3.3, puede ser útil en estudios de diversidad genética que pueden soportar el diseño de estrategias de muestreo para colecciones *ex situ*, que también pueden reducir la redundancia y duplicación dentro de las colecciones. Los marcadores se pueden utilizar también en la identificación molecular de la huella genética para fines de identificación clonal y tienen el potencial para utilizarlos a fin de revelar el origen de la madera y frustrar las prácticas de aprovechamientos madereros ilegales (White *et al.* 2000). Otra herramienta biotecnológica muy utilizada, la crioconservación que ayuda a las posibilidades de almacenamiento a largo plazo de accesiones de plantas, cuando es un problema el almacenamiento tradicional de la semilla (véase por ejemplo Krishnapillay 2000). La nueva era de la genómica está desarrollando muchas herramientas moleculares que pueden ayudar a la identificación de genes potencialmente útiles en las accesiones de bancos de germoplasma y la incorporación de estos genes en los programas de mejoramiento genético. El ejemplo del retrocruzamiento de genes resistentes en el castaño americano, analizado en el Recuadro 4.2, es otro caso. La selección para resistencia podría aumentarse mediante la selección de progenies con marcadores asociada a los genes de resistencia del castaño chino (Kubisiak *et al.* 1997), o, por el contrario, seleccionando árboles resistentes con más genes del tipo del castaño americano. Aunque la selección asistida con marcadores se está haciendo más común en la mejora fitogenética, por ejemplo en las habas de soja (Arahana *et al.* 2001) y en muchas otras plantas de cultivo, su uso en los programas de mejoramiento de árboles ha sido limitado hasta ahora debido a los costos, la cantidad de tiempo necesario para que los árboles alcancen la madurez de la edad de evaluación y la dificultad de localizar el número

relativamente grande de genes que afectan a muchos caracteres de interés (Johnson *et al.* 2000). No obstante, la información que se está generando a partir de la genética molecular o la investigación genómica está descubriendo muchos aspectos interesantes de la evolución y función de los genes y continuará proporcionando herramientas e información útiles para los viveristas de árboles, a medida que se comprendan mejor los genomas.

4.9 Conclusiones

Las técnicas de mejoramiento genético de árboles, como los métodos modernos de selección, mejoramiento genético y ensayos, son naturalmente importantes para conseguir mejorar los caracteres económicos y ecológicos de interés de una especie arbórea forestal. Los importantes avances técnicos en el mejoramiento genético de árboles, que se han desarrollado en los últimos años, pueden girar sobre todo alrededor de diseños eficientes de los ensayos de campo, diseños eficientes de apareamiento para el mejoramiento genético de una generación avanzada y muchas técnicas y herramientas especializadas para evaluar los caracteres de interés económico o ecológico. Sin embargo, lo que tiene la máxima importancia es que los programas de selección, mejoramiento genético y ensayos, consideren los métodos más sencillos y eficaces que pueda manejar una organización interesada en marcos de tiempo realistas y en cumplir los objetivos de conservación o mejoramiento genético. En muchas situaciones, una sola generación de selección y ensayo puede cumplir la mayoría de los objetivos, y los programas pueden avanzar hacia las próximas especies más importantes.

Con los muchos tipos de especies y muchos problemas a resolver, no todas las técnicas de manejo genético pueden aplicarse a todas las especies, con los mismos objetivos. Éstos pueden variar desde salvar a las más amenazadas, a evitar la mayor parte de las pérdidas y a conseguir el máximo beneficio económico; cada uno de estos objetivos requerirá lógicamente diferentes técnicas y niveles de inversión. Además, el valor de caracteres específicos y los desafíos ambientales pueden cambiar en un período de tiempo relativamente corto, con respecto al período de generación de la mayoría de los árboles, por lo que pueden requerirse nuevos criterios de selección en cada generación. Como se mencionó en el Volumen 1 (Capítulos 5 y 6), es probable que sean necesarios programas internacionales o interagencias para especies prioritarias para programas más avanzados de selección, ensayos y mejoramiento genético, si deben avanzar más allá de los ensayos más sencillos de especies y procedencias. Sin embargo, es probable también que sea fundamental la participación de la población local, para identificar caracteres que les interesen, obteniendo cualquier éxito a largo plazo. Esto ha demostrado ser, en gran parte una realidad, incluso en países desarrollados.

ESTABLECIMIENTO Y MANEJO DE RODALES DE CONSERVACIÓN *EX SITU*



por Ida Theilade, Alvin Yanchuk y Søren Hald

5.1 Introducción

Tal como se ha analizado a través de estos tres volúmenes, las áreas protegidas existentes hacen contribuciones importantes a la conservación forestal, protegen muchos valores del bosque y representan logros muy considerables en favor de la conservación de los recursos genéticos forestales. Sin embargo, es evidente también que las áreas protegidas existentes no son, de por sí, suficientes para lograr o mantener todas las metas de la conservación de recursos genéticos forestales. Muchas no representan poblaciones importantes, son de tamaño inadecuado, están demasiado desconectadas de su ambiente circundante y no están adecuadamente protegidas de las presiones que comprometen su valor de conservación (Kanowski 2001). El Centro Mundial de Conservación y Vigilancia estima que más de 8.000 especies arbóreas están en peligro (WCMC 2001). Sólo alrededor del 12% de ellas están registradas en áreas protegidas y sólo el 8% se sabe que están en cultivo (UICN 1999). Por ello, millares de especies arbóreas dependerán de la conservación fuera de las áreas protegidas: en bosques con algún tipo de manejo, zonas agrícolas, o *ex situ* en jardines botánicos, arboretos, bancos semilleros o bancos de germoplasma en campo. Este capítulo presenta experiencias con la conservación *ex situ* de árboles tropicales en rodales vivos (bancos de germoplasma de campo) y analiza algunas de las oportunidades e inconvenientes respectivos.

5.2 Finalidad de los rodales de conservación *ex situ*

La finalidad de los rodales de conservación *ex situ* es mantener los recursos genéticos en un área segura para su utilización futura. Sin embargo, la conservación *ex situ* raramente se encuentra en esta forma pura. Algunos jardines botánicos y arboretos tienen colecciones de especies amenazadas, pero estas colecciones con frecuencia consisten sólo en muy pocos individuos. En silvicultura, los rodales de conservación *ex situ* constan a menudo de un número mayor de individuos pero el objetivo a largo plazo está con mucha frecuencia, si no siempre, combinado con una finalidad inmediata y mucho más utilitaria.

Los seres humanos siempre han tomado o trasladado con ellos material vegetal valioso cuando han emigrado a nuevas regiones. El período colonial entre 1850 y 1950 fue una era de exploración botánica sin precedentes y de introducciones de plantas exóticas por todo el mundo. Durante las épocas coloniales, se establecieron numerosas poblaciones *ex situ* de árboles tropicales para ensayar especies promisorias, exóticas o indígenas. Las primeras plantaciones del árbol del caucho (*Hevea brasiliensis*) en Singapur, y la teca (*Tectona grandis*) y la *Chinchona* en la India, eran todas ellas plantaciones *ex situ*, pero establecidas en una época en que de hecho nadie conocía mucho sobre la genética de la conservación, ni siquiera se preocupaba del tema. Esto contrasta con la situación actual, en la que los bosques naturales están disminuyendo y con frecuencia se pone en duda si un determinado rodal natural existirá dentro de una década o dos. Consecuentemente, la mayoría de las plantaciones de árboles *ex situ*, en especial los árboles tropicales, podría decirse que están

funcionando como “rodales de conservación de recursos genéticos” o también “bancos de germoplasma en campo”. Se calcula que sólo alrededor de 100 especies arbóreas están conservadas *ex situ* adecuadamente. Éstas son casi exclusivamente especies cuyos recursos genéticos se han reunido para programas de domesticación, con los cuales están asociadas casi todas las actividades sustantivas de conservación *ex situ* de recursos genéticos forestales (NRC 1991). La finalidad o finalidades de un determinado rodal de conservación *ex situ* es naturalmente de suma importancia para las decisiones relacionadas con el manejo silvícola del rodal, que de nuevo determinará cuántos y qué alelos se conservan y cuáles pueden perderse, con intención o sin ella.

5.3 Materiales y métodos para el establecimiento de rodales de conservación *ex situ*

Cualquier material producido vegetativamente, o plantas cultivadas a partir de semillas, se pueden establecer en rodales vivos. La idea es que cuando se establecen en una situación segura, experimentan un nuevo ambiente aunque manteniendo frecuencias de genes próximas a las frecuencias originales en las poblaciones originales. Los rodales de conservación tienen que ser suficientemente extensos para que (1) mantengan la integridad genética de la población original y (2) generen un número suficientemente grande de piñas o flores con semilla, una nube suficiente de polen, poblaciones de insectos, etc. para cruzamiento lejano, a fin de que puedan mantener adecuadamente el tamaño de la población en una cosecha de semilla.

5.3.1 Planificación de rodales de conservación *ex situ*

Selección del sitio

Dos cosas hay que considerar al planificar los rodales de conservación: (a) el área debe ser en general adecuada respecto al clima, la meteorología y las condiciones del suelo, y (b) debe ser capaz de producir en algún momento cosechas de semilla para la reproducción de la siguiente generación. Ambos factores contribuirán a un buen crecimiento y una buena floración, pero ello no siempre es posible y de hecho, probablemente es raro, poder asegurar ambos. En relación con los objetivos de conservación de los rodales para conservación *ex situ*, es probablemente mejor equivocarse del lado de una buena adaptación y crecimiento en general y suponer que en algún momento se producirá cierta reproducción por semilla. Los tratamientos para estimular la floración pueden aplicarse en situaciones en que los árboles están sanos pero no están dando muchas flores.

Las técnicas de adaptación del sitio pueden variar, desde simples suposiciones basadas en una semejanza ecológica amplia, hasta comparaciones muy complicadas de condiciones y modelos climáticos similares. Sin embargo, no siempre es posible pronosticar cómo se comportará una especie exótica en una nueva zona o cómo se comportarán las poblaciones en nuevos ambientes, sin una información previa de ensayos de procedencias. Evidentemente, es importante tener en cuenta las coincidencias climáticas, por ejemplo las máximas y mínimas de invierno y verano, los niveles y modelos de precipitación a lo largo del año, los días de crecimiento vegetativo y las características edáficas generales, por mencionar algunas de ellas. Como el primer objetivo es un buen desarrollo no contando con un conocimiento previo, generalmente conviene establecer los rodales *ex situ* en zonas climáticas similares a las de su origen. Como no siempre se puede confiar en obtener cantidades comerciales de semilla procedentes de los bloques de conservación, (véase la Sección 5.5.3), los árboles candidatos del bloque de conservación podrían injertarse en un

huerto especial y manejarse para la producción de semilla (en un buen sitio de floración). Estas semillas podrían utilizarse entonces para regenerar el bloque de conservación. El tiempo y costo de tal operación sólo serían factibles en situaciones raras, pero no obstante es una posible opción.

Aislamiento para reducir al mínimo la contaminación

Es necesario considerar un aislamiento adecuado de las fuentes de contaminación de polen porque el flujo de genes dentro del rodal reducirá seriamente su valor de conservación. La zona de amortiguación necesaria para eliminar la contaminación depende del modelo de polinización de la especie. Hasta ahora la mayoría de las experiencias corresponden a especies anemófilas, particularmente las especies de pino. Para éstos, un rodal de 10 a 20 ha. es probable que genere una nube adecuada de polen dentro del rodal para una polinización cruzada eficaz. Sin embargo, el nivel de flujo del polen dentro del rodal de conservación puede tener un efecto importante en la integridad genética de las semillas, si el bloque está demasiado próximo a otras especies relacionadas o a poblaciones diferentes (véase la Sección 5.5.2). La FAO (1992) recomendó una distancia mínima de amortiguación de 330 m. desde las poblaciones con potencial para cruzarse con el bloque de conservación. Estas distancias de aislamiento pueden tener que ser mayores o menores, dependiendo del tamaño final de los bloques de conservación y de las características de la floración y del vuelo del polen de la especie. Sin embargo, por la experiencia, una distancia de 330 m. puede ser adecuada para aislar la mayoría de los rodales de los efectos importantes del flujo de genes dentro del rodal.

Tamaño del rodal

En una primera etapa el programador de conservación tendrá que considerar qué dimensiones deben tener los rodales de conservación para poder cumplir los objetivos de conservación. La estrategia de muestreo aplicada (véase el Capítulo 3) es un factor importante a considerar cuando se determina el tamaño de los rodales. Además, cada familia (es decir cada árbol madre muestreado) debe estar representada por un número aproximadamente igual de progenies en el rodal de conservación. Como en el rodal se producirá un aclareo natural o artificial, también habrá que tener en cuenta el nivel de mortalidad esperado o el grado de aclareo. En efecto, esto requiere más programación antes de establecer el rodal, ya que es el número final de troncos a la edad de rotación o próximo a ella lo que tiene importancia y no el número inicial plantado. Se supone en este caso que en algún momento se recogerán las semillas o las muestras vegetativas, se aprovecharía el rodal y se volvería a plantar para mantener la constitución genética de la población original. Por ejemplo, si el programador de conservación pretende contar con 1.000 árboles en la edad de rotación y las existencias esperadas son de 150 árboles por hectárea, el tamaño mínimo del rodal será de 6,7 ha.

En general, el oficial de conservación también tiene que considerar algunos factores adicionales que podrían afectar a las posibilidades de rotación de existencias de una generación. Uno de los temas clave, relacionado con los antes mencionados es cómo mantener el tamaño efectivo de la población del rodal; en otras palabras, cómo podría reducirse con el tiempo la variación genética en el bloque de conservación debido a la deriva genética (es decir los efectos de los pequeños tamaños del muestreo). Aunque se podría cosechar la semilla progresivamente a partir de menos árboles, en cada generación, es probable que los tamaños efectivos de población sigan siendo similares, tras unas pocas generaciones, si se han realizado las polinizaciones y las recolecciones de semilla de forma adecuada. Guldager (1975) estima que en la mayoría de los casos la deriva genética y el intracruzamiento tendrán poca importancia en rodales bien manejados de 10 a 30 ha. Aunque es probable que estos tipos de poblaciones no puedan mantener, con el tiempo, las frecuencias exactas de genes que podrían mantenerse *in situ*, es importante recordar que

conservarían unos altos niveles de variación genética adaptativa; tanto *in situ* como *ex situ*, son archivos vivos y ambos experimentan con el tiempo acontecimientos evolutivos en los diferentes ambientes.

Además de estas consideraciones genéticas, los tamaños de los rodales deben mantenerse en un nivel manejable de tal modo que la carga del establecimiento y futuro manejo estén dentro de la capacidad de la institución encargada. Para el establecimiento de rodales de conservación *ex situ* dentro del proyecto PNUMA/FAO sobre conservación de recursos genéticos forestales, se recomendó un tamaño mínimo de rodal de 10 ha. (FAO 1985). Las especies elegidas bajo este proyecto incluyeron *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp. En 1998 los participantes en el taller "Conserve" celebrado en Canberra, Australia, recomendaron un tamaño mínimo de población de 2.000 individuos ó 20 ha. para rodales *ex situ* de pino Monterey (*radiata*) (Matheson *et al.* 1999). De nuevo, aunque el tamaño de los diversos rodales de conservación *ex situ* ha sido bastante variable, es importante recordar que un tamaño mínimo, incluso de unas pocas hectáreas, puede ser eficaz siempre que esté combinado con un cierto manejo a cargo de una institución apropiada.

Acceso al terreno

El aislamiento y la equiparación de la estación con las fuentes de semilla representan un desafío para la silvicultura, el manejo y el establecimiento con éxito de los rodales de conservación *ex situ*. La conservación de múltiples poblaciones (es decir, varios rodales *ex situ*) requiere considerar varias áreas separadas. Esto puede presentar problemas respecto al acceso, mantenimiento, protección y seguridad y, no menos importante, en cuanto al costo. No obstante, probablemente se producirán pérdidas debido a muchas circunstancias imprevistas, por lo que son importantes las replicaciones de los rodales *ex situ*, y en este punto, los proyectos de colaboración que traspasan límites provinciales o de países pueden ser de máximo beneficio. Es necesario evaluar las capacidades de protección, dentro de la organización, respecto a la gestión diaria de caminos, cerramientos, aclareos y seguridad, durante un período bastante prolongado de tiempo.

También es importante considerar la tenencia de la tierra y cualquier clase de derechos sobre la tierra a fin de evitar cualquier conflicto futuro con temas de propiedad.

Composición por especies

- **Rodales puros:** hasta ahora casi toda la experiencia en el establecimiento de rodales de conservación *ex situ* ha sido con monocultivos de especies de plantación relativamente bien conocidas. Para estas especies, muchas de las cuales son pioneras, el establecimiento de monocultivos basados en una tecnología de plantaciones bien conocida, representa probablemente el método más eficaz de conservación *ex situ*.
- **Rodales de composición mixta:** muchas especies climáticas tropicales se consideran valiosas y están bajo algún tipo de amenaza. Sólo algunas de estas especies se están plantando actualmente, disponiéndose de poca información sobre la mayoría de ellas en cuanto a su manejo. El establecimiento de monocultivos de estas especies puede resultar difícil o imposible y, en este caso, el establecimiento de rodales de composición mixta que imiten las condiciones naturales puede ser la mejor opción. Los rodales de múltiples especies tendrían el objetivo de conservar las principales especies de interés y quizás otras, que son parte de las asociaciones ecológicas normales (como las especies climáticas). Otra solución podría ser utilizar especies sin valor o interés actual de conservación, a fin de prestar un servicio ecológico a las especies principales (plantas fijadoras de nitrógeno, por ejemplo) o proporcionar a la comunidad local algunos beneficios económicos por mantener el área tal como está. Sistemas como éstos deben tener cualidades significativas,

como en el caso de que la regeneración natural dependa de una medida de ahorro de costos. Cuando estas áreas se vayan ordenando para más finalidades de las consideradas normalmente en la conservación *in situ*, más métodos de manejo de los descritos en el Volumen 2, resultarán apropiados. En cualquier caso, habrá que considerar, o menos individuos de las especies principales, o mayores superficies, como parte de una cierta compensación. A causa de la falta de información sobre el manejo silvícola de las especies, estos rodales de conservación *ex situ* serán con frecuencia muy experimentales, lo que aumenta lógicamente los riesgos de fracaso.

- **Plantación de cultivos nodriza:** otra alternativa al establecimiento de monocultivos es el uso de los cultivos nodriza. Éstos son especies de árboles pioneros de rápido crecimiento que se establecen con un espaciamiento mayor con la especie elegida a fin de proporcionar rápidamente la protección necesaria y el microclima necesario para que sobreviva la especie elegida. Para muchas especies de las últimas etapas sucesionales, se han encontrado problemas en el establecimiento de brinzales en terreno abierto, pudiendo ser necesario el uso de cultivos nodriza para conservar con éxito especies sensibles *ex situ*. Los cultivos nodriza se pueden eliminar gradualmente, a medida que se vayan estableciendo las especies elegidas y comiencen a dominar la cubierta de copas. Existen buenos ejemplos de Sinharaja, Sri Lanka donde se ha utilizado con éxito el *Pinus caribaea* como especie nodriza, facilitando el establecimiento de especies arbóreas tropicales sensibles que son de las últimas etapas sucesionales (Ashton *et al.* 1997). Como alternativa a la plantación simultánea de cultivos nodriza, las especies sensibles a la estación pueden plantarse por debajo de la cubierta de copas de las plantaciones o rodales existentes. En conclusión, los cultivos nodriza deben emplearse de acuerdo con la experiencia local y basarse en el conocimiento de las características de las especies elegidas.

