



Capítulo II.

RETOS QUE DEBEN AFRONTAR LOS BANCOS DE GERMOPLASMA COMO RECURSO PARA HACER FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

M^a José Díez^{1*}, Cristina Mallor², José Miguel Blanca¹ y Lucía De la Rosa³

- 1 Instituto de Conservación y Mejora de la Agrodiversidad Valenciana (COMAV). Universitat Politècnica de València.
- 2 Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Instituto Agroalimentario de Aragón IA2 (CITA - Universidad de Zaragoza).
- 3 Centro Nacional de Recursos Fitogenéticos (CRF), Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Alcalá de Henares, Madrid.

*Coordinador: mdiezni@btc.upv.es





CONTENIDO:

1. Introducción
2. Sabiendo qué está conservado, dónde está y cómo está
3. Asegurando el mantenimiento de los recursos fitogenéticos: racionalizando colecciones y estableciendo duplicados de seguridad.
4. Mejorando la documentación
5. Incrementando las colecciones
 - 5.1. Especies silvestres emparentadas con los cultivos
 - 5.2. Aumentando el rango de especies para la alimentación: incrementar y potenciar el uso de especies minoritarias e infrautilizadas
6. Colaborando en la caracterización y evaluación
7. Integrando los datos de secuenciación para facilitar el manejo de las colecciones de germoplasma
8. Facilitando el acceso a los recursos fitogenéticos
9. Agradecimientos
10. Bibliografía

Capítulo II.

RETOS QUE DEBEN AFRONTAR LOS BANCOS DE GERMOPLASMA COMO RECURSO PARA HACER FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

1. Introducción

Los bancos de germoplasma conservan una amplia diversidad de materiales incluyendo cultivares modernos, cultivares obsoletos, variedades locales o tradicionales, líneas de mejora, colecciones de mutantes y especies silvestres emparentadas con los cultivos (denominadas parientes silvestres de los cultivos -PSC- en castellano y crop wild relatives -CWR- en inglés), que alimentan directamente los programas de mejora, proporcionando los materiales base, a partir de los cuales se desarrollarán las nuevas variedades. Los mejoradores conservan sus recursos vegetales y disponen de sus propias colecciones de germoplasma, pero sólo los bancos debidamente organizados, tienen la capacidad de conservar a corto y largo plazo una gran diversidad de materiales, atendiendo las necesidades de los diversos actores implicados y para distintos propósitos, tanto actuales como futuros. Los bancos de germoplasma pueden también contribuir a la investigación que lleva al desarrollo de nuevos cultivares, proporcionar directamente semilla a los agricultores y, en el caso de bancos que conservan plantas de multiplicación vegetativa *in vitro*, distribuir material libre de virus, contribuyendo así al saneamiento de los cultivos. También, los bancos deben ser una reserva de semillas de utilización directa en caso de desastres, como ya ha ocurrido con las guerras de Angola o Ruanda, o de tipo ambiental como el huracán Mitch en América Central (FAO, 2015a), en estos casos, las semillas proporcionadas por determinados bancos de germoplasma supusieron la recuperación de algunos cultivos en una agricultura devastada por estos motivos. Finalmente, citar el uso de semillas enviadas por el International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA) a la Bóveda global de semillas de Svalbard, estas semillas han sido enviadas a las nuevas instalaciones de

esta organización en Líbano y Marruecos que han sustituido al banco originalmente situado en Aleppo, Siria (Bhattacharya, 2016).

La mayoría de bancos de germoplasma de pequeño tamaño proporcionan semillas a nivel nacional y local. Sin embargo, los centros pertenecientes al Consultative Group for International Agricultural Research (CGIAR) y otros grandes bancos nacionales como los de Australia, Brasil, Canadá, China, Alemania, Holanda, Federación Rusa, Estados Unidos y el Banco Nórdico o el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) distribuyen muestras a nivel internacional. El World Vegetable Center de Taiwán es también uno de los bancos más importantes a nivel mundial, solamente entre este centro y los del CGIAR se distribuyeron más de un millón de muestras en un periodo de 12 años hasta 2010 (Lusty et al., 2014), poniendo de manifiesto el papel de los bancos de germoplasma en la seguridad alimentaria mundial.

Es de vital importancia que la variabilidad genética necesaria para adaptar la agricultura a futuros cambios, conservada actualmente en los bancos de germoplasma, no se pierda por negligencia del presente. Aunque en muchos aspectos el cambio climático no tiene por qué suponer un cambio drástico en el uso de los bancos de germoplasma, la aceleración de este cambio supondrá una urgencia mayor en la utilización de los materiales conservados, lo cual generará nuevos retos para poder atender una demanda presumiblemente creciente. Será necesario ampliar las colecciones con materiales de los principales cultivos aún no recolectados, pero también con cultivos minoritarios e infrautilizados y especies silvestres emparentadas, materiales estratégicos para proporcionar adaptación a condiciones extremas de cultivo. Será también necesario optimizar la información disponible del germoplasma conservado para facilitar su uso, acelerar los trabajos de caracterización y de evaluación implementando nuevas colaboraciones y facilitar su distribución a corto y largo plazo. Todo ello porque el reto es poder responder con rapidez y con el material más apropiado a peticiones de mejoradores y agricultores que demandan variedades o especies silvestres con potencial adaptación a determinados estreses bióticos o abióticos.