Propiedad del material genético en poblaciones ex situ

La propiedad de los rodales será clara probablemente en países que han recogido material genético procedente de poblaciones nativas y han establecido rodales de conservación *ex situ* dentro de su país. Sin embargo, cuando el germoplasma para conservación se ha recogido o establecido fuera de un país, los problemas de acceso, uso y quizás, propiedad de genotipos importantes, identificados posteriormente, podrían ser complicados. Como sucede con los intercambios de mucho material genético, vegetal y animal, es necesario desarrollar acuerdos entre los países cooperantes. El uso de los denominados Acuerdos de Transferencia de Materiales (ATM) entre donantes y receptores de material genético, se está haciendo cada vez más corriente. Baron y Siebeck (1994) describen en detalle los aspectos relacionados con la formulación de ATM. La importancia de los ATM y la facilidad de acceso y la participación en los beneficios de los recursos genéticos forestales, se reiteró en el Volumen 1, Capítulo 6, tal como está en la actualidad incorporado formalmente en las Directrices de Bonn sobre Acceso a los Recursos Genéticos y Participación Justa y Equitativa en los Beneficios Resultantes de su Utilización, tal como se aprobó por la Conferencia de las Partes en su sexta reunión del CDB (CDB 2001). El Tratado Internacional sobre Recursos Fitogenéticos para la Agricultura y la Alimentación aprobado por la Conferencia de la FAO a finales de 2001, entró en vigor en 2004. Los objetivos del tratado se refieren a “la conservación y uso sostenible de los recursos fitogenéticos para la agricultura y la alimentación y la justa y equitativa participación en los beneficios derivados de su uso, en armonía con el Convenio sobre Diversidad Biológica, para una agricultura sostenible y la seguridad alimentaria”. El tratado establece un Sistema Multilateral de Acceso y Participación en los Beneficios, aplicados a una lista de cultivos agrícolas. El centro de atención ha sido facilitar el acceso a los recursos fitogenéticos, porque, tal como reconoce el Tratado, el propio acceso es un asunto importante. Las provisiones referentes al acceso y

participación en los beneficios se contendrán en un ATM estándar que se está discutiendo y elaborando actualmente. Un género forestal, *Prosopis*, está incluido, así como varias especies leñosas como *Artocarpus*, *Citrus*, *Cocos* y *Malus*.

5.4 Establecimiento de rodales *ex situ*

Naturalmente, el objetivo principal de las actividades de plantación de árboles es el establecimiento de un rodal sano, vigoroso y bien poblado. Esto es especialmente aplicable al establecimiento de rodales de conservación *ex situ*, ya que el material plantado tiene que representar el mismo caudal genético que el de la población original de la que fue obtenido. Consecuentemente, deben adoptarse las mejores prácticas demostradas localmente en el cultivo de los brinzales para estos rodales (FAO 1992). Con frecuencia será aconsejable adoptar métodos que son más meticulosos y por ello más costosos que los sistemas rutinarios normales.

5.4.1 Técnicas de vivero

En general, los procedimientos de vivero deben seguir los mejores sistemas comprobados localmente; sin embargo, hay algunos aspectos que deben cuidarse especialmente cuando se trata de material para conservación *ex situ*. Durante todo el sistema del vivero, los lotes de semilla tienen que ser etiquetados cuidadosamente a fin de evitar cualquier posibilidad de confusión o error en la identificación de genotipos o poblaciones. En la mayoría de los casos, la semilla procedente de una determinada fuente se enviará y tratará a granel por razones prácticas y como un solo lote de semillas. El mantener la identidad de la descendencia de un solo árbol puede, sin embargo, ser beneficioso en los siguientes casos:

- Cuando el rodal de conservación va a constituir la base inmediata de un programa de mejoramiento genético de árboles (véase Capítulo 4).
- En el caso de que el comportamiento de la semilla sea problemático, en el sentido de que el tratamiento previo pueda afectar la germinación y la supervivencia de forma diferente para cada uno de los genotipos. Es probable que se produzca una selección involuntaria como resultado de los diversos métodos de manipulación de las semillas (El-Kassaby 2000). Siguiendo por separado la descendencia de un solo árbol, el gestor de conservación puede asegurar que todos los árboles madre están igualmente representados en el material a conservar *ex situ*. La cuestión de mantener la identidad de la descendencia de un solo árbol, después del establecimiento del rodal, se trata en la Sección 5.4.5.
- Las plantas de vivero deben rechazarse si están muertas, o claramente enfermas o si muestran algún trastorno morfológico (híbridos, albinos, mutantes), pero no por retrasarse la germinación o ser más lento que el crecimiento



El Organismo de Semillas de Árboles de Tanzania realiza un trabajo pionero con especies indígenas mientras los árboles populares atraen a los clientes al vivero e incrementan el conocimiento público.

(Ida Theilade/FLD)

medio, porque las diferencias en estos caracteres pueden representar una variación genética que debe mantenerse en el rodal establecido ex situ. Por ello, se debe evitar la práctica de clasificar las existencias del vivero y plantar solamente las clases de mayor tamaño.

5.4.2 Preparación del sitio

En general, la preparación del sitio mediante un cultivo completo es la mejor forma de asegurar una alta supervivencia, especialmente en climas con bajas precipitaciones y una larga estación seca. Sin embargo, hay que tener en cuenta siempre y con todo cuidado el riesgo de erosión y, en consecuencia, los rodales se deben establecer siempre que sea posible, en laderas suaves. Las técnicas y métodos de preparación del sitio, como ya se mencionó, deben basarse en los mejores conocimientos disponibles sobre cómo establecer una especie determinada en un medio de plantación y normalmente las cuestiones de preparación del sitio son parte integrante de los conocimientos selvícolas.



El Organismo de Semillas de Árboles de Tanzania ha establecido parcelas ex situ de árboles indígenas. Un rodal joven de baobab, especie valorada que raramente la población local. (Ida Theilade/FLD)

5.4.3 Trazado

El diseño de cada uno de los rodales no debe seguir ningún trazado “estándar” sino ajustarse simplemente a las características de las especies y a las condiciones locales. Algunas consideraciones y recomendaciones de carácter general que pueden servir de base de decisión para el gestor de conservación incluyen lo siguiente:

- El espaciamiento elegido debe ante todo ajustarse para permitir el cultivo, la limpieza y el aclareo a mano o con posibles métodos mecánicos (FAO 1992). De nuevo, el número de individuos plantados debe ser suficiente para asegurar un rodal maduro con espesura completa, incluso con cierto nivel de muerte regresiva y mortalidad debida a la competencia.
- En circunstancias especiales, cuando parezca poco probable disponer de recursos para futuros aclareos, puede considerarse un mayor espaciamiento. Esto podría traducirse en definitiva en un rodal maduro incompleto, pero serían menores las exigencias para un manejo lógico y oportuno y quizás podrían aumentarse, paradójicamente, las oportunidades para un rodal maduro bien logrado.
- La forma de la parcela dependerá de la topografía y de la dirección de los vientos dominantes. Además de ello, generalmente, para asegurar una polinización adecuada dentro de los rodales, el diámetro menor no debe ser inferior a 150 m. (FAO 1992), pero las parcelas cuadradas constituyen el trazado más conveniente.

5.4.4 Demarcación

La demarcación permanente y eficaz de los rodales es una condición previa para una conservación exitosa. Aunque esta observación puede parecer innecesaria, existen ejemplos de rodales de conservación que se abandonan como resultado de una demarcación insuficiente. Por ejemplo, de 135 rodales de conservación *ex situ*, evaluados 20 años después de su establecimiento, el 13% tenía una demarcación insuficiente lo que significó que su valor de conservación o se había perdido por completo o se había reducido notablemente (Theilade *et al.* 2001). La demarcación permanente o los puntos de referencia, se pueden obtener utilizando caminos forestales o cortafuegos anchos como límites de los rodales. Otra solución puede ser con postes de hormigón, metal o madera que sirvan como señales, debiendo considerarse como el método de demarcación más digno de confianza. Se debe realizar una inspección regular de la demarcación y asegurarse de que los mapas son correctos y están actualizados. Siempre que sea posible, la demarcación física en el campo se debe complementar mediante las coordenadas del sistema de posicionamiento global (GPS).

5.4.5 Identidad de la descendencia de un solo árbol

Como se mencionó anteriormente, puede ser beneficioso seguir el rastro de la descendencia de un solo árbol a través del vivero y, en algunos casos, incluso durante toda la vida de los rodales. Cuando las actividades de mejora de los árboles tienen que basarse en las poblaciones conservadas, será muy útil la información sobre el comportamiento de las diferentes familias. En casos en que exista una fuerte interacción genotipo x ambiente, el aclareo del rodal puede ocasionar accidentalmente la reducción de la base genética. Manteniendo el rastro de la descendencia de un solo árbol, el oficial de conservación puede asegurar que no se pierden familias enteras a través del proceso de aclareo (Guldager 1975). Hay que destacar que este tipo de control sólo es factible con un número limitado de árboles madre y que ello requiere la representación cartográfica de cada árbol individual en el rodal. No obstante, la conservación *ex situ* sin información sobre la descendencia de un solo árbol, sigue siendo muy eficaz y cumple la mayoría de nuestros objetivos. Considerando la cantidad de tiempo y recursos que representa este tipo de control y documentación, el mantener el rastro de la descendencia de un solo árbol se debe considerar únicamente cuando hay una clara indicación de que la información lograda con este esfuerzo será de gran valor.

5.4.6 Manejo inicial

Limpieza

Las condiciones locales impondrán la necesidad de extraer la vegetación competitiva durante toda la vida del rodal. La eliminación completa de las malas hierbas en las primeras etapas es muy recomendable para optimizar el crecimiento y supervivencia de las especies elegidas, durante la fase de establecimiento, e incluso más importante aún, como precaución contra el daño por incendios (FAO 1992). La limpieza cesa cuando se cierra la cubierta de copas, pero después puede ser necesario el corte ocasional de trepadoras.

Sustitución de plantas muertas o fallos

En situaciones en que se ha producido una mortalidad importante después de uno o dos años de la plantación, deberá analizarse si es necesaria una plantación complementaria. No

hay un porcentaje límite que determine si debe iniciarse la plantación complementaria. En cada caso concreto el programador de conservación tendrá que considerar si los árboles plantados como complemento van a ser capaces de ponerse al nivel del resto del rodal y contribuir a su estructura final. No obstante, en la mayoría de los casos no es recomendable, porque los árboles más jóvenes quedarán probablemente bastante atrasados y no contribuirán mucho al rodal final.

5.4.7 Manejo del fuego

Una protección adecuada contra los incendios es fundamental para el éxito de la conservación *ex situ*. Durante la evaluación de 135 rodales *ex situ* de pinos tropicales, establecidos a finales de la década de 1970 y principios de la de 1980 (véase la Sección 5.5.2), el fuego se identificó como la principal amenaza para la supervivencia de los rodales. En total se habían perdido 20 rodales y en 14 de ellos se registró que el fuego fue el factor clave.

Alrededor de los rodales se deben limpiar unos cortafuegos apropiados. Durante la estación seca o cuando existe riesgo de incendios los cortafuegos deben mantenerse libres de vegetación. Para algunas especies y después de cierta edad, pueden ser convenientes los fuegos controlados. Sin embargo, es necesario tener un gran cuidado porque este método requiere personal altamente calificado y la existencia de una sólida experiencia local.

5.4.8 Protección

En las primeras etapas se deben vigilar cuidadosamente los rodales para detectar cualquier ataque de insectos o enfermedades. Si se identifica un ataque que pueda amenazar la supervivencia del rodal, deben iniciarse medidas de protección siguiendo el mejor método comprobado localmente. Por otro lado, el comienzo de problemas importantes de plagas debe considerarse como una valiosa información respecto a la conveniencia de la especie en cuestión para la conservación o utilización en aquellas áreas o ambientes.

Dependiendo de la especie y del ambiente en que se planta, la protección contra la fauna silvestre y el ganado doméstico puede ser crítica en las etapas iniciales. En general, el cerramiento con el mantenimiento regular subsiguiente de la cerca y la vigilancia del rodal es la medida más eficaz contra los animales que ejercen el ramoneo. No obstante, esto incrementa sustancialmente los costos potenciales de establecimiento y mantenimiento, por lo que debe dedicarse una cuidadosa atención al daño potencial que podrían producir los animales.

5.4.9 Manejo

Aclareo

El aclareo oportuno es especialmente importante para los rodales de conservación *ex situ*, porque el potencial reproductivo de la especie puede depender del mismo. El objetivo del aclareo es mantener árboles sanos con buen desarrollo de copa para asegurar una floración y fructificación suficientes y al mismo tiempo mantener un tamaño adecuado de población a fin de conservar un alto nivel de diversidad genética en el rodal.

Para monocultivos o plantaciones de una sola especie el aclareo debe basarse en general en la altura dominante; esto significa que el aclareo debe realizarse antes en los

sitios mejores que en los más pobres. Por ejemplo, para pinos tropicales establecidos con un espaciamiento de 3 x 3 m. se recomienda que los árboles dominantes tengan alrededor de 8 m. de altura, antes de realizar la clara. En sitios tropicales más secos es aconsejable realizar la primera clara 2 años después del cierre de la cubierta de copas, a fin de asegurar una supresión completa de malezas y hierbas. Una directriz de carácter general y muy importante es que los rodales deben vigilarse regularmente (cada año) para evaluar el estado del rodal en términos de aclareo y desarrollo de las copas y, consecuentemente asegurarse de que las operaciones de aclareo se inician de acuerdo con ello.

Régimen de aclareo

El aclareo puede ser sistemático o selectivo. En rodales de producción de semilla y en plantaciones comerciales, el aclareo será normalmente selectivo a fin de favorecer a los individuos superiores, mientras que el aclareo sistemático pretende el mantenimiento de las frecuencias de genes de la población original durante toda la vida del rodal. El aclareo sistemático tenderá un tanto hacia la conservación estática pero en un rodal vivo siempre se producirá algún nivel de adaptación especialmente en conexión con el cambio de generación.

El aclareo sistemático es particularmente aplicable en casos en que el material muestreado se basa en unos pocos árboles madre y existe un riesgo de pérdida de familias enteras en el momento del cambio generacional. El aclareo sistemático se recomienda también si el material se conserva sólo en un sitio. Aunque el verdadero aclareo sistemático puede ser el método más eficaz para mantener la diversidad genética, podría llevar a la pérdida de los fenotipos superiores de valor potencial para programas de mejoramiento genético local. Esto puede reducir la capacidad del gestor de conservación para justificar nuevas inversiones en estos rodales y potencialmente favorece la opinión de que se deben dejar estos rodales hasta que experimenten una cierta "selección natural" (véase el Capítulo 2). Algunas concesiones tendrá que hacer en definitiva el forestal local de conservación.

5.5 Experiencias con rodales para conservación *ex situ*

5.5.1 Frondosas en Indonesia

En la primera mitad del siglo veinte, los Países Bajos establecieron plantaciones de una serie de frondosas en Indonesia. La idea original no era considerar estas plantaciones como rodales de conservación *per se*: en el momento de establecerlas significaban simplemente ensayos silvícolas para evaluar especies para plantaciones. No obstante, estos rodales, muchos de los cuales tienen ahora 60 años, pueden proporcionar una valiosa experiencia respecto al establecimiento y manejo de rodales de conservación *ex situ*. En efecto, en la bibliografía actual, los rodales de Indonesia se mencionan con frecuencia como rodales de conservación *ex situ* (Subiakto *et al.* 2001; Sidiyasa *et al.* 2001).

En 1937, el Instituto de Investigación Forestal de los Países Bajos, entonces tras la independencia, el Centro de Investigación y Desarrollo Forestal y de Conservación de la Naturaleza (FNCRDC), estableció ocho bosques demostrativos en el oeste de Java, que contenían colecciones de dipterocarpos de cinco géneros y 41 especies procedentes de Sumatra, Bangka, Java, Kalimantan y Maluku. Se han realizado diversos estudios de estos bosques demostrativos, incluyendo el crecimiento, rendimiento, plagas y enfermedades y modelos de floración. Los rodales de dipterocarpos en los bosques demostrativos se han convertido en importantes fuentes de semilla para programas de plantación. De este modo, aunque fueron realmente designados para fines de investigación, algunas de las parcelas se consideran actualmente como valiosos bancos de germoplasma de campo.

Como existe una tendencia creciente de usurpaciones y aprovechamientos ilegales, incluso en áreas protegidas, se ha defendido que el método más seguro para conservar las especies de dipterocarpos es mediante la conservación *ex situ* (Subiakto *et al.* 2001). Sin embargo, tal como demuestran también los bosques demostrativos, el mantenimiento de los dipterocarpos *ex situ* no es nada sencillo (véase el Cuadro 5.1). Una serie de rodales se han perdido por completo y la mayoría de los rodales que quedan han disminuido hasta quedar en unos pocos árboles. Para servir cualquier finalidad de conservación, habrá que añadir en estos rodales nuevo material a fin de mantener un mínimo de variación genética. Además, la mayoría de los rodales ha llegado a su madurez, lo que plantea la cuestión de su regeneración. Para algunos rodales esto será fácil, porque se encuentra abundante regeneración natural dentro del rodal. Pero en la mayoría de los rodales sólo existen unos pocos brinzales o ninguno.

Cuadro 5.1 Colecciones seleccionadas de dipterocarpos en un bosque demostrativo del FNCRDC

Especie	Sitio de plantación	Año de plantación	Origen	Número de árboles que quedan	Regeneración natural
<i>Dipterocarpus gracilis</i>	Darmaga	1957	Sumatra	16	Algunos chirpiales
<i>Dipterocarpus haselthii</i>	Carita	1957	Java	8	Algunos chirpiales
<i>Dipterocarpus tempehes</i>	Haurbantes	1940	Kalimantan	21	Ninguna
<i>Dryobalanops lanceolata</i>	Haurbantes	1954	Kalimantan	2	No hay frutos, sólo floración
	Pasir Hantap	1973	Kalimantan	6	Todavía no hay floración
	Darmaga	1987	Kalimantan	0	Ninguna
<i>Hopea bancana</i>	Haurbantes	1954	Sumatra	57	Algunos chirpiales
<i>Hopea mengarawan</i>	Haurbantes	1954	Sumatra	4	Abundante
		1958	Sumatra	34	Escasa
		1974	Sumatra	0	Ninguna
<i>Shorea acuminatissima</i>	Haurbantes	1940	Kalimantan	2	No hay frutos, sólo floración
<i>Shorea javanica</i>	Pasir Awi	1958	Java	0	Ninguna
<i>Shorea laepifolia</i>	Haurbantes	n.a.	n.a.	0	Ninguna
<i>Shorea leprosula</i>	Haurbantes	1940	Kalimantan	3	Abundante
<i>Shorea macrophylla</i>	Haurbantes	1940	Kalimantan	0	Regeneración abundante Postes hasta de 7 cm. dap

Para la lista completa, véase Subiakto *et al.* (2001)

Para algunas especies la regeneración se puede asegurar recogiendo simplemente semilla para establecer una nueva parcela pero otros demostrarán que su regeneración es más problemática. Esto está suficientemente demostrado por el *Dryobalanops lanceolata*. Se establecieron tres rodales *ex situ* de esta especie en tres sitios diferentes (véase el Cuadro 5.1). Un rodal se perdió; otro, establecido en 1973, se ha reducido a seis árboles sin haberse observado todavía ninguna floración. Esto demuestra que pueden transcurrir muchos años para que algunos de estos árboles, de vida prolongada inicien la floración, o quizás que la floración está algo trastornada en el nuevo ambiente. En el tercero y más antiguo de los rodales, que data de 1954 y se estableció en una estación diferente, se observa floración pero no fructificación. Esto podría ser resultado de una serie de problemas como la falta de polen o de polinizadores o temperaturas críticas durante la producción de la semilla, después de la polinización o fertilización.

5.5.2 Pinos tropicales de Centro América



Evaluando el éxito de la conservación ex situ de pinos tropicales. (Allan Breum Larsen/CSFD)

Las poblaciones naturales de *Pinus caribaea*, *P. oocarpa* y *P. tecunumanii* en Centro América están bajo intensa presión de la agricultura, el pastoreo, la explotación excesiva y los incendios. Por esta razón, se estableció a finales de la década de 1970 una red de rodales de conservación *ex situ* de las tres especies de pino (FAO 1985). El Centro de Semilla Forestal de Dinamarca (CSFD) y la FAO evaluaron recientemente rodales en ocho países diferentes para documentar su estado de conservación. El estudio incluyó 135 rodales de conservación *ex situ* con una

superficie total de 950 ha. Las principales conclusiones son las siguientes:

- Los rodales se habían establecido con éxito y la supervivencia era relativamente buena, pero aproximadamente el 20% de los rodales se han perdido. El fuego fue la causa predominante de la pérdida, junto con unas usurpaciones importantes y la corta ilegal que había dañado a una serie de rodales en diversas cuantías. La mayoría de los rodales tenía menos de las 10 ha. recomendadas en el momento del establecimiento, aunque se consideró que tenían un número suficiente de individuos para asegurar un nivel aceptable de variación genética.
- Sólo alrededor de la mitad de los rodales *ex situ* cumplía los requisitos de aislamiento de posibles fuentes de contaminantes de polen. En la mayoría de los países se plantaron varios rodales en un sitio, normalmente cerca de las estaciones de investigación o de conservación de recursos genéticos. Al agrupar los rodales en un sitio se obtenían ventajas en cuanto a protección y manejo, pero se hacía difícil garantizar un aislamiento adecuado.
- La floración y la producción de semilla también fueron también muy pobres en general. El mal acoplamiento ambiental de muchas procedencias puede haber reducido su potencial reproductivo. Además, los rodales raramente se aclararon, lo que limitó el desarrollo de las copas y, en consecuencia, la floración.
- El mal aislamiento respecto a las fuentes contaminantes de polen y la producción limitada de piñas y semillas restringió el uso de los rodales como fuentes de semilla. Por ello, la regeneración de los rodales parece dudosa. Los costes que representan y las malas perspectivas para recuperar parte de los gastos mediante la venta de semilla, probablemente evitarán el interés de las instituciones por regenerar los rodales al final de su rotación (Theilade et al. 2001).



La falta de aclareos en un rodal de conservación ex situ de Pinus tecunumanii limita la producción de semilla y compromete la regeneración (Chati, Zambia, 1997). (Allan Breum Larsen/CSFD)

5.5.3 La regeneración – cuello de botella de los rodales de conservación *ex situ*

Comparando la experiencia de los rodales de conservación *ex situ* de Indonesia con la de los rodales de pinos tropicales, establecidos unos 30 años después, es interesante señalar las asombrosas semejanzas sobre lo que salió bien y lo que falló.

Tanto para los dipterocarpos como para los pinos tropicales se demostró la posibilidad de establecer rodales en una amplia variedad de condiciones y, en cierta medida, mantener las poblaciones durante varias décadas. Sin embargo, en ambos programas fue difícil mantener la integridad de los rodales. Lo que es más importante, ambos programas indicaron la inseguridad de la regeneración y esto es probablemente la demostración del punto más débil de los rodales de conservación *ex situ*. La cuestión de la regeneración de muchos rodales de conservación *ex situ* continúa sin ser tratada adecuadamente (Cohen *et al.* 1991). Hay que elaborar protocolos de regeneración y ejecutar ciertas prácticas a medida que maduran las colecciones más antiguas; de no ser así, no habrá ninguna seguridad para estos recursos genéticos.

5.6 Sugerencias para desarrollar poblaciones para conservación *ex situ*

5.6.1 Consideraciones generales sobre el establecimiento de rodales para conservación *ex situ*

Las especies arbóreas tienen una extraordinaria diversidad de sistemas reproductivos y estas diferencias son los principales factores que afectan los modelos de variación genética dentro de y entre poblaciones (Wilcox y Murphy 1985). En pocas palabras, las especies que se reproducen por la autopolinización y vegetativamente variarán más genéticamente entre poblaciones de mejoramiento genético que dentro de ellas (Allard 1960). Sin embargo, para las especies de cruzamiento lejano, especialmente las dioicas, sucede lo contrario, aunque las diferencias en la frecuencia de genes entre las poblaciones aisladas reproductivamente, tenderán a incrementarse con el tiempo. En especies de autopolinización, deben estudiarse muestras representativas de una extensa variedad de poblaciones de mejoramiento genético pudiendo representarse mediante pocos individuos comparativamente. Para las especies de cruzamiento lejano, deben muestrearse debidamente poblaciones individuales, pero en general se necesitarán menos representantes de las diferentes poblaciones (Ashton 1988).

Burdon (1988, 1995) analiza los temas incluidos en el desarrollo de poblaciones *ex situ*. El número de árboles madre de los que se hizo la recolección y el tamaño final del rodal de conservación *ex situ* dependerán naturalmente del objetivo del rodal y de los fondos disponibles. Como se mencionó en el Capítulo 3, y recomiendan Johnson *et al.* (2001), debe utilizarse un mínimo de 50 individuos no emparentados por población, para establecer una población con fines de conservación de recursos genéticos. Con el fin de asegurar una conservación adecuada del material muestreado, cada árbol madre muestreado tiene que estar representado por un número razonable de progenies en el rodal de conservación. Por ejemplo, si se utilizaron 50 árboles no emparentados para establecer el rodal de conservación, usando alrededor de 30 progenies por árbol madre se proveería a un rodal de 1.500 pies. Aunque este número no cumple generalmente los requisitos que hemos propuesto previamente (por ejemplo un tamaño mínimo de 10 ha.), ello no demuestra que se pueda conservar un alto nivel de diversidad genética en unos pocos miles de árboles. El mínimo de 10 ha. es lo estipulado normalmente porque es el número final de pies en el momento de la rotación, lo cual es más importante que el número plantado, y se

producirán muchas pérdidas naturales además de los aclareos programados. Además de las consideraciones genéticas, se debe asegurar que el tamaño de los rodales se mantenga en un nivel manejable y que el peso que representan el manejo y la regeneración futuros estén dentro de la capacidad de la institución encargada.

Como se mencionó anteriormente, deben establecerse rodales múltiples para distribuir el riesgo de perder una población (véase el Cuadro 5.1). Si los planes de regeneración dependen de la polinización por el viento más que de la polinización controlada, que es el caso más frecuente, deberán considerarse en general rodales más extensos con el fin de asegurar que el componente de polen de la próxima generación proceda de la población apropiada (FAO (1992) ha proporcionado también unas directrices adicionales de carácter general para el establecimiento de rodales de conservación *ex situ* usando sistemas de plantación corrientes).

5.6.2 ¿Rodales de conservación puros o mezclados?

Como se mencionó en la Sección 5.3.1, la conservación *ex situ* de árboles forestales se ha limitado sobre todo a especies pioneras, para las que se dispone fácilmente de semillas, que se almacenan, propagan y desarrollan con facilidad. El diseño de los rodales de conservación *ex situ* ha seguido los sistemas de plantación, lo que significa monocultivos y una estructura del rodal, de la misma edad. El uso de una sola especie y el diseño de plantaciones de la misma edad (regulares) es factible siempre que se disponga de recursos para un manejo intensivo y regeneración. Utilizando este diseño, el oficial de conservación tendrá que iniciar, después de un número relativamente reducido de años, el aclareo y comenzar a considerar cómo hacer el cambio de generación, es decir, recolectar semilla y establecer un nuevo rodal. Éste es un procedimiento costoso y no está combinado con la utilización de los árboles (Kjær *et al.* 2001). Además, el diseño de la plantación puede no ser adecuado para muchas especies de árboles forestales tropicales de etapas subsiguientes de la sucesión (véase el Recuadro 5.1). Las especies últimas de la sucesión normalmente se dan en rodales mezclados y de edades desiguales (irregulares) y son, con frecuencia, tolerantes a la sombra. Para que tenga éxito la conservación *ex situ* de estas especies, habrá que abordar temas tales como los cultivos nodriza, la mezcla de árboles, la ecología reproductiva, incluyendo el mantenimiento de polinizadores y la recolección y manipulación de semillas recalcitrantes.

De este modo, si la conservación de árboles *ex situ* ha de jugar un papel en la conservación de numerosas especies amenazadas de árboles tropicales y no sólo de unas pocas especies pioneras, puede ser necesario pensar en términos de áreas más amplias con una mezcla de especies. Esto favorecerá la regeneración natural y la estabilidad a largo plazo de las poblaciones establecidas *ex situ*.

5.6.3 Cooperación internacional y preocupaciones de los donantes sobre la conservación *ex situ*

La mayoría de las especies arbóreas amenazadas se encuentran en países en desarrollo cuyos fondos para programas de conservación son limitados. En algunos casos, la conservación *ex situ* de los recursos genéticos forestales puede ser la única posibilidad pero es también una actividad a largo plazo con una gran inversión inicial y un costo continuo. Los organismos donantes han incorporado crecientemente consideraciones ambientales en sus actividades de desarrollo internacional, pero la ayuda generalmente se proporciona

Recuadro 5.1 Mezcla de especies de varias fases de sucesión en plantaciones *ex situ*

El Instituto Forestal de São Paulo desde 1979 ha estado conservando *ex situ* árboles forestales nativos de Brasil en su programa de mejoramiento genético. Inicialmente, todas las especies se establecieron en rodales puros. No obstante, a partir de 1990, con el descubrimiento de la importancia de respetar las etapas de sucesión para una mejor adaptación y desarrollo de la mayoría de las especies forestales nativas, se establecieron plantaciones mezcladas de carácter experimental, combinando especies de varias fases de sucesión, como especies pioneras, secundarias iniciales, secundarias tardías y especies climácicas. Uno de estos ejemplos es el experimento con *Guazuma ulmifolia* (pionera) y *Genipa americana* (secundaria), combinadas con *Peltophorum dubium* (secundaria inicial), *Myracrodruon urundeuva* (secundaria tardía) y *Esenbeckia leiocarpa* (climácica).

La conservación es en forma de plantaciones en diseños experimentales, lo que permite el estudio del comportamiento selvícola, la heredabilidad de los caracteres, la estructura de la población y el seguimiento de la variabilidad genética. Otra ventaja es la posibilidad de transformar los experimentos en huertos semilleros, lo que permite la recombinación del material y la perpetuación de las poblaciones mediante el uso de sus semillas para reforestar áreas alteradas y degradadas. El uso de una selección de baja intensidad dentro de los bancos *ex situ* de campo, permitirá la producción de semillas mejoradas con una alta variabilidad genética.

Fuente: Sebbenn *et al.* (2001)

para la protección de plantas *in situ*, debido a la urgente necesidad de proteger ecosistemas que están frente a un cambio inminente. Además, la conservación *ex situ* presenta pocos beneficios tangibles de forma inmediata, excepto para la utilización.

A fin de facilitar en parte los problemas de financiación, los programas de conservación *ex situ* de recursos genéticos pueden realizarse con éxito mediante múltiples organizaciones que trabajan en forma cooperativa. Algunos ejemplos incluyen los estudios de procedencias realizados por IUFRO en el pasado y los esfuerzos actuales de la Cooperativa de Recursos de Coníferas de Centro América y México (CAMCORE). CAMCORE es una cooperativa que trabaja para establecer *ex situ* poblaciones de recursos genéticos de especies tropicales, muchas de las cuales están amenazadas. En la actualidad, 24 organizaciones son miembros de la cooperativa. Se han establecido con éxito poblaciones *ex situ* para 22 especies coníferas y 13 especies frondosas (CAMCORE 2000).

La conservación *ex situ* es también preocupación de organismos internacionales como IUFRO, Bioversity International y FAO que han contribuido materialmente a atraer la atención mundial sobre la necesidad de la recolección y conservación de los recursos genéticos forestales. Los programas de conservación *ex situ* coordinados a través de organizaciones multilaterales suelen tener un horizonte de tiempo razonable para financiación, debido al compromiso de los gobiernos miembros. Sin embargo, raramente se dispone de una financiación segura a largo plazo porque los donantes continuamente vuelven a evaluar las prioridades y reorientan los limitados fondos. Por ello, los centros internacionales no pueden cargar con la responsabilidad de la conservación por sí solos (Plucknett *et al.* 1987). Además, muchos árboles forestales están fuera del mandato de las organizaciones internacionales y son responsabilidades de los programas nacionales, muchos de ellos en el mundo en desarrollo.

5.7 Discusión y conclusiones sobre el papel de los rodales de conservación *ex situ*

La conservación *ex situ* de árboles forestales tropicales se ve impedida por el gran número de taxa que requiere protección, la gran superficie necesaria para el cultivo de árboles y la falta de métodos adecuados para el almacenamiento a largo plazo de las semillas de muchas especies. Además, una vez en cultivo, la propagación continua mediante semilla sería limitada en muchas especies porque los polinizadores pueden no ser abundantes o estar incluso presentes en la nueva estación. Del lado positivo, los largos ciclos vitales de muchos árboles tropicales garantizaría la supervivencia por muchos años del material original (Bawa y Ashton 1991).

Los rodales de conservación *ex situ* pueden tener varias funciones importantes, incluyendo la de proporcionar material para programas de plantación y de mejoramiento genético. Los rodales de conservación *ex situ* con diseño apropiado pueden transformarse en huertos semilleros, logrando dos objetivos simultáneamente: la conservación de los recursos genéticos y la producción de semilla. Ejemplos de este cambio incluyen los rodales de conservación *ex situ* de dipterocarpos en Indonesia (véase el Cuadro 5.1) y las especies brasileñas en el Instituto Forestal de São Paulo (véase el Recuadro 5.1). Por otro lado, si el interés por el mantenimiento de rodales de conservación *ex situ* está íntimamente vinculado con las ventas de semilla, se puede poner en peligro el mantenimiento y regeneración de los rodales cuando se reduce la demanda, como sucedió con los rodales de conservación *ex situ* de pinos tropicales (Theilade *et al.* 2001). Con frecuencia suponemos que los caracteres de interés para los viveristas de árboles permanecerán constantes. No prevemos programas de mejoramiento genético que pierdan interés por mejorar la tasa de crecimiento, pero la historia demuestra que los caracteres pueden subir y bajar en términos de importancia. Ejemplos de caracteres añadidos a los programas de mejoramiento genético, incluyen la densidad de la madera, las características para la elaboración de pulpa y la resistencia a enfermedades e insectos. Por ello, una función importante de las poblaciones de recursos genéticos, ya sea *in situ* o *ex situ*, es mantener la variación de tal modo que se puedan incorporar en el futuro nuevos caracteres en las poblaciones de mejoramiento genético. Además de proporcionar material para programas de plantación y de mejoramiento genético, la accesibilidad de las plantas en cultivo presenta oportunidades de investigación que no son posibles con poblaciones silvestres remotas y dispersas, y también oportunidades para la educación y para aumentar el conocimiento público que no existiría de otro modo. Los rodales de conservación *ex situ* generan conocimientos sobre biología y silvicultura. Este papel es vital si tenemos que tener conocimientos sobre poblaciones vegetales al borde de la extinción que proporcionan una base suficiente para su manejo *in situ*.

Hasta ahora, los rodales de conservación *ex situ* han servido principalmente para proporcionar material para plantaciones y programas de mejoramiento genético, pero el material conservado *ex situ* puede ser de gran importancia también para la restauración de sitios *in situ*. El Programa de Naciones Unidas para Medio Ambiente (PNUMA) ha solicitado apoyo para establecer centros para conservación *ex situ*, especialmente para conservar muestras para la restauración de ecosistemas (PNUMA 1990). No hay ninguna duda de que el papel de los rodales de conservación *ex situ* en la provisión de material para la restauración de rodales forestales alterados y empobrecidos, áreas protegidas y parques nacionales, se incrementará en las décadas futuras.

Como se ha afirmado a través de estos tres volúmenes, es fundamental conservar el mayor número posible de especies mediante la conservación *in situ*, ya que simplemente no habrá bastantes recursos en el mundo para intentar la conservación *ex situ* de muchas especies arbóreas. Cuando las técnicas de conservación *in situ* y *ex situ* se unen más estrechamente es en las reintroducciones y la recreación de hábitats para especies raras

y amenazadas (Prance 1997). Como se están perdiendo progresivamente más hábitats naturales y algunas especies arbóreas sólo se conservan *ex situ*, será necesario restaurar hábitats adecuados. Los futuros esfuerzos de conservación *ex situ* de árboles tropicales deben centrarse en la creación de hábitats para devolver las especies a situaciones análogas a las correspondientes *in situ*. El imitar las condiciones *in situ* puede facilitar la regeneración natural. Tal estrategia ampliará la variedad de especies que pueden considerarse para la conservación *ex situ* en rodales vivos, y pueden ser muy bien un componente regular de programas en gran escala de reforestación y restauración, ya emprendidos en muchos países.

CONSERVACIÓN *EX SITU* MEDIANTE ALMACENAMIENTO Y UTILIZACIÓN

por Ida Theilade, Leonardo Petri y Jan Engels



6.1 Introducción

En la conservación de la biodiversidad, cuando la preservación de los ecosistemas se debilita, puede ser necesario cuidar de sus fragmentos, pieza a pieza (Conway 1988). Debido a la tasa de deforestación en muchas partes del mundo y al número de especies arbóreas registradas como amenazadas, éste puede ser el caso de muchas especies forestales en las décadas venideras.

En agricultura, la mayoría de las especies de cultivo se conservan por medios *ex situ*, utilizando bancos de semillas, bancos de campo y, en ciertos casos, cultivo de tejidos. Sin embargo, debido al largo tiempo de regeneración que requieren los árboles, el método de conservación más adecuado es incorporar los principios de la conservación *in situ* en el manejo forestal sostenible, incrementando las áreas de bosques protegidos y en algunos casos complementándolos con bancos de germoplasma de conservación *ex situ* y rodales de conservación. A pesar de la urgente necesidad, la conservación de germoplasma, aplicada dentro del marco del manejo de los recursos forestales, ha sido lenta en desarrollarse y los esfuerzos *ex situ* están generalmente limitados a especies y procedencias de valor comprobado (FAO 1993).

Hay que dar más atención al papel potencial de la conservación *ex situ* de los recursos genéticos forestales, como complemento de las estrategias *in situ*, generalmente utilizadas. Este capítulo trata del almacenamiento *ex situ* de las semillas y el polen, los cultivos *in vitro* y las bibliotecas (o genotecas) de ADN de especies arbóreas forestales. La conservación *ex situ* de árboles forestales en rodales vivos -arboretos, bancos de brinzales y rodales de conservación *ex situ*- se analiza en el Capítulo 5.

La finalidad del almacenamiento *ex situ* para conservar especies leñosas es mantener la calidad genética y fisiológica inicial del germoplasma, hasta que se utiliza o se regenera. Lograrlo requiere la consideración de los factores genéticos y ambientales que afectan al germoplasma almacenado. Como el almacenamiento de la semilla es la estrategia de conservación *ex situ*, a corto y mediano plazo, más comúnmente utilizada para los árboles forestales que producen semillas ortodoxas, la biología de la semilla y sus consecuencias para el almacenamiento se discuten con más detalle en los párrafos siguientes. A continuación, se analiza la conservación *ex situ* de árboles forestales mediante técnicas de almacenamiento de polen, cultivos *in vitro*, y bibliotecas o genotecas de ADN con especial hincapié en las ventajas e inconvenientes relativos de cada técnica.

Finalmente, se analiza el papel complementario de la conservación *ex situ* respecto a otras estrategias de conservación y se destaca la importancia de unos objetivos de conservación bien definidos. En cualquier caso, la finalidad de la conservación *ex situ* debe definirse cuidadosamente antes de programar su manejo. A menos que el material *ex situ* se regenere y en alguna etapa se utilice, su conservación no tiene sentido.

6.2 Aplicación práctica del conocimiento de la biología de las semillas forestales

El conocimiento de la biología de la semilla es fundamental para una manipulación apropiada de las semillas, incluido el almacenamiento. Con respecto a la manipulación, el término “semilla” se refiere normalmente a la unidad extraída del fruto y manipulada como una unidad durante el almacenamiento, el tratamiento previo y la siembra. La manipulación de la semilla comprende una serie de procedimientos que comienzan con la selección de la mejor calidad de la fuente de la semilla, y sigue con la recolección, tratamiento, almacenamiento, tratamiento previo a la germinación y siembra. Cada eslabón de esta cadena supone un riesgo potencial de pérdida de semilla y todos los eslabones del proceso son de igual importancia (aunque necesariamente no sean igual de sensibles). Si una semilla muere como resultado de una manipulación descuidada durante la recolección o el tratamiento, incluso las mejores condiciones de almacenamiento no le devolverán la vida. No obstante, un procedimiento de manipulación llega a hacerse inaceptablemente caro si no se puede tolerar una cierta pérdida durante el proceso. En algunos casos, es más económico recolectar un exceso de semilla que tratar y conseguir que toda la semilla sea viable después del período de almacenamiento. Este balance se debe sopesar en cada situación (Schmidt 2000). El proceso completo de almacenamiento de la semilla comienza con la recolección de semillas de buena calidad, tanto fisiológica como genéticamente. Esta sección se centra en las consecuencias de los aspectos fisiológicos en el almacenamiento *ex situ*.