2. Sabiendo qué está conservado, dónde está y cómo está

Antes de intentar dar respuesta a unas cuestiones tan amplias en un espacio tan reducido hay que mencionar que este apartado se va a centrar en la conservación *ex situ* en bancos de germoplasma públicos, sin desarrollar, por falta de información global, ni la conservación *in situ* u *on farm*, la situación en bancos privados, locales o en



los bancos comunitarios de semillas, aun sabiendo que tienen un papel esencial en la seguridad alimentaria en muchos lugares del mundo (Vernooy et al, 2016).

La información más actualizada respecto a colecciones de germoplasma de recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura (RFGAA) se sintetiza en el Segundo Informe de la FAO sobre el Estado Mundial de los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura, publicado por la Organización de las Naciones Unidas para Alimentación y la Agricultura (FAO, 2010). Según este informe, en el momento de su redacción, se conservaban aproximadamente 7,4 millones de entradas en 1.750 bancos de germoplasma, de las que aproximadamente el 30% son entradas únicas, habiendo por lo tanto un alto porcentaje de duplicación de muestras debido a los intercambios entre bancos.

Considerando el estatus biológico de los materiales conservados, la mayor parte corresponde a variedades tradicionales (De la Rosa y Martín, 2016), también llamadas variedades locales o criollas en castellano o “landraces” en inglés, así como a especies silvestres. La distribución de materiales entre estos dos grupos no es homogénea ya que, mientras que de los cultivos de amplia distribución mundial, como son trigo, arroz, maíz y judías, se conservan miles de muestras, en algunos casos duplicadas en diferentes instituciones, hay un claro déficit en cuanto a la disponibilidad de cultivos minoritarios o infrautilizados y de especies silvestres emparentadas con las cultivadas (Aguirre- Gutierrez et al, 2017), en algunos casos los bancos han centrado sus actividades en el mantenimiento de líneas avanzadas de mejora, y finalmente, se debe mencionar que hay un número importante de materiales de los que no se dispone de información en cuanto a su estatus biológico, lo que sin lugar a dudas es una situación que dificulta enormemente su utilización.

Los gestores de bancos de germoplasma han buscado siempre sistemas de organización de los materiales que faciliten su trabajo. Puesto que el número de taxones conservados es muy grande, la clasificación por grupos taxonómicos como podría ser familias o géneros botánicos generalmente no se ha considerado, siendo sustituida por una agrupación de taxones por grandes grupos de uso, que están integrados por diferentes familias botánicas. Así, es frecuente agrupar cereales, leguminosas grano, hortícolas, forrajeras, plantas aromáticas y medicinales, frutales.... Evidentemente, hay especies que según la fuente consultada se pueden localizar en diferentes grupos. Este sistema de trabajo es el empleado en el mencionado Segundo informe sobre el estado de los recursos fitogenéticos de la FAO, donde se indica que el grupo más representado es el de los cereales (35% de las entradas), seguido de leguminosas grano (17%), plantas



forrajeras (15%) y hortícolas (12%) y en menor cuantía frutales, oleaginosas, especies aromático-medicinales, raíces y tubérculos y otros cultivos. Un análisis más detallado de estos datos permite asegurar que se conservan principalmente muestras o accesiones pertenecientes a las especies más comunes en alimentación animal y humana, y mayoritariamente de aquellas que se reproducen por semillas ortodoxas en cuanto a su conservación, frente a las especies de reproducción vegetativa o de semillas recalcitrantes o intermedias.

Evidentemente, y habiendo pasado casi diez años desde que se iniciaron los trabajos que dieron lugar al informe de la FAO, estos datos han cambiado y se puede asegurar, sin temor a equivocarse, que estos números han aumentado para todos los grupos y especies y que se están haciendo esfuerzos por resolver las carencias detectadas, tratando de fomentar la conservación *in situ* en espacios protegidos de las especies silvestres y la recuperación para utilización directa de variedades tradicionales en sistemas agrícolas sostenibles.

En el ámbito mundial, una parte muy importante de las colecciones se conservan en los once bancos de la red del CGIAR. Cada una de estas colecciones se estableció en centros internacionales expertos en cultivos concretos, en los que la conservación de los materiales básicos para sus programas de mejora es una actividad de trabajo prioritaria. A nivel nacional un número muy importante de países ha desarrollado en mayor o menor medida sistemas de recursos fitogenéticos. Según datos disponibles en la base de datos mundial de Recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura (RFGAA) denominada Genesys, destacan en cuanto a número de muestras conservadas, además de los del CGIAR, los bancos Nottingham en el Reino Unido por su colección de más de 600.000 entradas de *Arabidopsis*, el de la Federación Rusa, por las colecciones de cereales iniciadas por NI Vavilov a principios del siglo XX, el australiano de granos con más de 138.000 entradas de cereales y leguminosas entre otros o los bancos estadounidenses del USDA.