6.2.1 Categorías para el almacenamiento de la semilla

La mayoría de los cultivos agrícolas tienen semillas que se pueden secar y almacenar a bajas temperaturas durante años, sin perder su capacidad de germinación. Éstas se han denominado **semillas ortodoxas**, porque se consideran el tipo más usual y extendido. Sin embargo, muchas especies arbóreas, en especial de las zonas tropicales, tienen semillas que no siguen las normas ortodoxas. Son difíciles de almacenar porque no toleran la desecación y se han denominado por ello **semillas recalcitrantes**. Otras semillas no parecen encajar en ninguna de estas dos categorías y se denominan semillas intermedias. En realidad, las diferencias entre las especies probablemente forman un todo continuo desde las semillas muy ortodoxas a las muy recalcitrantes. Desde un punto de vista práctico, hay dos factores que son críticos para el almacenamiento de la semilla: el contenido de humedad de la semilla y la temperatura de almacenamiento. Las actuales definiciones de las tres categorías de almacenamiento son las siguientes (Thomsen 2000):

- Las **semillas ortodoxas** toleran la desecación hasta un bajo contenido de humedad. También toleran el almacenamiento a bajas temperaturas y se pueden almacenar generalmente durante períodos muy largos.
- Las **semillas recalcitrantes** se dañan por desecación y las de las especies tropicales pueden dañarse también por exposición a bajas temperaturas. Se dice de ellas que son sensibles a la desecación y al frío.
- Las **semillas intermedias** son las que no encajan en ninguna de las categorías anteriores. Pueden desecarse, aunque no a tan bajos niveles como las semillas ortodoxas y con frecuencia son sensibles al frío.

La fertilización del óvulo comienza una cadena de procesos, que finalmente lleva a la formación de un fruto maduro o un órgano portador de la semilla que contiene semillas maduras germinables. Para la mayoría de las especies, la madurez del fruto y la semilla

coincide con la dispersión. No obstante, en algunas especies como *Ilex opaca* y *Fraxinus* spp., las semillas contienen embriones fisiológicamente inmaduros (Nitsch 1971). Las semillas en este caso no son germinables al madurar el fruto y requieren una maduración posterior. El fenómeno se describe con frecuencia como **latencia** o reposo de la semilla. Por otra parte, algunas semillas pueden madurar bastante antes de la madurez del fruto. Las semillas germinables pueden obtenerse así de las vainas todavía verdes de algunas *leguminosas* y de las piñas sin abrir de algunas coníferas (Sedgley y Griffin 1989). Sin embargo, las semillas extraídas muy pronto pueden tener con frecuencia capacidad de almacenamiento y vigor reducidos.

El desarrollo del fruto difiere de acuerdo con el tipo de este. En frutos carnosos, que dispersan los animales se desarrollan sustancias azucaradas en la pulpa simultáneamente con un fuerte aumento en el contenido de humedad (Sedgley y Griffin 1989). El fruto cambia de color, de verde a un brillante y llamativo rojo, naranja o amarillo y se ablanda. Simultáneamente, la pulpa suele soltarse fácilmente de la semilla o el hueso.

La pérdida de agua y la desecación se producen tarde en el desarrollo de los frutos secos. Las paredes gruesas de las cápsulas del fruto, las sámaras y las grandes vainas se hacen leñosas, o paredes finas parecidas al papel. La deshidratación del fruto seco implica la deshidratación de la clorofila; el fruto cambia de color, de verde a normalmente amarillo, castaño o negro.

Los últimos acontecimientos de la maduración de la semilla incluyen la formación de proteínas, hormonas de almacenamiento y (en las semillas ortodoxas) la deshidratación. En los frutos secos, la deshidratación de las semillas coincide con la deshidratación general de los frutos. En los frutos carnosos, la deshidratación es el resultado del incremento de la presión osmótica, debido a la formación de azúcar en la pulpa del fruto (Schmidt 2000). El contenido final de humedad de las semillas depende de la especie y del ambiente exterior. Ello tiene importantes consecuencias para las propiedades de almacenamiento de la semilla. Las semillas ortodoxas se secan normalmente durante la maduración hasta un contenido de humedad del 5 al 10%. Las semillas recalcitrantes mantienen un contenido relativamente elevado de humedad, normalmente >40 a 50%. Las semillas intermedias mantienen también un contenido de humedad relativamente elevado.

Aunque el carácter recalcitrante es predominante en algunas familias vegetales como las *Dipterocarpaceae* (véase el Recuadro 6.1), parece que no es un modelo fitogenético y con frecuencia dos especies estrechamente relacionadas muestran comportamientos de almacenamiento muy diferentes (Thomsen 2000).

El Cuadro 6.1 enumera algunas características que pueden ayudar a dar una idea del comportamiento frente al almacenamiento.

Cuadro 6.1 Características de las semillas ortodoxas frente a las recalcitrantes e intermedias

Semilla ortodoxa

Bajo contenido de humedad al desprenderse la semilla.
Incluye especies latentes o no latentes.
Especies leñosas perennes o especies herbáceas anuales.
Se encuentran en todos los ecosistemas.
Normalmente, semillas pequeñas

Semillas recalcitrantes e intermedias

Contenido relativamente elevado de humedad al desprenderse la semilla
Normalmente no hay latencia
Sobre todo, especies leñosas perennes
Se encuentran con frecuencia en ecosistemas húmedos
Con frecuencia, semillas grandes y carnosas

Fuente: Según Thomsen (2000)

Se producen daños por congelación si las semillas recalcitrantes, que mantienen un alto contenido de humedad, se enfrían a temperaturas por debajo de cero grados. Además, algunas especies tienen semillas que son sensibles a temperaturas entre 0 y 15 °C. Si una especie nunca se expone a bajas temperaturas en el área de distribución natural, habrá que contar con sensibilidad a la temperatura. La *Hopea odorata* es una especie recalcitrante típica de las zonas tropicales húmedas. Es muy sensible a la desecación y no tolera temperaturas inferiores a 15 °C. Por otra parte, el *Quercus robur*, una especie recalcitrante típica de zonas templadas, es sensible a la desecación, pero tolera temperaturas de almacenamiento de -2 °C. De este modo, un indicio sobre el comportamiento de la semilla puede encontrarse probablemente en el ambiente natural de la especie (Thomsen 2000).

El uso y conservación de una especie determinada suele estar limitado por problemas relativos a la recolección y almacenamiento de la semilla. La viabilidad de la semilla limita el uso de la especie a una estrecha variación respecto a la fuente original de la semilla. Las semillas de *Azadirachta indica*, por ejemplo, pueden tener una viabilidad limitada, lo que hace necesaria su siembra inmediata, incluso en épocas que no son óptimas para la supervivencia de los brinzales (Schmidt 2000). Recientemente se han desarrollado unas mejores técnicas de manipulación de la semilla para esta especie (Sacandé 2000). Tales técnicas mejoradas son la clave para un mayor uso y conservación de muchas especies, particularmente aquellas que tienen un comportamiento no ortodoxo de almacenamiento de la semilla. En la Sección 6.3 se revisan los recientes avances en las tecnologías de almacenamiento, y se analizan las posibilidades y limitaciones del almacenamiento como una medida potencial de conservación a largo plazo para las especies arbóreas.

Recuadro 6.1 Almacenamiento de las semillas de dipterocarpos

Las *Dipterocarpaceae*, que constituyen el principal componente de los bosques tropicales húmedos del sureste de Asia, son un ejemplo de una familia cuyas semillas recalcitrantes constituyen un inconveniente importante para el cultivo e impiden también su almacenamiento *ex situ*.

Las primeras publicaciones que mencionan el almacenamiento de semillas de dipterocarpos hacen hincapié en la naturaleza de estas semillas, con una vida extremadamente corta. De acuerdo con una revisión de la bibliografía (Tompsett 1992), la longevidad de la semilla de 79 especies tropicales recalcitrantes variaba, de 14 días para la *Shorea dasyphylla*, a 365 días para la *Hopea hainanensis*. Además, la reducción de la germinación, después de pasar por temperaturas inferiores a 16 °C (daño por frío), ocurre en todas las semillas de dipterocarpos húmedos examinadas hasta ahora. Algunos autores han dividido las especies de dipterocarpos de acuerdo con la susceptibilidad de sus semillas al daño por frío: las semillas de especies de *Shorea* de los grupos del “meranti rojo” y “balau” fueron mencionadas como especialmente sensibles, mientras que todos los otros dipterocarpos estudiados eran tolerantes hasta 4 °C.

Las semillas de *Hopea*, *Cotylelobium* y *Vatica* tienden a tener una mayor tolerancia a la desecación que las semillas de *Shorea*, pero la mayoría de las semillas de *Dipterocarpus* son relativamente intolerantes. Varios informes indican que el almacenamiento óptimo de la semilla recalcitrante de los dipterocarpos es con temperaturas del rango de 15 a 21 °C. Otras especies de *Dipterocarpus*, por ejemplo, *D. turbinatus*, no son recalcitrantes.

Entre las especies de *Dipterocarpaceae* se han observado asociaciones entre la tolerancia a la desecación y el tamaño de la semilla, el hábitat, la tasa de desecación de la semilla y la longevidad. Así, la semilla de tres especies de *Shorea* procedentes de diferentes hábitats, tienen diferente tolerancia a la desecación. La especie de bajas precipitaciones *S. roxburghii* tiene

continúa

semilla que puede secarse con seguridad hasta el 35%, mientras que las especies de los monzones o del bosque húmedo *S. almon* y *S. robusta* no pueden secarse con seguridad por debajo del 40% de contenido de humedad. Las semillas más pequeñas se secan más rápidamente y tienden a ser más tolerantes a la desecación. La semilla con mayor tolerancia a la desecación (*S. roxburghii*) es también la semilla de mayor longevidad.

En resumen, las semillas recalcitrantes se deben mantener con contenidos de humedad superiores a sus valores mínimos de seguridad. Es necesaria la ventilación para eliminar los gases tóxicos y evitar la anoxia. El valor de los fungicidas en la mejora de la vida en almacenamiento de las semillas de dipterocarpos, está todavía pendiente de establecer. Es necesario trabajar más para evaluar el contenido óptimo de humedad requerido para el almacenamiento de semillas de especies determinadas.

Basado en una revisión de la bibliografía sobre el almacenamiento de las semillas de dipterocarpos por Tompsett (1992)



Los dipterocarpos tienen semillas recalcitrantes, y por ello son difíciles de establecer y de conservar ex situ. (Ida Theilade/FLD)

6.2.2 Almacenamiento de semillas ortodoxas

El almacenamiento de semillas ortodoxas es el método más extensamente practicado de conservación *ex situ* de recursos fitogenéticos. Alrededor del 90% de los 6,1 millones de accesiones almacenadas en bancos de germoplasma se mantienen en realidad como semillas (FAO 1996). Las técnicas incluyen el secado de las semillas hasta un bajo contenido de humedad (3 a 7% sobre la base de peso fresco, dependiendo de la especie), y su almacenamiento en contenedores herméticamente sellados a bajas temperaturas, preferentemente a -18 °C o más frías (FAO/IPGRI 1994). Las semillas de muchas especies ortodoxas pueden conservarse de este modo durante varias décadas y posiblemente siglos. Se dispone de una serie de documentos prácticos en la bibliografía que comprenden los principales aspectos de la conservación de semillas, incluyendo el diseño de instalaciones de almacenamiento de semillas para conservación genética (Cromarty *et al.* 1982); principios del ensayo de semillas para monitorear la viabilidad de las accesiones de semillas mantenidas en bancos de germoplasma (Ellis *et al.* 1985a); métodos para la eliminación de la latencia y germinación de las semillas (Ellis *et al.* 1985b); y métodos para el tratamiento y manipulación de semillas en bancos de germoplasma (Hanson 1985).

Se ha hecho un intento de desarrollar una alternativa de “baja inversión” para el almacenamiento frío convencional de la semilla. La técnica se denomina “almacenamiento ultraseco” y permite la preservación a temperatura ambiente. Se considera una opción útil de bajo costo cuando no se puede conseguir una refrigeración adecuada. Por otra parte, se ha argumentado que el secado de las semillas más allá de un contenido crítico de humedad puede no proporcionar beneficio adicional a la longevidad y puede incluso acelerar las tasas de envejecimiento de la semilla (Ellis *et al.* 1988; Vertucci y Roos 1993; Walters y Engels 1998). Deben continuarse, por lo tanto, las investigaciones sobre diversos aspectos del almacenamiento ultraseco de la semilla, incluyendo las técnicas de secado, como el secado de sol y sombra (Hay y Probert 2000) o el secado de vacío y congelación (Côme 1983) y su posible aplicación a un mayor número de especies.

Recuadro 6.2 Estudio de caso: El Proyecto Milenium del Banco del Semillas

El Proyecto Milenium del Banco de Semillas trata de conservar colecciones de semillas de especies leñosas y otras, principalmente de terrenos secos tropicales y subtropicales del mundo. El Proyecto ha evolucionado desde el trabajo con especies silvestres, que comenzaron en el Royal Botanic Gardens (Jardines Botánicos Reales) (RBG), en Kew, en la década de 1960 y se ha desarrollado con años de colaboración con organizaciones botánicas, agrícolas y forestales de todo el mundo. El impulso del Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB), y la amenaza que puede llevar al borde de la extinción cerca de 48.000 plantas, en 20 años, ha influido en el ambicioso propósito de conservar muestras de semillas de 24.000 especies vegetales durante los años 2000 a 2009. El Proyecto está dirigido por el Departamento de Conservación de Semillas del RBG de Kew (SCD) con base en el Edificio Wellcome Trust Millennium, de Wakehurst Place, West Sussex, UK. El Proyecto recibe financiación importante de la Comisión del Milenium del RU, el Wellcome Trust y Orange plc.

Antes de comenzar la fase principal del Proyecto, la colección enumeró más de 11.000 muestras de poblaciones de 5.500 especies vegetales. Todas las muestras están almacenadas a largo plazo de acuerdo con normas aceptadas internacionalmente. Incluidas dentro de la colección existente están las colecciones base de especies de estabilización de tierras y de especies agroforestales que se mantienen en nombre de FAO/Bioversity International e ICRAF.

Las muestras se recogen y, cuando se permite, se distribuyen bajo el acuerdo de transferencia de materiales (ATM). Las muestras de semilla se proporcionan sólo en pequeñas cantidades, para investigación. La finalidad fundamental de la colección es asegurar la conservación. Esto contrasta con muchas colecciones de semillas forestales cuya finalidad es un uso más inmediato. El muestreo ha sido dirigido inicialmente a nivel de especies, con la finalidad como mínimo de una muestra de población por especie. Dentro de cada población, el muestreo pretende captar una amplia representación de los alelos

presentes. Estas muestras iniciales se utilizarán para aprender más sobre la biología de las especies y, con ello, formular una nueva estrategia más avanzada de muestreo.

A fin de reducir al mínimo la necesidad de regeneración, con todos los problemas relacionados, es importante conseguir el máximo de vida de la muestra. Por ello, un programa importante de investigación, basado en unos 25 años de experiencia, sirve de base al proyecto. Este trabajo mantiene una importante iniciativa de formación y una base de datos que deben facilitar la conservación de semillas en muchos países.



Proyecto Milenium del Banco de Semillas. Científicos de Kenia discuten el tratamiento de la semilla del Combretum collinum con un miembro del personal de RBG Kew, en el Edificio de Wellcome Trust Millennium. (Fideiocomisarios de RBG, Kew)

6.2.3 Almacenamiento de semilla no ortodoxa

Las semillas que se desprenden con un contenido de humedad relativamente elevado, (>40 a 50% de peso fresco) son incapaces de soportar la desecación y con frecuencia son sensibles al frío. Estas semillas no pueden mantenerse por lo tanto en las condiciones convencionales de almacenamiento de semillas y se describen como recalcitrantes (Chin 1988). Incluso cuando se almacenan de una forma óptima, su período de vida se limita a semanas y ocasionalmente a meses. Está disponible un protocolo de IPGRI para determinar el comportamiento preciso en almacenamiento, de semillas de especies desconocidas (Hong y Ellis 1996).

De las más de 7.000 especies sobre las que se ha publicado información sobre el comportamiento en almacenamiento de la semilla, aproximadamente el 3% están registradas como recalcitrantes y otro 4% adicional como posiblemente recalcitrantes (Hong *et al.* 1996, <http://www.bioversityinternational.org/fileadmin/bioversity/publications/pdfs/137.pdf>). No obstante, los porcentajes de las especies citadas que producen semillas intermedias y recalcitrantes, están probablemente en gran parte subestimados. Estas cifras se basan en publicaciones científicas y técnicas que, a falta de otras, se refieren principalmente a especies templadas. Cabe esperar que una gran proporción de las especies para las que no se dispone de información, que son predominantemente de origen tropical o subtropical, presenten comportamientos de almacenamiento de semillas recalcitrantes. Como ejemplo, se ha estimado que una mayoría de las especies de los ecosistemas de los bosques tropicales tienen semillas recalcitrantes (Ouédraogo *et al.* 1996).

Investigaciones más recientes han identificado especies que presentan comportamientos de almacenamiento intermedio. El término se ha utilizado para describir las semillas que toleran un mayor grado de desecación que las semillas recalcitrantes pero que son menos tolerantes a la desecación que las semillas ortodoxas (Ellis *et al.* 1990, 1991). Además, las semillas intermedias suelen ser sensibles al frío. Aunque se observa un todo continuo en la sensibilidad a la desecación, desde las muy sensibles a las relativamente tolerantes (Berjak y Pammenter 1994), puede ser imposible lograr la conservación a largo plazo a -20 °C, lo que es posible para las semillas ortodoxas. Incluidas en la categoría intermedia, hay algunas especies económicamente importantes como el café, los cítricos, el árbol del caucho, la palma de aceite y muchas especies de árboles forestales tropicales.

Antes de emprender cualquier investigación técnicamente exigente sobre métodos para mejorar el almacenamiento de las especies recalcitrantes e intermedias, es apropiado examinar el modelo de desarrollo de las semillas y llevar a cabo experimentos preliminares para determinar su sensibilidad a la desecación y también para definir las condiciones de almacenamiento. En colaboración con el CSFD y numerosas instituciones de todo el mundo, Bioversity International ha desarrollado un protocolo para clasificar las semillas de árboles forestales tropicales, por su sensibilidad a la desecación y su comportamiento en almacenamiento (véase el Recuadro 6.3). Incluso si tales experimentos no permiten definir las condiciones de almacenamiento a largo plazo, el aumento de los períodos de almacenamiento es muy importante para el uso de una especie si ello permite el almacenamiento de las semillas hasta la próxima estación de plantación, o el transporte desde la fuente de la semilla a un sitio de plantación preparado.

6.3 Otras técnicas para el almacenamiento de especies no ortodoxas

A pesar de las décadas de investigación sobre métodos de almacenamiento de semillas recalcitrantes, sólo se han hecho progresos limitados. Para el almacenamiento de las especies no ortodoxas, puede ser necesario por lo tanto, acudir a otras técnicas enumeradas en esta sección.

6.3.1 Crioconservación

Este término se refiere al almacenamiento de semillas a temperaturas extraordinariamente bajas, normalmente en nitrógeno líquido (-196 °C). Unida con el cultivo *in vitro*, esta técnica representa con frecuencia la única opción segura y rentable para el almacenamiento de especies no ortodoxas. Las semillas de caoba (*Swietenia macrophylla*) o neem (*Azadirachta indica*) son relativamente pequeñas y tolerantes a la desecación y pueden por tanto crioconservarse directamente después de una desecación parcial (Hu *et al.* 1994; Marzalina 1995; Berjak y Dumet 1996). En casos en que las semillas no se pueden tratar mediante crioconservación, se deben utilizar embriones cigóticos o ejes embrionarios. En este caso, la selección de los embriones en la etapa adecuada de desarrollo, es fundamental para el éxito de la crioconservación.

Además de la técnica de desecación, preferentemente empleada para la congelación, se deben experimentar otros métodos, incluyendo el precrecimiento-desecación, la encapsulación-deshidratación y la vitrificación (Engelmann 1997; Engelmann y Engels 2002).

Recuadro 6.3 Proyecto de semillas recalcitrantes de árboles forestales tropicales

El uso de muchas especies de árboles forestales tropicales de gran valor, en programas de plantación y conservación se ve dificultado por problemas asociados con la manipulación de la semilla y su almacenamiento. Las semillas de una gran proporción de especies de árboles tropicales pierden viabilidad muy rápidamente y mueren poco después de haberlas recogido del árbol. Se dice que son semillas recalcitrantes porque son difíciles de manipular y difíciles de almacenar durante largos períodos de tiempo.

Algunas de las especies que tienen semillas recalcitrantes son extraordinariamente atractivas, pero la difícil manipulación de la semilla a veces impide su utilización. A fin de tratar y resolver el problema, Bioversity International y CFSD, junto con institutos nacionales, iniciaron un proyecto sobre la manipulación y almacenamiento de tales semillas. En la primera fase del proyecto, se elaboró un protocolo para determinar el contenido mínimo de humedad y las condiciones óptimas de almacenamiento y se ensayaron alrededor de 30 especies forestales tropicales de interés económico.

En la segunda fase del proyecto (1999–2001), más de 20 socios nacionales de África, Asia y las Américas trabajaron juntos para clasificar la tolerancia a la desecación y el comportamiento en almacenamiento de varias especies adicionales de árboles forestales tropicales. Se estudiaron un total de 52 especies que fueron todas clasificadas por dos instituciones.

Talleres regionales de formación en tres continentes, proporcionaron experiencia práctica a los técnicos de instituciones nacionales, en la aplicación del protocolo de clasificación elaborado en la primera fase. Los talleres proporcionaron también oportunidades para los colegas de recolección y replicaron y discutieron los problemas prácticos sobre sus especies elegidas.

La comunicación entre los miembros del proyecto se fomentó mediante una red informal de investigación. La red se mantuvo a través de un boletín de noticias que ha demostrado ser un instrumento eficaz para publicar y difundir el protocolo y los documentos y técnicos y junto con otra información pertinente sobre los ensayos iniciados, los progresos logrados, los problemas prácticos encontrados y las sugerencias para resolverlos. Los resultados están disponibles en la página web de CSFD (www.dfsc.dk). Además, está disponible una recopilación de los resultados del proyecto en un libro que está actualmente en prensa (Sacandé *et al.* 2004).

continúa

Los resultados demostraron que muchas de las especies son menos difíciles de lo esperado. Ligeras modificaciones de los procedimientos pueden llevar a unos periodos más prolongados de almacenamiento seguro. Por ejemplo, un secado ligero de las semillas o el almacenamiento a cierta temperatura hará posible en algunos casos mantener las semillas durante un par de meses, en vez de unas pocas semanas. Estos resultados pueden significar una clara diferencia para el uso de estas especies. En algunos países tropicales, por ejemplo en Vietnam, hay más de 1.000



Las semillas de Neobalanocarpus heimii germinan inmediatamente después de la caída de la semilla, dificultando el suministro para programas de conservación y reforestación. (Ida Theilade/FLD)

especies indígenas, de las cuales sería conveniente producir algunos centenares. Si se pudieran establecer métodos apropiados de manipulación de la semilla, algunas de estas especies podrían incluirse en los programas de plantación de árboles, contribuyendo a la economía nacional y mejorando sumamente la biodiversidad del país.

La figura superior muestra las semillas de *Neobalanocarpus heimii*. Conocida localmente como Chengal, esta especie es muy buscada debido a las propiedades de duración y peso de su madera. Endémica en Malasia Peninsular, está incluida en la Lista Roja de la UICN como vulnerable. Sus semillas, muy recalcitrantes, germinan de 4 a 7 días después de la caída de la semilla, lo que impide al suministro de semilla para programas de conservación y reforestación.

Con especies para las que se ha demostrado que no han tenido éxito los intentos de congelar embriones enteros o ejes embrionicos, varios autores han sugerido utilizar ápices de brotes recolectados de los embriones, yemas adventicias o embriones somáticos producidos a partir de tejidos embrionarios (Pence 1995; Berjak *et al.* 1996). Ésta puede ser la única solución para especies que carecen de embriones bien definidos. No obstante, en este caso, se han desarrollado y se dominan procedimientos más sofisticados de cultivo de tejidos. Además utilizando explantes adventicios se reduciría la gama de variabilidad genética muestreada (Pence 1995; Berjak *et al.* 1996), especialmente cuando se usa la embriogénesis somática, porque la respuesta a tratamientos de inducción es generalmente muy específica según genotipos y los cultivos de embriones somáticos pueden obtenerse únicamente a partir de un número limitado de genotipos (véase por ejemplo Percy *et al.* 2000). El inconveniente de la crioconservación es la dificultad general de regeneración de plantas completas.

6.3.2 Conservación de brinzales

Esta técnica se refiere a la conservación de brinzales jóvenes detenidos en su desarrollo mediante almacenamiento a baja temperatura y con una baja intensidad luminosa. Esta técnica se ha ensayado en *Symphonia globulifera* y en *Dryobalanops aromatica* (Corbineau y Côme 1986; Marzalina *et al.* 1992).

6.3.3 Conservación *in vitro*

Este método de conservación incluye el mantenimiento de explantes en un ambiente estéril y libre de patógenos y se utiliza generalmente para la conservación de especies que producen semillas recalcitrantes o que no producen semilla o para material que se propaga vegetativamente para mantener genotipos determinados (Engelmann 1997). Aunque la investigación sobre las técnicas *in vitro* sólo comenzó hace pocas décadas, esta técnica se ha aplicado para la multiplicación, almacenamiento y colección de material de germoplasma para más de 1.000 especies (Bigot 1987).

Las técnicas *in vitro* pueden utilizarse eficazmente para la colección, multiplicación y almacenamiento, particularmente con especies problemáticas (Engelmann 1997). Se han desarrollado técnicas para introducir semillas recalcitrantes y material propagado vegetativamente *in vitro*, bajo condiciones asépticas, directamente desde el campo (Withers 1995). Este método permitirá hacer colecciones de germoplasma en áreas remotas (por ejemplo, en el caso de semillas recalcitrantes de gran valor), o cuando el transporte de los frutos recogidos tendría un costo prohibitivo debido a su tamaño o peso. También en casos en que las especies elegidas no tuvieran semillas para recoger o cuando los meristemas que brotan en la madera perdieran rápidamente su viabilidad o estuvieran fuertemente contaminados, el establecimiento de cultivos asépticos en el campo facilitará la recolección y mejorará su eficacia (Engelmann y Engels 2002). El material vegetal con altas tasas de multiplicación puede propagarse en un ambiente aséptico mediante los sistemas de cultivo de tejidos como la micropropagación y la embriogénesis somática. La miniaturización de los explantes es una opción interesante para reducir las necesidades de espacio y consecuentemente los costos de mano de obra para el mantenimiento de las colecciones de germoplasma (Ashmore 1997).

Pueden emplearse diferentes métodos de conservación *in vitro*, dependiendo de la duración necesaria de almacenamiento (Engelmann 1997; Withers y Engelmann 1998). Para almacenamiento a corto y medio plazo, se han ideado diversas técnicas que hacen posible reducir el crecimiento e incrementar los intervalos entre subcultivos. Se han desarrollado técnicas de conservación *in vitro* usando almacenamiento de crecimiento lento para una amplia variedad de especies, incluyendo plantas leñosas templadas, árboles frutales y especies hortícolas. A pesar de la disponibilidad de tales técnicas el *Informe sobre el estado de los recursos fitogenéticos mundiales para la agricultura y la alimentación* (FAO 1996) indica que a nivel mundial sólo se conservan *in vitro* unas 38.000 accesiones. La mayoría de los programas de conservación son incapaces de atender las necesidades de equipos relativamente sofisticados, un suministro seguro de electricidad y personal capacitado. Además, debe tenerse en cuenta que sólo puede mantenerse *in vitro* una cantidad limitada de diversidad genética.

6.3.4 Almacenamiento de polen

Esta técnica es comparable al almacenamiento de la semilla, porque la mayoría del polen puede secarse hasta menos del 5% de contenido de humedad, sobre la base de peso seco, y almacenarse por debajo de 0 °C. No obstante, algunas especies producen polen con características de almacenamiento de tipo recalcitrante. Hay una experiencia limitada sobre la supervivencia y capacidad de fertilización del polen criopreservado con más de 5 años de edad (Towill 1985). Sin embargo, el polen tiene una vida relativamente corta en comparación con la semilla (aunque esto varía sensiblemente entre especies) y los ensayos de viabilidad pueden llevar mucho tiempo. Por estas razones, a pesar de ser una técnica útil

para especies que producen semilla recalcitrante (IPGRI 1996), el almacenamiento de polen se ha utilizado sólo a escala limitada en la conservación de germoplasma (Hoekstra 1995). Otros inconvenientes son, la pequeña cantidad de polen producido por muchas especies; la falta de transmisión vía polen, de los genomas de los orgánulos subcelulares; la pérdida de genes vinculados con el sexo en especies dioicas; y la falta de capacidad de regeneración de la planta aunque hay indicaciones de que el polen puede volver a desarrollarse hasta en plantas completas (Hoekstra 1995). Por otra parte, es rara la transferencia por el polen de plagas y enfermedades a excepción de algunas enfermedades ocasionadas por virus, lo que permite la seguridad en el traslado e intercambio de germoplasma.

6.3.5 Almacenamiento de ADN

Este método de almacenamiento está creciendo rápidamente en importancia. El ADN procedente del núcleo, el mitocondrio y los cloroplastos se extrae en la actualidad de forma rutinaria y se inmoviliza entre hojas de nitrocelulosa donde se puede analizar con numerosos genes clonados. Con el desarrollo de la reacción en cadena de la polimerasa (RCP), es posible actualmente amplificar de forma rutinaria oligonucleótidos específicos o genes de la mezcla completa del ADN genómico. Estos avances han llevado a la formación de una red internacional de depósitos de ADN para el almacenamiento de ADN genómico (Adams 1997). La ventaja de esta técnica es que es eficaz, sencilla y ocupa poco espacio. Los principales inconvenientes, además de los requerimientos que exige en cuanto a capacidad y equipos, radican en los problemas con el subsiguiente aislamiento, clonación y transferencia de los genes. El problema indudable es que no permite la regeneración de plantas completas. (Maxted *et al.* 1997).

6.4 Algunas consideraciones sobre el almacenamiento de árboles mediante conservación *ex situ*

El diseño de cualquier programa de conservación *ex situ*, y la decisión sobre qué tecnologías utilizar, debe comenzar a partir de las consideraciones sobre el material biológico en cuestión: ¿por qué deseamos conservarlo y cómo se va a utilizar en el futuro? La finalidad debe definirse estrictamente, como requisito previo para la programación del manejo. En los párrafos que siguen se analizan algunas limitaciones importantes y opciones inherentes a la conservación *ex situ* con semilla.

6.4.1 Consecuencias genéticas de la conservación *ex situ*

Un problema serio con la conservación *ex situ* de la semilla es que, debido a la variabilidad natural dentro de las muestras, se producirán inevitablemente pérdidas “artificiales” de alelos. En otras palabras, si se establece una nueva población mediante semilla que ha estado almacenada durante un período de tiempo, la progenie habrá estado sujeta a una selección artificial cuyas consecuencias genéticas generalmente no conocemos. Si la conservación *ex situ* toma la forma de plantas, semilla o cultivo de tejidos, el rejuvenecimiento genético a través de la regeneración de plantas mediante, polinización cruzada o controlada es obligatorio de hacerse periódicamente, e inevitablemente se introducen cada vez nuevas combinaciones seleccionadas de genes. La dimensión del problema con respecto a la ausencia de selección natural en el almacenamiento, depende del tiempo de generación

de la especie y de la estructura de la población. Por otra parte, en algunas circunstancias, una ausencia de verdadera selección natural podría ser una ventaja en el mantenimiento de alelos potencialmente útiles que se podrían haber perdido en condiciones silvestres.

La conservación *ex situ* de pequeñas muestras cabe esperar, por lo tanto, que lleve inevitablemente a un cambio genético imprevisible. La proporción de genotipos adecuados en la progenie que se pretende reintroducir en el medio natural, puede reducirse mucho por esta razón, especialmente si las poblaciones silvestres donantes son ya pequeñas y están en disminución y, por lo tanto, sufriendo ya una acumulación de combinaciones de genes nocivos (Hedrick 2004). Para todos los fines prácticos, por lo tanto, la conservación *ex situ* de las especies lleva inevitablemente, y quizás irreversiblemente, a una cierta forma de domesticación (Ashton 1988), sea o no sea útil.

6.4.2 Limitaciones de la ciencia y la tecnología

Cuando se evalúa la eficacia y las limitaciones de los métodos *ex situ* disponibles actualmente para la conservación genética de especies leñosas perennes, resulta evidente que, con los actuales conocimientos, el almacenamiento de semilla recalcitrante, el almacenamiento de polen y el cultivo *in vitro* sólo son viables como medidas a corto plazo. El único método seguro actualmente disponible de conservación *ex situ* a largo y medio plazo, para uso en gran escala en silvicultura, es el almacenamiento de semillas ortodoxas. Los problemas relacionados con la regeneración de las existencias de semillas, hay que tenerlos siempre en cuenta. Actualmente, todos los métodos de conservación *ex situ* de material vegetal vivo, requieren la regeneración periódica y la reproducción sexual de las existencias. Esto último presupone algún conocimiento sobre el sistema de mejoramiento genético y el modelo de variabilidad genética de la especie en cuestión. Con frecuencia no se dispone de este conocimiento para las especies de árboles tropicales. Así, el almacenamiento *per se* puede no ser el problema más difícil a largo plazo de la conservación *ex situ* (FAO 1993).

La tarea de la conservación *ex situ* no se facilita por los muchos casos en que puede existir una interdependencia mutua con otras especies. Por ejemplo:

- Los robles (*Quercus* spp.) en general no pueden regenerarse sin una flora simbiótica de hongos en sus raíces, de las que dependen y que difieren entre especies.
- Los frutos grandes y fuertemente protegidos de una extensa clase de especies madereras valiosas de *Meliaceae* y *Burseraceae* del sudeste de Asia, parece que los dispersan exclusivamente los pájaros llamados “picos cornudos” porque sólo los fuertes picos de estas aves tienen capacidad para abrir las gruesas cáscaras y extraer las grandes semillas con arilos del interior (Terborgh 1990).

En algunos casos, tales árboles y sus simbioses confirmarán que son extraordinariamente difíciles para conservarlos *ex situ*. No obstante, un cuidado intensivo y la biotecnología pueden preservar cierta diversidad que de otro modo se perdería.

Lamentablemente, las demandas de aplicaciones técnicas son con frecuencia de costo elevado y considerando que la capacidad y el dinero para aplicar las tecnologías avanzadas para preservación están localizadas sobre todo en los países ricos con más recursos, los mayores problemas de pérdida de especies están en los países tropicales pobres. Las estrategias de conservación *ex situ* no contribuyen a la preservación del hábitat. Para los países menos desarrollados, la preservación del hábitat puede ser la única estrategia realista de conservación.

6.4.3 ¿Cuál es el papel específico del almacenamiento de árboles *ex situ*?

Las semillas realmente ortodoxas (de especies como *Pinus*, *Picea* o *Acacia*) han estado almacenadas con éxito hasta 50 años. Con unos protocolos perfeccionados para la recolección, manipulación, tratamiento y almacenamiento de la semilla; la longevidad de las semillas ortodoxas podría ampliarse hasta 75 a 100 años (FAO 1993). Por otro lado, a pesar de las dos décadas de investigación sobre el desarrollo de métodos eficaces de almacenamiento para la conservación de semillas de especies arbóreas recalcitrantes, sólo se han desarrollado métodos de almacenamiento a corto plazo, que amplían la posibilidad de almacenamiento desde unos pocos días a unas pocas semanas y hasta 8 a 12 meses. Estos resultados se lograron mediante crioconservación de embriones cigóticos de *Hevea brasiliensis* y *Theobroma cacao*, seguidos por regeneración utilizando técnicas *in vitro* (FAO 1993). Tales métodos son demasiado caros para actividades a escala operativa, especialmente en los países en desarrollo. No obstante, se ha demostrado el potencial de la crioconservación y algunas instituciones como Fort Collins en los EUA y National Bureau of Plant Genetic Resources (Agencia Nacional de Recursos Fitogenéticos) (NBPGR) de la India, están contemplando perspectivas a más largo plazo. En la actualidad, la tecnología *ex situ* es un tratamiento que se puede usar para ganar tiempo para preservar opciones de unas pocas poblaciones y especies que se piensa que son de especial valor.

En algunos casos el almacenamiento *ex situ* puede ser la única opción para la conservación por un corto período de tiempo, antes de reintroducir la especie en su ambiente natural. La pérdida de poblaciones silvestres no siempre es el resultado del cambio irreversible del hábitat. Puede deberse a razones pasajeras, económicas o culturales, como el aprovechamiento no sostenible, o la tala y quema intensificada o por razones ambientales corregibles, como ciertas operaciones mineras, el avance de la construcción o malezas ambientales introducidas. Cuando la amenaza y destrucción pueda ser temporal, tiene sentido volver a coleccionar o almacenar una población amenazada, para su reintroducción posterior (Ashton 1988). En tales casos, la composición genética de la especie debe mantenerse en todo lo posible (véase el Recuadro 6.4 sobre el árbol toromiro, *Sophora toromiro*, de la isla Oriental).

Las muestras de semillas *ex situ* pueden servir eficazmente como un medio para conservar características importantes de las poblaciones y, por lo tanto, atributos importantes de las especies. Los programas de conservación *ex situ* para procedencias de pinos tropicales representan precisamente un ejemplo (CAMCORE 2000). Para la mayoría de las especies arbóreas forestales, combinaciones específicas de genes se pueden preservar únicamente conservando el genotipo, lo que normalmente incluye algún tipo de propagación clonal. De este modo, es imperativo para la conservación a largo plazo que los gestores de las muestras de poblaciones *ex situ* definan, tan cuidadosamente como permita la información, las características que intentan conservar: ¿todos los alelos de una submuestra o solamente algunos y, si son algunos, cuáles? Una vez que se ha definido una serie clara de prioridades, será considerable el papel de lo que en realidad se convertirá en una forma de “biblioteca de genes” (Ashton 1988).

Recuadro 6.4 *Sophora toromiro* (Leguminosae): el árbol perdido de la Isla Oriental

La Isla Oriental (Rapa Nui) es una de las islas habitadas más remotas y pequeñas. Con una superficie de poco más de 150 km², comparte con otras muchas pequeñas islas el destino de haber sufrido una dramática degradación ambiental y un alto nivel de extinción de especies. Una de las plantas extinguidas de la Isla Oriental es el árbol toromiro (*Sophora toromiro*). Sin embargo, ha sobrevivido en cultivo en varios jardines botánicos.

Habiendo pasado la principal etapa de destrucción ambiental en la isla Oriental, existe actualmente la oportunidad de restaurar los hábitats degradados y reintroducir componentes perdidos de la flora. La conservación y reintroducción de la *S. toromiro* está coordinada por el Grupo de Manejo Toromiro (Toromiro Management Group), un consorcio de colaboración de jardines botánicos, genetistas, forestales y arqueólogos. La primera recolección científica de *S. toromiro* fue realizada en 1774 durante el segundo de los viajes de Cook. Las notas sugerían entonces que la especie sobrevivía como matorrales esparcidos en la Isla y que su valiosa madera tenía muchos usos: para materiales de construcción, artículos caseros, canoas y tallas. Las causas de la pérdida de los arbustos y el bosque original se pueden rastrear hasta llegar al cambio ecológico que siguió a la colonización por los polinesios alrededor del 400 DC. Ya los primeros visitantes europeos comentaron el estado deforestado de la isla y el proceso de degradación se completó en 1866 con la introducción de conejos, ovejas, cerdos, caballos y ganado vacuno.

El último espécimen silvestre sobreviviente de *S. toromiro* estaba creciendo en la ladera interior del cráter de Rano Kau, protegido de la predación por el ganado mayor. Este espécimen sobrevivió hasta 1960 cuando se cortó para leña. Ésta fue también la fuente de las semillas recogidas por Thor Heyerdahl durante la expedición arqueológica de 1955–56 a la Isla Oriental. Las semillas fueron entregadas inicialmente al Naturhistoriska Riksmuseet de Estocolmo, pero en el otoño de 1958 las semillas fueron trasladadas al Jardín Botánico de Göteborg y se sembraron seis o siete.

Las existencias actualmente en cultivo descienden de cuatro brinzales germinados en el Jardín Botánico de Göteborg en 1959. Estas existencias iniciales procedían de un árbol y era probable que hubiese surgido como resultado de la autopolinización. Además, el *S. toromiro* está cultivado en el Jardín Botánico Nacional de Chile, y hay una serie de árboles que crecen en jardines y viveros privados, pero la falta de documentación sobre su origen oscurece su valor de conservación.

El Grupo de Manejo de Toromiro ha emprendido una búsqueda mundial y ha localizado todos los árboles disponibles de toromiro en cultivo. Un directorio de los árboles se mantiene en el Jardín Real Botánico de Kew, RU, con los datos asociados de la identificación de la huella genética. Es evidente que existe muy poca diversidad genética dentro de la población sobreviviente. La especie, según parece, persistió en poblaciones reducidas durante una serie de décadas; entre 1917 y 1960 probablemente persistió como un individuo silvestre. Es probable que este cuello de botella tenga consecuencias para la supervivencia a largo



S. toromiro, un descendiente del último árbol silvestre sobreviviente de la Isla Oriental cultivado a partir de semilla en el Jardín Botánico de Copenhague. (Omar Ingerslev)

continúa

plazo del taxón, lo que dependerá del manejo eficaz de los genotipos supervivientes. Utilizando datos genéticos, se está diseñando un programa de propagación para establecer plantaciones de árboles en Europa, Chile y la Isla Oriental. El Grupo de manejo Toromiro está trabajando con la Corporación Nacional Forestal en la repatriación de toromiros a la Isla Oriental. En 1995 se emprendió una introducción experimental utilizando 150 plantas procedentes de los jardines botánicos de Bonn y Goteborg, pero fracasó.

El futuro del árbol toromiro depende de promover y mantener la colaboración entre los jardines botánicos que mantienen existencias, y las autoridades de conservación de Chile y de la Isla Oriental. Un proyecto como éste de conservación de una sola especie, sólo tendrá éxito si se integra dentro de temas más amplios de planificación de un área protegida y la restauración del hábitat. Esto a su vez tiene que situarse en el contexto de las necesidades económicas y sociales que prevalecen en la isla. La Isla Oriental tiene una población de 2.800 personas, de modo que cualquier programa de reintroducción que se plantee debe tener en cuenta los puntos de vista y opiniones de los isleños. Además, la reintroducción programada y el programa de restauración trabajarán con la limitación de que la degradación del hábitat en la Isla Oriental ha sido tan profunda que el establecimiento natural de los árboles de toromiro ya no es factible. Los esfuerzos se centrarán inicialmente en el establecimiento de bancos de germoplasma en campos de cultivo y evaluar la capacidad de los hábitats restaurados de la isla para sostener las poblaciones reintroducidas.

El Toromiro es uno de los pocos ejemplos del almacenamiento y cultivo *ex situ* que ha evitado (o retrasado) la extinción de una especie arbórea. Pero también es un ejemplo de lo difícil que es reinstalar un componente de la flora una vez que las asociaciones y el hábitat de la especie han sido alterados. Es de esperar que el árbol toromiro pronto forme parte de la herencia biológica y cultural de la Isla Oriental.

Basado en Maunder (1997) y Maunder *et al.* (1999)

La función inmediata de la conservación *ex situ* de árboles raros y en peligro está más en la investigación y la educación *per se* (véase la Sección 5.7). Esta función es absolutamente fundamental si queremos tener conocimientos sobre poblaciones vegetales al borde de la extinción que proporcionen una base suficiente para su manejo. Este punto se trae a colación de forma algo patética al considerar las zonas tropicales húmedas, cuya diversidad de especies está en el máximo. Allí, las especies perennes de vida prolongada, están en mayoría, haciendo más fácil su cultivo, pero pocas plantas poseen semillas con latencia y muchas son de un tamaño impresionante. El conocimiento de las exigencias del cultivo de la minoría es inexistente. Es indudable que la conservación *ex situ* no puede ser un fin en sí mismo en tales circunstancias (Ashton 1988).

Como hemos dicho a lo largo de estas tres guías, los métodos *ex situ* son complementarios de la conservación *in situ*, y no una alternativa. Naturalmente, continúa siendo un hecho que especies arbóreas, poblaciones y alelos se están extinguiendo en las áreas silvestres y algunas pueden y deben conservarse *ex situ*. Cuando la extinción en estas áreas se convierta en una realidad los medios para controlar la selección artificial se reducen grandemente, y ya no se dispondrá de la posibilidad de reintroducir los alelos perdidos en el cultivo. No obstante, la conservación *ex situ* debe juzgarse con frecuencia preferible a la pérdida (Raven 1976). En estos casos, una estrategia de conservación para una especie, población o carácter, de un árbol determinado, requiere un método holístico que combine las diferentes técnicas disponibles de conservación *ex situ* e *in situ*. La selección de los métodos apropiados debe basarse en una variedad de criterios, incluyendo la biología de la especie en cuestión (Engels y Wood 1999), la posibilidad práctica y la factibilidad del método escogido en particular, así como la rentabilidad y la seguridad proporcionada por su aplicación (Maxted *et al.* 1997).

CONCLUSIONES



por Alvin Yanchuk

La conservación *ex situ* e *in situ* – gestión de un todo continuo de diversidad genética

La conservación *ex situ* continuará siendo una parte importante del mantenimiento y manejo de los recursos genéticos forestales. Al igual que con cualquiera de los métodos de conservación genética, no todos los aspectos pueden abarcarse con un solo método; cada uno ha de evaluarse respecto a los objetivos de los esfuerzos de conservación, las limitaciones biológicas de las especies y las limitaciones de organización.

La variación genética está en el fondo afectada por los genes, que varían en sus frecuencias dentro de y entre poblaciones. Sin embargo, esta variación es normalmente gradual a lo largo de la distribución de una especie, de modo que la diversidad genética es normalmente un todo continuo de variación y la terminología de la conservación *ex situ* o *in situ* debe servir únicamente para orientarnos con respecto a algunos de los objetivos generales de conservación y manejo de cada método. Por ejemplo, hemos visto que la conservación *ex situ* (“fuera de su lugar”) puede ser estática y dinámica (o “evolutiva”), puede recogerse un número grande o pequeño de genotipos, las poblaciones pueden gestionarse *in situ* mediante varios métodos, la semilla se puede almacenar, y así sucesivamente, pero todo ello debe conducir a una cierta meta de conservación que pueda alcanzarse realmente.

El futuro de la conservación genética de los árboles forestales

Es bien sabido que la silvicultura continuará siendo empujada hacia terrenos más marginales, porque la población de la Tierra crece y los terrenos de mayor calidad se usan para cultivos agrícolas o se convierten para usos urbanos. Habrá que encontrar diferentes especies y poblaciones de árboles que estén bien adaptados a estos sitios marginales. El ensayo de especies y procedencias, los programas de pre-mejoramiento genético o mejoramiento tendrán que producir diferentes poblaciones de árboles que estén adaptados a condiciones climáticas y edáficas muy diferentes. Si los panoramas proyectados de cambio climático para muchas partes del mundo durante los próximos 100 años se realizan, esto incrementará la velocidad de los cambios en las áreas de bosques. Necesitaremos desarrollar una nueva dimensión para nuestra programación y manejo de los recursos genéticos forestales. La única forma de lograrlo es tener acceso a una amplia variedad de diversidad genética, con información apropiada sobre la distribución de las especies, los modelos de variación genética y el conocimiento críticamente importante de la biología de las mismas (por ejemplo, métodos reproductivos, características de su historia vital, potencial adaptativo y productiva en diversos climas). En este sentido, la investigación continuará siendo una parte importante de nuestra capacidad para gestionar en el futuro los recursos genéticos forestales. Para especies sobre las que podemos iniciar algunos tipos de estudios, ya sea con experimentos de genética molecular o ensayos comunes de invernadero inter e intraespecíficos, que

desarrollen algunas oportunidades de premejora o mejoramiento genético, podemos tener que centrarnos en el mantenimiento de los rendimientos o productos de los árboles, más que en la finalidad convencional de mejorar u optimizar los rendimientos. Por ejemplo, las mejoras marginales de algunos caracteres, como la supervivencia o la resistencia a las plagas, pueden ser más importantes que las mejoras de crecimiento. Incluso estrategias simples de selección, como la selección fenotípica, aunque menos eficientes, suelen ser más eficaces porque son más sencillas de realizar y se seleccionan valores locales. Después de todo, ésta fue la base de el mejoramiento genético de los cultivos hasta hace más o menos 100 años. Análogamente, para poblaciones *in situ*, su pertinencia en un escenario de rápido cambio climático puede ser importante también en cualquier otro lugar; por ello, puede ser conveniente crear programas que puedan comprobar tales problemas a futuro.

A lo largo de estos tres volúmenes, hemos hecho también hincapié en la necesidad de involucrar a los usuarios locales de los recursos forestales, como un medio importante de ayudar a la conservación de los recursos genéticos forestales. Los programas que aspiran a distribuir material vegetal a la población local que se beneficiará de las especies y su manejo, se ha comprobado que son un enlace fundamental en una conservación genética exitosa de los árboles forestales. Este método no sólo asegura que se da una oportunidad a la gente para que identifique sus propias necesidades en los programas de plantación, sino que puede también ampliar el potencial para crear con el tiempo una variación entre poblaciones, porque puede haber diferentes presiones de selección para las condiciones o los caracteres ambientales. Muchos recursos genéticos importantes de cultivos agrícolas y animales se están conservando mediante tal uso local y la conservación en la “finca agrícola”. Aunque esto puede no ser directamente aplicable a corto plazo a los árboles forestales, nuestro conocimiento de los valores de los caracteres deseables (como el crecimiento y la adaptabilidad) se refiere a la actualidad, no al futuro desconocido, por lo cual es necesario mantener una base de variación en el caso de que cambien estos valores de los caracteres.

Durante la última década, ha habido un tremendo desarrollo del interés por la conservación de los recursos genéticos forestales (p.ej. OIMT 2000). Nosotros hemos podido únicamente señalar en estos tres libros guía algunos ejemplos de las iniciativas en marcha, pero esperamos que proporcionen al lector una visión general de las necesidades, métodos, enfoques y ejemplos de cómo y dónde los recursos genéticos pueden conservarse y se están conservando.



REFERENCIAS

- Adams, R.P. 1997. Conservation of DNA: DNA banking. Pp. 163–174 *in* Biotechnology and Plant Genetic Resources: Conservation and Use (J.A. Callow, B.V. Ford-Lloyd and H.J. Newbury, eds.). CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Allard, R.W. 1960. Principles of Plant Breeding. Wiley, New York.
- Arahana, V.S., G.L. Graef, J.E. Specht, J.R. Steadman and K.M. Eskridge. 2001. Identification of QTL's for resistance to *Sclerotinia sclerotiorum* in soybean. *Crop. Sci.* 41:180–188.
- Ashmore, S. 1997. Status report on the development and application of *in vitro* techniques for the conservation and use of plant genetic resources. IPGRI, Rome, Italy.
- Ashton, P.M.S., S. Gamage, I.A.U.N. Gunatillekke and C.V.S. Gunatillekke. 1997. Restoration of a Sri Lanka rainforest: using Caribbean pine *Pinus caribaea* as a nurse for establishing late-successional tree species. *J. Appl. Ecol.* 34:915–925.
- Ashton, P.S. 1988. Conservation of biological diversity in botanical gardens. Pp. 269–278 *in* Biodiversity (E.O. Wilson, ed.). National Academy Press, Washington, DC, USA.
- Barner, H. 1975. Identification of sources for procurement of reproductive materials. Pp. 42–64 *in* Report on FAG/DANIDA Training Course on Forest Seed Collection and Handling, Vol. 2. FAO of the United Nations, Rome, Italy.
- Baron J.H. and W.E. Siebeck. 1994. Material Transfer Agreements in Genetic Resources Exchange: The case of the International Agricultural Research Centres. *Issues in Genetic Resources No.1*. IPGRI, Rome, Italy.
- Bawa, K.S. and P S. Ashton. 1991. Conservation of rare trees in tropical rain forests: a genetic perspective. Pp. 62–71 *in* Genetics and Conservation of Rare Plants (D.A. Falk and K.E. Holsinger, eds.). Oxford University Press, New York, USA.
- Berjak, P. and D. Dumet. 1996. Cryo-preservation of seeds and isolated embryonic axes of neem (*Azadirachta indica*). *Cryo-Letters* 17:99–104.
- Berjak, P. and N.W. Pammenter. 1994. Recalcitrance is not an all-or-nothing situation. *Seed Sci. Res.* 4:263–264.
- Berjak, P., D. Mycock, J. Wesley-Smith, D. Dumet and P. Watt. 1996. Strategies for *in vitro* conservation of hydrated germplasm. Pp. 19–52 *in* International Workshop on *In vitro* Conservation of Plant Genetic Resources. Universiti Kebangsaan, Malaysia and IPGRI, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Bigot, C. 1987. *In vitro* manipulation of higher plants: some achievements, problems and perspectives. Pp. 5–17 *in* Cell Culture Techniques Applied to Plant Production and Plant Breeding (J. Boccon-Gibod, A. Benbadis and K.C. Shont, eds.). Proceedings of IAPTC French–British Meeting, 8–9 October, Angers, France.
- Brown, A.D.H. and C.M. Hardner. 2000. Sampling the gene pools of forest tree species for *ex situ* conservation. Pp. 185–196 *in* Forest Conservation Genetics—Principles and Practice (A. Young, D. Boshier and T. Boyle, eds.). CSIRO Publishing, Collingwood, Australia and CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Burdon, R.D. 1988. Recruitment for breeding populations: objectives, genetics and implementation. Pp. 555–572 *in* Proceedings of the Second International Conference on Quantitative Genetics (B.S. Weir, E.J. Eisen, M.M. Goodman and G. Namkoong, eds.). Sinauer Associates, Sunderland, MA, USA.

- Burdon, R.D. 1995. Future directions in tree breeding: some questions of what we should seek, and how to manage the genetic resource. Pp. 24–39 in Proceedings of the 25th Meeting of the Canadian Tree Improvement Association, Part 2. CTIA/WFGA Conference “Evolution and Tree Breeding” (J. Lavereau, ed.). Victoria, B.C., Canada, 28 August–1 September 1995.
- Burnham, C.R. 1990. Restoring the American chestnut. *Diversity* 6:34–36.
- Byram, T.D., W.J. Lowe and G.D. Gooding. 1998. Western Gulf forest tree improvement program gene conservation plan for loblolly pine. *Forest Genetic Resources* 27:55–59.
- CAMCORE. 2000. Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Co-operative. CAMCORE Co-operative, North Carolina State University, Raleigh, USA.
- CBD. 2001. Bonn Guidelines on Access to Genetic Resources and Fair and Equitable Sharing of the Benefits Arising from their Utilization. Convention on Biological Diversity, Bonn, Germany.
- Chin, H.F. 1988. Recalcitrant Seeds: A Status Report. IPGRI, Rome, Italy.
- Cohen, J.I., J.T. Williams, D.L. Plucknett and H. Shands. 1991. *Ex situ* conservation of plant genetic resources: Global development and environmental concerns. *Science* 253: 866–872.
- Côme, D. 1983. Post harvest physiology of seeds as related to quality and germinability. Pp. 165–190 in *Post-harvest Physiology and Crop Preservation* (M. Lieberman, ed.). Plenum Press, New York, USA.
- Conway, W. 1988. Can technology aid species preservation? Pp. 263–268 in *Biodiversity* (E.O. Wilson, ed.). National Academy Press, Washington, DC, USA.
- Corbineau, F. and D. Côme. 1986. Experiments on the storage and seedlings of *Symphonia globulifera* L.f. (*Guttiferae*). *Seed Sci. Technol.* 14:585–591.
- Cotterill, P.P. and J.W. James. 1984. Number of offspring and plot sizes required for progeny test. *Silvae Genet.* 33:203–209.
- Cromarty, A.S., R.H. Ellis and E.H. Roberts. 1982. The Design of Seed Storage Facilities for Genetic Conservation. Handbooks for Genebanks No 1. International Board for Plant Genetic Resources, Rome, Italy.
- DeVerno, L.L. and A. Mossler. 1997. Genetic variation in red pine (*Pinus resinosa*) revealed by RAPD and RAPD-RFLP analysis. *Can. J. For. Res.* 27:1316–1320.
- El-Kassaby, Y.A. 2000. Representation of Douglas-fir and western hemlock families in seedling crops as affected by seed biology and nursery crop management practices. *For. Genet.* 7:305–315.
- Ellis, R.E., T.D. Hong and E.H. Roberts. 1985a. Handbook of Seed Technology for Genebanks. Vol. I: Principles and Methodology. Handbooks for Genebanks No 2. International Board for Plant Genetic Resources, Rome, Italy.
- Ellis, R.E., T.D. Hong and E.H. Roberts. 1985b. Handbook of Seed Technology for Genebanks. Vol. II: Compendium of Specific Germination Information and Test Recommendations. Handbooks for Genebanks No 3. International Board for Plant Genetic Resources, Rome, Italy.
- Ellis, R.E., T.D. Hong and E.H. Roberts. 1988. A low-moisture-content limit to the logarithmic relation between seed moisture and longevity in twelve species. *Ann. Bot.* 63:601–611.
- Ellis, R.E., T.D. Hong and E.H. Roberts. 1990. An intermediate category of seed storage behaviour? I. Coffee. *J. Exp. Bot.* 41:1167–1174.
- Ellis, R.E., T.D. Hong and E.H. Roberts. 1991. An intermediate category of seed storage behaviour? II. Effects of provenance, immaturity and imbibition on desiccation tolerance in coffee. *J. Exp. Bot.* 42:653–657.
- Engelmann, F. 1997. *In vitro* conservation methods. Pp. 119–162 in *Biotechnology and Plant Genetic Resources: Conservation and Use* (B.V. Ford-Lloyd, J.H. Newbury, and J.A. Callow eds.). CABI Publishing, Wallingford, UK.

- Engelmann, F. and Engels J. 2002. Technologies and Strategies for *ex situ* Conservation. Pp. 89-103 *in* Managing Plant Genetic Diversity. (J.M.M. Engels, V. Ramanatha Rao, A.H.D. Brown and M.T. Jackson, eds.). CAB International Wallingford, UK and IPGRI, Rome, Italy.
- Engels, J.M.M. and D. Wood. 1999. Conservation of agrobiodiversity. Pp. 355–386 *in* Agrobiodiversity: Characterization, Utilization and Management (D. Wood and J.M. Lenné eds.). CABI Publishing, Wallingford, UK.
- FAO. 1985. Informe Final del Proyecto FAO/PNUMA sobre Conservación de Recursos Genéticos Forestales. FAO de las Naciones Unidas, Roma, Italia.
- Departamento de Montes de la FAO. 1986. Libro de Datos sobre Especies Amenazadas de Árboles y Arbustos y sus Procedencias. FAO de las Naciones Unidas, Roma, Italia.
- FAO. 1992. Establecimiento y manejo de rodales de conservación *ex situ*. Recursos Genéticos Forestales 20:7–10.
- FAO. 1993. Almacenamiento *ex situ* de semillas, polen y cultivos *in vitro* de especies vegetales leñosas perennes. Estudio FAO 113. FAO de las Naciones Unidas, Roma, Italia.
- FAO. 1996. Informe sobre el Estado de los Recursos Fitogenéticos Mundiales para la Agricultura y la Alimentación. FAO de las Naciones Unidas, Roma, Italia.
- FAO/IPGRI. 1994. Normas de Bancos de germoplasma. FAO de las Naciones Unidas e IPGRI, Roma, Italia.
- Fu, Y.B. 2003. On implementation of incomplete block designs in forest genetic field trials. *For. Genet.* 10:23–33.
- Gapare, W.J. 2003. Genetic diversity and spatial populations structure of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.): Implications for gene conservation of a widespread species. Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Canada.
- Gérard, J., A. Edi Kouassi, C. Daïgremon, P. Détienne, D. Fouquet and M. Vernay. 1998. Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains. Série FORAFRI, document 11, CIRAD-Forêt, Montpellier, France.
- Guldager, P. 1975. *Ex situ* conservation stands in the tropics. Pp. 85-92 *in* The methodology of conservation of forest genetic resources. FO:MISC/75/8. FAO of the United Nations, Rome, Italy.
- Hanson, J. 1985. Procedures for Handling Seeds in Genebanks. Practical Manuals for Genebanks No 1. International Board for Plant Genetic Resources, Rome, Italy.
- Hanson, L. 2001. Chromosome number, karyotype and DNA C-value of the Wollemi pine (*Wollemia nobilis*, Araucariaceae). *Bot. J. Linn. Soc.* 135:271–274.
- Harkins, D.M., G.N. Johnson, P.A. Skaggs, A.D. Mix, G.E. Dupper, M.E. Devey, B.B. Kinloch Jr and D.B. Neale. 1998. Saturation mapping of a major gene for resistance to white pine blister rust in sugar pine. *Theor. Appl. Genet.* 97:1355–1360.
- Hay, F. and R. Probert. 2000. Keeping seeds alive. Pp. 375–410 *in* Seed Technology and its Biological Basis (M. Black and J.D. Bewley, eds.). Sheffield Academic Press, Sheffield, UK.
- Hedrick, P.W. 2004. Recent developments in conservation genetics. *For. Ecol. Manage.* 197:3–19.
- Hoekstra, F.A. 1995. Collecting pollen for genetic resources conservation. Pp. 527–550 *in* Collecting Plant Genetic Diversity: Technical Guidelines (L. Guarino, V.R. Rao and R. Reid, eds.). IPGRI/FAO/UNEP/IUCN. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Hong, T.D. and R.H. Ellis. 1996. A protocol to determine seed storage behaviour. *In* IPGRI Technical Bulletin: No. 1 (J.M.M. Engels and J. Toll, eds.). IPGRI, Rome, Italy.
- Hong, T.D., S. Linington and R.H. Ellis. 1996. Seed Storage Behaviour: a Compendium. Handbooks for Genebanks No. 4. IPGRI, Rome, Italy.

- Hu, J., C.G. Guo and S.X. Shi. 1994. Partial drying and post-thaw conditioning improve the survival and germination of cryo-preserved seeds of tea (*Camellia sinensis*). IPGRI/FAO Plant Genetic Resources Newsletter 98:25–28.
- IPGRI. 1996. Programme activities, germplasm maintenance and use. Pp. 56–65 in Annual Report. IPGRI, Rome, Italy.
- ITTO. 2000. Planning Practical and Cost-Effective Strategies for Genetic Resource Conservation of Commercial Tree Species in Tropical Asia and the Pacific. International Tropical Timber Organization, Yokohama, Japan.
- IUCN (UICN). 1999. Species amenazadas. Conservación Mundial 3–4:12.
- Johnson, G.R. 1997. Site-to-site genetic correlations and their implications on breeding zone size and optimum number of progeny test sites for coastal Douglas fir. *Silvae Genet.* 46:280–285.
- Johnson, G.R., N.C. Wheeler and S.H. Strauss. 2000. Economic feasibility of marker-aided selection in Douglas fir. *Can. J. For. Res.* 30:1942–1952.
- Johnson, R., B. St. Clair and S. Lipow. 2001. Genetic conservation in applied tree breeding programs. Pp. 215–230 in Proceedings of the International Conference on *Ex Situ* and *In Situ* Conservation of Commercial Tropical Trees (B.A. Thielges, S. D. Sastrapradja and A. Rimbawanto, eds.). Gadjah Mada University, Yogyakarta, Indonesia and ITTO, Yokohama, Japan.
- Kanowski, P. 2001. *In situ* conservation: a broader vision for the 21st century. Pp. 11–36 in Proceedings of the International Conference on *Ex Situ* and *In Situ* Conservation of Commercial Tropical Trees (B.A. Thielges, S. D. Sastrapradja and A. Rimbawanto, eds.). Gadjah Mada University Yogyakarta, Indonesia and ITTO, Yokohama, Japan.
- King, J.N. and G.R. Johnson. 1993. Monte Carlo simulation models of breeding population advancement. *Silvae Genet.* 42(2–3):68–78.
- Kjær, E.D., L. Graudal and I. Nathan. 2001. *Ex situ* conservation of tropical trees. Strategies, options and constraints. Pp. 127–146 in Proceedings of the International Conference on *Ex Situ* and *In Situ* Conservation of Commercial Tropical Trees (B.A. Thielges, S. D. Sastrapradja and A. Rimbawanto, eds.). Gadjah Mada University Yogyakarta, Indonesia and ITTO, Yokohama, Japan.
- Krishnapillay, D.B. 2000. Attempts at conservation of recalcitrant seeds in Malaysia. *Forest Genetic Resources* 28:24–37.
- Kubisiak, T.L., F.V. Hebard, C.D. Nelson, J. Zhang, R. Bernatzky, H. Huang, S.L., Anagnostakis and R.L. Doudrick. 1997. Molecular mapping of resistance to blight in an interspecific cross in the genus *Castanea*. *Phytopathology* 87:751–759.
- Lambeth, C.C. 1980. Juvenile-mature correlations in *Pinaceae* and implications for early selection. *For. Sci.* 26:571–580.
- Lande, R. and G.F. Barrowclough. 1987. Effective population size, genetic variation, and their use in population management. Pp. 86–123 in *Viable Populations for Conservation* (M. Soulé, ed.) Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Libby, W.J. 2002. Forest plantation productivity. Working Paper FP/3, Forest Resources Department, FAO of the United Nations, Rome, Italy.
- Lipow, S.R., J.B. St. Clair and G.R. Johnson. 2002. *Ex situ* conservation for conifers in the Pacific Northwest. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-528. US Department of Agriculture, Forest Service, Portland, Oregon, USA.
- Lynch, M. 1996. A quantitative-genetic perspective on conservation issues. Pp. 471–501 in *Conservation Genetics: Case Studies from Nature* (J.C. Avise and J.L. Hamrick, eds.). Chapman & Hall, New York, USA.
- Magnussen, S. 1993. Design and analysis of tree genetic trials. *Can. J. For. Res.* 23:1144–1149.

- Marzalina, M. 1995. Penyimpanan biji benih mahogani (*Swietenia macrophylla* King). [Storage of mahogany seeds (*Swietenia macrophylla* King).] Ph.D. Thesis, University Kebangsaan, Malaysia.
- Marzalina, M., S.K. Yap and B. Krishnapillay. 1992. Effect of relative light intensities on *Dryobalanops aromatica* seedlings' growth. Pp. 439–440 in Proceedings of the National IRPA Seminar Vol. 11. (H.W. Ho, M.K. Vidyadran, A. Norhani, M.R. Jainudeen, and Rani Bahaman eds.). Intensification of Research in Priority Areas, Malaysia.
- Matheson C., D. Spencer and K. Eldridge. 1999. A workshop on issues and strategies to conserve the genetic resources of *Pinus radiata ex situ*. Forest Genetic Resources 27:75–78.
- Maunder, M. 1997. Conservation of the extinct toromiro tree. Curtis's Botanical Magazine 14:226–231.
- Maunder, M., A. Culham, A. Bordeu, J. Allainguillaumes and M. Wilkinson. 1999. Genetic diversity and pedigree for *Sophora toromiro* (*Leguminosae*): a tree extinct in the wild. Mol. Ecol. 8:725–738.
- Maxted, N., B.V. Ford-Lloyd, and J.G. Hawkes. 1997. Complementary conservation strategies. Pp. 15–39 in Plant Genetic Conservation: The *In situ* Approach. (N. Maxted, B.V. Ford-Lloyd and J.G. Hawkes, eds.). Chapman & Hall, London, UK.
- Muller-Starck, G. and R. Schubert (eds.). 2001. Genetic Responses of Forest Systems to Changing Environmental Conditions. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Namkoong, G. 1969. Non-optimality of local races. Pp. 149–153 in Proceedings of the 10th Southern Conference on Forest Tree Improvement, Houston, TX, USA.
- Namkoong, G. 1976. Multiple-index selection strategy. *Silvae Genet.* 25:199–201.
- Namkoong, G. 1984. A control concept of gene conservation. *Silvae Genet.* 33:160–163.
- Namkoong, G. 2003. Conservation and breeding of forest trees. *In the Encyclopedia of Life Support Systems, Volumes I, II, III*, (J.N. Owens, ed.). UNESCO, Paris, France and EOLSS Publishers, Oxford, UK .
- Namkoong, G., H.C. Kang and J.S. Brouard. 1988. Tree Breeding: Principles and Strategies. Springer-Verlag, New York, USA.
- Namkoong, G., R.C. Lewontin, and A.D. Yanchuk. 2004. Plant genetic resource management: the next investments in quantitative and qualitative genetics. *Gen. Resource. Crop Evol.*, 51:853–862.
- Nitsch, J.P. 1971. Perennation through seeds and other structures: fruit development. Pp. 413–501 in *Plant Physiology, a Treatise*, Vol. VIA (F.C. Steward, ed.). Academic Press, New York, USA.
- NRC 1991. Managing Global Genetic Resources—Forest Trees. National Research Council. National Academy Press, Washington, DC, USA.
- OECD. 2001. Scheme For the Control of Forest Reproductive Material Moving in International Trade. Organisation for Economic Co-operation and Development (<http://www.oecd.org/dataoecd/23/16/2734540.pdf>).
- Offord, C.A. and P.F. Meagher. 2001. Effects of temperature, light and stratification on seed germination of Wollemi pine (*Wollemia nobilis*, *Araucariaceae*). *Aust. J. Bot.* 49:699–704.
- Ouédraogo, A.S., K. Poulsen and F. Stubsgaard (eds.). 1996. Intermediate/recalcitrant tropical forest tree seeds. *In Proceedings of a Workshop on Improved Methods for Handling and Storage of Intermediate/Recalcitrant Tropical Forest Tree Seeds*, 8–10 June, Humlebaek, Denmark. IPGRI, Rome, Italy.
- Owens, J.N. and S.J. Morris. 1998. Factors affecting seed and cone development in Pacific silver fir (*Abies amabilis*). *Can. J. For. Res.* 28:1146–1163.

- Pence, V.C. 1995. Cryo-preservation of recalcitrant seeds. Pp. 29–52 *in* Biotechnology in Agriculture and Forestry Vol. 32. Cryo-preservation of Plant Germplasm I. (Y.P.S. Bajaj, ed.). Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Percy, R.E., K. Klimaszewska, and D.R. Cyr. 2000. Evaluation of somatic embryogenesis for clonal propagation of western white pine. *Can. J. For. Res.* 30:1867–1876.
- Plucknett, D.L., N.J.H. Smith, J.T. Williams and N.M. Anishetty. 1987. *Gene Banks and the World's Food*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA.
- Prance, G.T. 1997. The conservation of botanical diversity. Pp 3–14 *in* Plant Genetic Conservation. The *In Situ* Approach (N. Maxted, B.V. Ford-Lloyd and J.G. Hawkes, eds.). Chapman & Hall, London, UK.
- Ræbild, A. *et al.* 2003a–u. Evaluation of field trials in the Arid Zone Series. Trials nos. 1–15, 19–24. Results and documentation Nos. 2–15, 22, 23, 25–28, and 33. Danida Forest Seed Centre Humlebæk, Denmark.
- Ræbild, A. *et al.* 2004a–e. Evaluation of field trials in the Arid Zone Series. Trials nos. 16–18, 25–26. Results and documentation Nos. 24, 29–32. Danida Forest Seed Centre/Forest & Landscape, Hørsholm, Denmark.
- Rasmussen, D.C. and R.L. Phillips. 1997. Plant breeding progress and genetic diversity from *de novo* variation and elevated epistasis. *Crop Sci.* 37:303–310.
- Raven, P.H. 1976. Ethics and attitudes. Pp. 155–179 *in* Conservation of Threatened Plants (J.B. Simmons, R.I. Beyer, P.E. Brandham, G.M. Lucas and V.T.H. Parry, eds.). Plenum Press, New York, USA.
- Raven, P.H. 1981. Research in botanical gardens. *Bot. Jahrb.* 102:52–72.
- Rogers, D.L., J.J. Vargas Hernández, A.C. Matheson and J.J. Guerra Santos. 2002. The Mexican island populations of *Pinus radiata*: an international expedition and on-going collaboration for genetic conservation. *Forest Genetics Resources* 30:23–26.
- Sacandé, M. 2000. Stress, Storage and Survival of Neem Seed. Ph.D. Thesis, Wageningen University, The Netherlands.
- Sacandé, M., D. Jøker, M.E. Dulloo and K.A. Thomsen. 2004. Comparative Storage Biology of Tropical Tree Seeds. IPGRI, Rome, Italy.
- Schlarbaum, S., S. Anagnostakis, and M.C. Morton. 1994. Evaluation of experimental chestnut plantings in eastern North America. Pp. 52–56 *in* Proceedings of the International Chestnut Conference (M.L. Double and W.L. MacDonald, eds.). West Virginia University Press, Morgantown, WV, USA.
- Schmidt, L. 2000. Guide to Handling of Tropical and Subtropical Forest Seed. Danida Forest Seed Centre, Humlebæk, Denmark.
- Sebbenn, A.M., A.C.S. Zanatto, L.C. Etori and O.J. Di Dio Jr. 2001. *Ex situ* genetic conservation of tree species at the São Paulo Forest Institute, Brazil. *Forest Genetic Resources* 29.
- Sedgley, M. and A.R. Griffin. 1989. *Sexual Reproduction of Seed Crops*. Academic Press, New York, USA.
- Sidiyasa, K., S.R. Gadas and N. Juliaty. 2001. Plantations in experimental forests for *ex situ* conservation. Pp. 535–542 *in* Proceedings of the International Conference on *Ex Situ* and *In Situ* Conservation of Commercial Tropical Trees (B.A. Thielges, S. D. Sastrapradja and A. Rimbawanto, eds). Gadjah Mada University, Yogyakarta, Indonesia and ITTO, Yokohama, Japan.
- Stern, K., and L. Roche. 1974. *Genetics of Forest Ecosystems*. Springer-Verlag, New York, USA.
- Subiakto, A., Hendromono and Sunaryo. 2001. *Ex situ* conservation of dipterocarp species in West Java and Banten. Pp. 183–192 *in* Proceedings of the International Conference on *Ex Situ* and *In Situ* Conservation of Commercial Tropical Trees (B.A. Thielges, S. D.

- Sastrapradja and A. Rimbawanto, eds). Gadjah Mada University, Yogyakarta, Indonesia and ITTO, Yokohama, Japan.
- Terborgh, J. 1990. Seed and fruit dispersal—commentary. Pp. 181–190 *in* Reproductive Ecology Of Tropical Forest Plants. Man and Biosphere Series, Vol. 7 (K.S. Bawa and M. Hadley, eds.). UNESCO, Paris, France.
- Theilade, I., S. Hald, A.D. Yanchuk, C.P. Hansen and L. Graudal. 2001. Practical experience with tropical pines. Pp. 193–206 *in* Proceedings of the International Conference on *Ex Situ* and *In Situ* Conservation of Commercial Tropical Trees (B.A. Thielges, S. D. Sastrapradja and A. Rimbawanto, eds). Gadjah Mada University, Yogyakarta, Indonesia and ITTO, Yokohama, Japan.
- Thomsen, K. 2000. Handling of desiccation and temperature sensitive tree seeds. Technical Notes Series 56. Danida Forest Seed Centre, Humlebæk, Denmark.
- Tompsett, P.B. 1992. A review of the literature on storage of dipterocarp seeds. *Seed Science and Technology* 20, 251–267.
- Towill, L.E. 1985. Low temperature and freeze/vacuum-drying preservation of pollen. Pp. 171–198 *in* Cryo-preservation of Plant Cells and Organs (K.K. Kartha, ed.). CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- UNEP (PNUMA). 1990. Grupo de trabajo *ad hoc* de expertos legales y técnicos sobre diversidad biológica. Grupo de Trabajo de Diversidad Biológica, No. 2/1/3.
- Vertucci, C. and E.E. Roos. 1993. Theoretical basis of protocols for seed storage. II. The influence of temperature on optimal seed levels. *Seed Sci. Res.* 3:201–213.
- Walters C., and J. Engels. 1998. The effects of storing seeds under extremely dry conditions. *Seed Science Reserach*, 8, Supplement No.1, pp 3–8.
- WCMC. 2001. Tree conservation database. World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, UK. www.unep-wcmc.org.
- White, E., J. Hunter, C. Dubetz, R. Brost, A. Bratton, S. Edes and R. Sahota. 2000. Microsatellite markers for individual tree genotyping: application in forest crime prosecutions. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 75:923–926.
- White, T.L. and G.R. Hodge. 1989. Predicting Breeding Values, with Applications in Forest Tree Improvement. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, USA.
- Wilcox, B.A. and D.D. Murphy. 1985. Conservation strategy: the effects of fragmentation on extinction. *Amer. Nat.* 125(6): 879–887.
- Withers, L.A. 1995. Collecting *in vitro* for genetic resources conservation. Pp. 511–515 *in* Collecting Plant Genetic Diversity (L. Guarino, R. Rao, and R. Reid, eds.). CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Withers, L.A. and F. Engelmann. 1998. *In vitro* conservation of plant genetic resources. Pp. 57–88 *in* Biotechnology in Agriculture (A. Altman, ed.). Marcel Dekker, New York, USA.
- Xie, C.-Y., B.P. Dancik and F.C. Yeh. 1992. Genetic structure of *Thuja occidentalis*. *Biochem. System. Ecol.* 20:433–441.
- Yanchuk, A.D. 2001a. A quantitative framework for breeding and conservation of forest tree genetic resources in British Columbia. *Can. J. For. Res.* 31:566–576.
- Yanchuk, A.D. 2001b. The role and implications of biotechnological tools in forestry. *Unasylva* 204(52): 53–61.
- Yeh, F.C. 1988. Isozyme variation of *Thuja plicata* D. Don in British Columbia. *Biochem. System. Ecol.* 16:373–377.
- Zobel, B. and J. Talbert. 1984. Applied Forest Tree Improvement. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Zobel, B.J. and J.P. van Buijtenen. 1989. Wood Variation: Its Causes and Control. Springer-Verlag, Berlin, Germany.



SIGLAS Y ABREVIATURAS

ACF	Fundación del Castaño Americano
ADN	ácido deóxidoribonucleico
ATM	acuerdo sobre transferencia de material
BCA	bloque completo al azar
BCFS	Servicio Forestal de la Columbia Británica
BIC	bloque incompleto
CAMCORE	Cooperativa de Recursos de Coníferas de Centro América y México
CDB	Convenio sobre Diversidad Biológica
CGIAR	Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional
CSFD	Centro de Semillas Forestales de Danida
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FLD	Bosque y Paisaje de Dinamarca
FNCRDC	Centro de Investigación y Desarrollo sobre Conservación Forestal y de la Naturaleza
G x E	genotipo x ambiente
GPS	sistema de posicionamiento global
INIBAP	Red Internacional para la Mejora del Banano y el Plátano
IPGRI	Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos
IUFRO	Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal
NBPGR	Agencia Nacional de Recursos Fitogenéticos
NRC	Consejo Nacional de Investigación
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
OIMT	Organización Internacional de Maderas Tropicales
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente
RBG	Royal Botanic Gardens (Jardines Botánicos Reales)
RCP	reacción en cadena de la polimerasa
SCD	Departamento de Conservación de Semillas
SIG	sistema de información geográfica
SMPM	sistema de mejoramiento genético de poblaciones múltiples
STS	sitio marcado en la secuencia
UICN	Unión Mundial para la Conservación
WCMC	Centro Mundial de Conservación y Vigilancia



ÍNDICE

A

<i>Abies</i>	19
<i>Acacia</i>	22, 23, 63
aclareo	
aclareo natural	35
aclareo sistemático	6, 42
actividades de mejoramiento genético de árboles	4
almacenamiento de ADN	61
almacenamiento ultraseco de semilla	55
áreas protegidas	33, 43, 48
Argelia	14
Argentina	23
<i>Artocarpus</i>	38
Australia	12, 13, 20, 36
<i>Azadirachta</i>	54, 58

B

bancos clonales o archivos clonales	6, 7, 12, 31
biblioteca de genes	51, 63
biotecnología	31, 62, 85
Brasil	23, 47
Burkina Faso	23
Burseraceae	62

C

cambio climático	1, 67, 68
Camerún	14
capacidad institucional	
véase también recursos	2, 3, 7
<i>Castanea</i>	29
cerramiento	36, 41
Chile	13, 23, 24, 64, 65
<i>Cocos</i>	38
coincidencias climáticas	34
conservación	
brinzales	59
estática	5, 6, 42
evolutiva	5, 6
<i>in vitro</i>	51, 58, 60, 62, 63
Convenio sobre la Diversidad Biológica	37, 56, 77
Cooperativa de Recursos de Coníferas de Centro América y México (CAMCORE)	46, 63, 77
coordenadas del sistema de información geográfica (SIG)	16

<i>Cryphonectria</i>	29
cultivos nodriza	37, 46
<i>Cupressus</i>	14
D	
deforestación	14, 51
desarrollo del fruto	53
dipterocarpos	42, 43, 45, 48, 54, 55
<i>Dipterocarpus</i>	43, 54
diseño factorial	27
diversidad de especies	65
diversidad genética	1, 2, 4, 7, 15, 31, 41, 42, 45, 60, 67, 86
documentación	12, 16, 17, 40, 64
domesticación	6, 34, 62
<i>Dryobalanops</i>	43, 59
E	
ecosistemas	4, 15, 22, 29, 47, 48, 51, 53, 57
ecotipos locales	22, 26
edad de rotación	35, 87
edad de selección	25
ensayo de progenies	24, 26, 30
ensayos de campo	19, 20, 24, 26, 28, 32
ensayos de procedencia	5, 21, 26, 34
erosión	39
<i>Esenbeckia</i>	47
especies arbóreas	
véase también especies de árboles forestales	19, 21, 22, 29, 31, 33, 34, 37, 46, 48, 51, 52, 54, 63, 65
especies de plantación	36
especies exóticas	13, 21, 22
introducción	24
naturalizadas	21
especies pioneras	19, 46, 47
especies tropicales	13, 47, 52, 54
especies últimas de la sucesión	46
establecimiento y manejo de rodales de conservación ex situ	42
estrategias de recolección	9
estudios genéticos	21
EUA	63
<i>Eucalyptus</i>	25, 36
F	
financiación	
véase también recursos	3, 4, 12, 47, 56
forma de los árboles	31
<i>Fraxinus</i>	53
G	
genes	3-6, 10, 12-16, 20-22, 25, 28, 31, 32, 34, 35, 42, 45, 61-63, 67, 87
<i>Genipa</i>	47

genotipos	3-6, 11, 12, 2025, 26, 29, 37, 38, 40, 59, 62, 63, 65, 67, 88
<i>Guazuma</i>	47
H	
<i>Hevea</i>	33, 63
<i>Hopea</i>	43, 54
I	
identidad de la descendencia de un solo árbol	4, 38
identificación clonal	31
<i>Ilex</i>	53
India	23, 33, 63
Indonesia	42, 45, 48
injertado	19
interacciones genotipo x ambiente	6, 25, 40
intracruzamiento	10, 11, 28, 29, 30, 35, 88
Isla de Cedros	13
Isla de Guadalupe	22
Isla Oriental (Rapa Nui)	64
Israel	23
J	
jardines botánicos	14, 33, 56, 64, 65
jerarquía genética	3
L	
latencia	53, 55, 65, 88
limpia	41
M	
Malasia	59
<i>Malaus</i>	38
marcadores moleculares	3, 15, 31
material vegetal	33, 60, 62, 68
distribución a la población local	68
transporte humano	33
mejoramiento genético de rescate	29
Meliaceae	62
México	12, 23, 47
monocultivos	36, 37, 41, 46
muestreo	1-4, 7, 9-16, 22, 23, 26, 28, 31, 35, 56
<i>Myracrodruon</i>	47
N	
<i>Neobalanocarpus</i>	59
Níger	23
nivel de ploidía	11
Nueva Zelanda	12, 13, 20
O	
Orange plc	56
organismos internacionales	47

P		
países áridos y semiáridos		23
Pakistán		23
<i>Peltophorum</i>		47
Perú		23
<i>Picea</i>		15, 16, 63
picos cornudos		62
pinos tropicales		41, 42, 44, 45, 48, 63
<i>Pinus</i>	12, 13, 15, 20-22, 36, 37, 44, 63	
plagas y enfermedades		30, 31, 42, 61, 68
plantación complementaria		40, 41
polen	13, 14, 21, 27, 34, 35, 43, 44, 46, 51, 60, 62	
presevación del hábitat		62
procedencia	3-7, 9, 10, 17, 21-26, 32, 34, 44, 47, 51, 63, 67, 89	
programas de plantación		4, 5, 42, 48, 58, 68
propagación vegetativa		5, 11
<i>Prosopis</i>		22, 23, 38

Q		
<i>Quercus</i>		54, 62

R		
reacción en cadena de la polimerasa (RCP)		61, 77
recursos		
aporte continuo		4
disponibilidad		3
recursos genéticos	1, 2, 9, 10, 12, 19, 29, 33, 34, 36, 37, 44-48, 51, 67, 68, 86	
conservación mediante uso local		68
reforestación		4, 9, 14, 17, 49, 59
regeneración		
natural		5, 37, 43, 46, 49
periódica		62
reproducción vegetativa		3, 20, 89
resistencia a plagas y enfermedades		37
retrocruzamiento		29-31, 89
riqueza alélica		16
rodiales		
características generales		16
composición por especie		36
composición mixta		36
conservación genética		4
demarcación		40
finalidad		33
véase también rodales de conservación ex situ	6, 33, 34, 36, 37, 38, 40-48, 51	

S		
selección		
artificial		20, 21, 61, 65
asistida con marcador		31
fenotípica		20, 68

natural	5, 6, 21, 42, 61
semilla	
almacenamiento	54, 55, 57, 58, 62
conservación	55, 56, 63
longevidad	54, 63
manipulación	7, 38, 46, 52, 54, 55, 58, 63
ortodoxas	51, 52, 53, 55, 57, 62, 63
recalcitrante	46, 52-54, 55, 57, 58, 60
Senegal	23
sensibilidad a la temperatura	54
<i>Seychelles</i>	14
<i>Shorea</i>	43, 54
silvicultura	3, 19, 25, 33, 36, 48, 62, 67
simbiontes	62
<i>Sophora toromiro</i>	63, 64
Sri Lanka	37
sublíneas	29
Sudán	23
<i>Swietenia</i>	58
<i>Symphonia</i>	59
T	
tamaño de la población	11, 20, 21, 34
<i>Tectona</i>	33
<i>Theobroma</i>	63
<i>Thuja</i>	21
tolerancia a la desecación	54, 55, 58
Tratado Internacional sobre Recursos Fitogenéticos para la Agricultura y la Alimentación	37
V	
variación clinal	9
variación ecotípica	9
variación genética	
adaptativa	10, 11, 26, 36
intraespecífica	1, 4, 90
variaciones fenotípicas	1
<i>Vateriopsis</i>	14
<i>Vatica</i>	54
Vietnam	59
W	
Wellcome Trust	56
Western Gulf Improvement Cooperative	12
<i>Wollemia</i>	20
Y	
Yemen	23
Z	
zonas ecogeográficas	11

GLOSARIO de términos técnicos

ACCESIÓN Una muestra de planta o semilla, estirpe o población, mantenida en un banco de germoplasma o programa de mejoramiento genético para conservación y uso.

ACLAREO Extracción gradual de árboles en espesura densa o que dan sombra a especies o individuos preferentes.

AGROSILVICULTURA. Sistema de manejo de recursos naturales que, mediante la integración de los árboles en las fincas agrícolas y en el territorio agrícola, diversifica y sostiene la producción para obtener mayores beneficios sociales, económicos y ambientales para los usuarios del terreno en todos los niveles.

ALELO Forma alternativa de un gen. Los alelos están situados en los correspondientes loci de cromosomas homólogos. Tienen diferentes efectos sobre el mismo carácter o procesos de desarrollo y pueden mutar de uno a otro. Pueden afectar al fenotipo, cuantitativa o cualitativamente.

ALMACENAMIENTO ULTRASECO Una alternativa de “bajo costo” al almacenamiento convencional de la semilla en frío. Las semillas se almacenan en contenedores cerrados herméticamente, a la temperatura ambiente, después de tratarlas para ajustar sus niveles de humedad. Éste no es tan eficaz como los métodos de bajas temperaturas para semillas que pueden soportarlas. Conviene considerarlo cuando la máxima longevidad no es importante y no se dispone fácilmente de instalaciones de refrigeración.

ÁRBOL PADRE Donante de polen o productor de óvulos.

ARCHIVO CLONAL Un archivo clonal (o banco clonal) es una colección de individuos genéticos que se mantienen para: (i) la producción comercial de propágulos, (ii) la ejecución de una estrategia de reproducción, (iii) conservación genética. Los individuos dentro de un banco clonal se pueden producir a partir de semillas, pero lo más corriente son injertos, mediante los cuales, el tallo o vástago procedente del genotipo seleccionado en un ensayo genético, ha sido injertado en una cepa de raíz juvenil en el vivero, antes de plantarlo en el banco clonal. Es corriente que haya múltiples copias (ramets) de cada clon y éstas se suelen plantar adyacentes entre sí, dentro del banco clonal.

AUTOFECUNDACIÓN Polinización con polen procedente de la misma flor o planta.

BANCO DE GERMOPLASMA Instalación en la que se almacena germoplasma en forma de semillas, polen o cultivos *in vitro*, o en el caso de bancos de germoplasma de campo, como plantas que se desarrollan en el campo.

BIOTECNOLOGÍA. (1) “Cualquier aplicación tecnológica que usa sistemas biológicos, organismos vivos o derivados de ellos, para hacer o modificar productos o procesos para



un uso específico” (Convenio sobre Diversidad Biológica). (2). “Interpretado en sentido limitado, una serie de diferentes tecnologías moleculares como la manipulación de genes y transferencia de genes, identificación del ADN y clonación de plantas y animales” (Declaración de FAO sobre biotecnología).

CAUDAL GENÉTICO Suma total de material genético de una población de intercruzamiento.

CLÍMAX Período de equilibrio que se alcanza como resultado de la reducción gradual de la tasa de desarrollo continuo en una comunidad vegetal. Se caracteriza por el hecho de que se mantiene por sí mismo. Las condiciones que crea son estables únicamente para la descendencia de su propia clase. Define la etapa terminal en la sucesión ecológica para un ambiente dado.

CLINAL Relativo a la variación de uno o más caracteres fenotípicos o frecuencias de alelos a través de un gradiente ambiental.

CONSERVACIÓN (DE RECURSOS GENÉTICOS) Manejo y uso humano de los recursos genéticos, de tal modo que puedan producir el máximo beneficio sostenible para las actuales generaciones, manteniendo al propio tiempo su potencial para atender las necesidades y aspiraciones de las generaciones futuras.

CONSERVACIÓN (DE UN RECURSO) Acciones y políticas que aseguran su disponibilidad y existencia continuadas.

CONSERVACIÓN GENÉTICA Todas las acciones dirigidas a asegurar la existencia, evolución y disponibilidad continuadas, de recursos genéticos.

CRIOCONSERVACIÓN Preservación o almacenamiento en temperaturas muy frías; (normalmente en nitrógeno líquido). Es una forma de conservación para algunas semillas y tejidos.

CRUZAMIENTO LEJANO Cruzamiento de plantas o animales sin relación genética; reproducción cruzada; reproducción lejana.

DERIVA GENÉTICA Cambio en la frecuencia de alelos de una generación a otra, dentro de una población, debido al muestreo de un número finito de genes, lo que es inevitable en todas las poblaciones de tamaño finito. Cuanto menor es la población, mayor es la deriva genética, con el resultado de que algunos alelos se pierden y la diversidad genética se reduce.

DIPLOIDE Estado en el que se contienen dos series completas de cromosomas.

DIVERSIDAD BIOLÓGICA Variedad de formas de vida, funciones ecológicas que desempeñan y diversidad genética que contienen (a veces, en forma abreviada, biodiversidad).

DIVERSIDAD GENÉTICA Suma total de las diferencias genéticas entre especies y dentro de ellas.

ECOSISTEMA Complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y microorganismos y su ambiente físico, que interactúan como una unidad funcional.

ECOTÍPICO Relacionado con la adaptación de una población o raza de un organismo a un hábitat determinado.

ECOTIPO LOCAL Una forma, prematura cultivada, de una especie de cultivo, que ha evolucionado a partir de una población silvestre y generalmente compuesta de una mezcla heterogénea de genotipos.

EDAD DE ROTACIÓN O TURNO Edad en la que un rodal forestal se considera maduro y listo para su aprovechamiento maderero.

ENCAPSULACIÓN Proceso de incluir material orgánico frágil en una cubierta protectora y nutritiva, normalmente de naturaleza semisólida. Se utiliza para la plantación o el traslado de embriones somáticos, ya sea individualmente o en filas.

ESPECIE PIONERA La primera especie o comunidad que coloniza o recoloniza un área desnuda o perturbada, iniciando con ello una nueva sucesión ecológica (empleado como sinónimo de especie colonizadora).

ESPECIES DE LAS FASES DE SUCESIÓN La estructura y composición de la vegetación cambia durante las etapas de sucesión, desde las especies vegetales pioneras, que colonizan en primer lugar una estación, normalmente después de una perturbación, a las especies vegetales climácicas, que se dan cuando la tasa de desarrollo de la vegetación disminuye para alcanzar condiciones más estables. La sucesión es con frecuencia direccional y a veces predecible, y, aunque definido en términos de la composición de especies, la sucesión está siempre acompañada por cambios en el medio ambiente (profundidad del suelo, nutrientes del suelo, características de luz, características nutritivas, etc.). Las especies de las fases de sucesión se encuentran durante el período de transición entre las dos condiciones extremas (vegetación que coloniza un hábitat recientemente expuesto, desprovisto de vida, o que ya ha sustentado vida, y el bosque clímax).

ESPECIES INDÍGENAS Especies existentes en una región o ambiente determinado y que se han originado allí naturalmente.

EX SITU (CONSERVACIÓN) Conservación de componentes de diversidad biológica fuera de sus hábitats naturales.

FENOTIPO Características observables de un individuo, resultantes de la interacción entre el genotipo y el ambiente en que se desarrolla.

FLUJO DE GENES Intercambio de genes entre poblaciones, debido a la dispersión de gametos o cigotos.

FRAGMENTACIÓN Proceso de transformación de grandes manchas continuas de bosque en una o más manchas menores, con la creación de áreas de discontinuidad geográfica.

GEN En el genoma de un organismo, una secuencia de nucleótidos (secuencia ADN) a la que se puede asignar una función específica.

GENÓMICA Estrategia de investigación que utiliza la caracterización molecular y la clonación de genomas completos para conocer la estructura, función y evolución de los genes y responder a cuestiones biológicas fundamentales.

GENOTIPO Suma total de la información genética contenida en un organismo, o la constitución genética de un organismo con respecto a uno o algunos loci de genes en consideración.

GERMOPLASMA Variabilidad genética total disponible para una población determinada de organismos, representada por el caudal de células germinales (células sexuales, esperma o huevo) o semillas vegetales. Usado también para describir las plantas, semillas u otras partes útiles en los esfuerzos de mejora fitogenética, investigación y conservación, cuando se mantienen con la finalidad de estudiar, ordenar o usar la información genética que poseen (lo mismo que los recursos genéticos).

HEREDABILIDAD Grado con que un carácter determinado está controlado por la herencia, lo contrario de estar controlado por factores no genéticos.

HETEROZIGOSIDAD Proporción de individuos heterocigóticos en un locus o de loci heterocigóticos en un individuo. He: heterocigocidad esperada; Ho: heterocigocidad observada.

HUELLA GENÉTICA Método de identificación que compara fragmentos de ADN. A veces se denomina tipografía del ADN.

IN SITU (CONSERVACIÓN) Conservación de ecosistemas y hábitats naturales y mantenimiento y recuperación de poblaciones viables de especies en sus ambientes naturales y, en el caso de especies domesticadas o cultivadas, en los ambientes en que han desarrollado sus propiedades distintivas.

IN VITRO Fuera del organismo, o en un ambiente artificial; literalmente “en vidrio”, por ejemplo en un tubo de ensayo.

INTRACRUZAMIENTO Apareamiento entre individuos que tienen uno o más antepasados en común, siendo la condición extrema la autofecundación, que se produce naturalmente en muchos vegetales.

ISOZIMA Formas múltiples de una sola enzima.

LATENCIA Período, en la vida de un animal o vegetal, durante el cual el crecimiento se hace más lento o cesa por completo.

LOCUS (PL. LOCI) Un segmento de ADN en un lugar determinado de un cromosoma determinado.

MARCADOR MOLECULAR Técnica de selección molecular de indicadores de ADN que permite la identificación de diferencias en las secuencias de nucleótidos del ADN en diferentes individuos.

OFICIAL FORESTAL: Término internacional para designar a un funcionario forestal superior, generalmente ingeniero o graduado universitario, en ciencias forestales.

PLAN DE MANEJO FORESTAL O PLAN DE TRABAJO: Plan para la regulación de todas las actividades forestales durante un período establecido de tiempo, mediante la aplicación de prescripciones que concretan las metas, acciones y medidas de control.

POBLACIÓN Grupo de individuos de la misma especie que ocupan un área definida y genéticamente aislada, en cierto grado, de otros grupos similares.

POLINIZADOR Organismo vivo que traslada el polen, por ejemplo insectos, pájaros o murciélagos.

POLIPLOIDE Organismo, tejido o células que tienen más de dos series completas de cromosomas.

PROCEDENCIA Origen geográfico o genético de un individuo.

PROGENIE Sinónimo de descendencia.

RECURSOS GENÉTICOS Valor económico, científico o social del material heredable contenido dentro de las especies y entre ellas.

REPRODUCCIÓN VEGETATIVA En las plantas, formación de un nuevo individuo a partir de un grupo de células, sin la producción de un embrión o semilla. Reproducción vegetativa, somática, no sexual de una planta, sin fertilización.

RETROCRUZAMIENTO Cruzamiento de un individuo con uno de sus padres o con un organismo genéticamente equivalente. La descendencia de tal cruzamiento se denomina generación de retrocruzamiento o progenie de retrocruzamiento.

SEMILLA INTERMEDIA La semilla que puede desecarse, aunque no a niveles tan bajos como la semilla ortodoxa y que es, con frecuencia, sensible al frío.

SEMILLA ORTODOXA Semilla que es tolerante a la desecación.

SEMILLA RECALCITRANTE Semilla que es sensible a la desecación, que almacenada se mantiene hidratada sólo en un corto período de vida que suele variar de algunos días a varios meses. El comportamiento recalcitrante de la semilla es predominante en especies arbóreas de zonas tropicales húmedas con grandes semillas (>3-5 g).

SITIO MARCADO EN LA SECUENCIA Secuencia corta y única de ADN que se puede amplificar mediante la reacción en cadena de la polimerasa y de este modo marcar en el sitio del cromosoma del que se amplificó.

TAMAÑO EFECTIVO DE UNA POBLACIÓN Número de individuos de una población ideal que tiene el mismo nivel de deriva genética e intracruzamiento que la población de la que procede.

TÉCNICAS DE ADAPTACIÓN DEL SITIO A LA ESPECIE Operación fundamental en silvicultura de plantaciones, que pretende verificar la compatibilidad de una especie (a veces una procedencia) con el sitio de plantación. Pueden adoptarse diferentes métodos: (i) ensayos de campo, (ii) recogida de datos de rodales naturales a fin de evaluar la semejanza de ambientes entre la fuente de la semilla y cualquier sitio candidato para plantación, y (iii) recogida de datos de plantaciones existentes para producir modelos de predicción de compatibilidad especie-estación.

VARIACIÓN GENÉTICA ADAPTATIVA Diferencia en el genotipo debida a la adaptación

de una población a los cambios en el medio ambiente a lo largo de generaciones. La adaptación está asociada (al menos en parte) con los cambios genéticos resultantes de la selección impuesta por el cambio del medio ambiente.

VARIACIÓN GENÉTICA INTRAESPECÍFICA Variación genética dentro de una especie.

VARIACIÓN GENÉTICA Variación debida a la contribución de la segregación de genes y de las interacciones de genes.



Forest & Landscape



Esta guía es el tercer volumen de una serie de tres que tratan de la conservación de los recursos genéticos forestales (árboles y arbustos). Este volumen trata de los requisitos técnicos y de algunos métodos y experiencias aplicados en la conservación y el manejo ex situ de los recursos genéticos forestales. Describe el papel de la conservación ex situ y analiza algunas de las estrategias que pueden emplearse, el desarrollo ordenado de las poblaciones ex situ, y también los métodos de almacenamiento, en el campo y en bancos de semillas, para los recursos genéticos ex situ. Con los Volúmenes 1 y 2, y con otras publicaciones que están tratando también temas de conservación genética forestal a nivel regional, esperamos haber podido proporcionar a los usuarios de estos manuales una visión de conjunto de los métodos de conservación que pueden utilizarse para el manejo de los recursos genéticos forestales en todo el mundo.