En España, el interés formal por la conservación de los RFGAA se materializó por primera vez en una Orden Ministerial de 1981, que plasmó la importancia que habían adquirido estas actividades en los años 70 del siglo XX, aunque antes ya se habían desarrollado actividades de recolección y conservación de colecciones de vid, cereales de invierno, manzano, maíz y especies silvestres. En la actualidad la red de bancos de germoplasma vegetal del Programa Nacional de RFGAA está formada por más de 30 bancos, dependientes de diferentes entes públicos y que han sido financiados por el INIA a través de los proyectos de acciones complementarias de conservación o de

investigación; un segundo rasgo común a estas colecciones es que su información de pasaporte está incluida en el Inventario Nacional, que se puede consultar a través de la dirección <http://wwwx.inia.es/inventarionacional/>. Estas instituciones conservan mayoritariamente colecciones de semillas, principalmente especies hortícolas, cereales, leguminosas, especies forrajeras y silvestres y en menor cuantía, pero con una gran importancia para el sector agrícola del país, especies de multiplicación vegetativa como vid, olivo y diversas especies frutales.

A pesar de las críticas recibidas, hay un consenso amplio en que el sistema de conservación en bancos de germoplasma *ex situ* es el más eficaz y rentable a gran escala, aunque ya desde los años 90 los organismos internacionales avisaron sobre los problemas a los que se enfrentaba este sistema, incluyendo a) las deficiencias en el mantenimiento de estructuras de conservación a largo plazo, b) la falta de duplicados de seguridad y c) los problemas asociados a la regeneración de la gran cantidad de muestras. Más de 20 años después los problemas siguen siendo los mismos. Fu (2017) indica que persisten los problemas de financiación, instalaciones y personal para conservar todas las colecciones de los bancos y que, además, se han incrementado de manera notable en los últimos años. Entre las posibles soluciones para solventar estos problemas se puede citar el convenio entre bancos del CGIAR y otras organizaciones internacionales con interés en la conservación de germoplasma, como la Secretaria de la Comunidad del Pacífico (SCP) y el Global Crop Diversity Trust, por el que esta organización se compromete a financiar de forma estable las colecciones de los 17 cultivos más importantes para la alimentación mundial que se detallan en la Tabla 1. En este punto también es obligatorio mencionar el esfuerzo que se está realizando por conservar duplicados de seguridad en las instalaciones de la Bóveda Global de Semillas de Svalbard, en Noruega, que en la actualidad mantiene casi 900.000 entradas procedentes de prácticamente todos los países del mundo.

Tabla 1. Colecciones financiadas a perpetuidad por el Global Crop Diversity Trust
(fuente: Global Crop Diversity Trust: <https://www.croptrust.org/our-work/supporting-crop-conservation/global-genebank-partnership/>)

| Cultivo | Institución | País |
|----------------------|--------------------------|-----------|
| Almorta | ICARDA | Siria |
| Aroideas comestibles | SPC | Fiji |
| Arroz | IRRI | Filipinas |
| Banana y Plátano | Bioversity International | Bélgica |
| Batata | CIP | Perú |
| Casava | CIAT | Colombia |

| Cultivo | Institución | País |
|------------|-------------|----------|
| Casava | IITA | Nigeria |
| Cebada | ICARDA | Siria |
| Forrajes | ILRI | Etiopia |
| Forrajes | ICARDA | Siria |
| Garbanzo | ICRISAT | India |
| Haba | ICARDA | Siria |
| Judía | CIAT | Colombia |
| Lenteja | ICARDA | Siria |
| Maíz | CIMMYT | México |
| Mijo perla | ICRISAT | India |
| Ñame | SPC | Fiji |
| Ñame | IITA | Nigeria |
| Sorgo | ICRISAT | India |
| Trigo | CIMMYT | México |

3. Asegurando el mantenimiento de los recursos fitogenéticos: racionalizando colecciones y estableciendo duplicados de seguridad

Como se ha visto en el punto anterior, el gran esfuerzo y recursos dedicados a la recolección de germoplasma han dado fruto y en el momento actual existe una ingente cantidad de materiales conservados. Sin embargo, además de otras actividades, como la regeneración, caracterización y evaluación, que sin duda facilitan y promueven su uso, hay un aspecto fundamental que debemos considerar: asegurar la conservación a largo plazo del germoplasma existente en la actualidad. En este sentido, es esencial la existencia de sistemas nacionales que garanticen la protección de las colecciones frente a desastres provocados por el cambio climático o cualquier otro imprevisto. Lamentablemente, las políticas nacionales a este respecto no están exentas de sufrir variaciones en cuanto a las prioridades. Desastres de diversa índole provocados por el cambio climático pueden repercutir en cambios en los presupuestos y ello redundar en desviar las prioridades hacia otros aspectos distintos de la conservación de germoplasma. La visión a largo plazo debería primar en estas circunstancias, no dejando sin recursos suficientes a lo que sin duda es la solución a problemas de un futuro ya a corto plazo. Esta falta de financiación ocasiona, en la mayoría de los casos, una es-



casez de mano de obra especializada que se suele paliar con contratos temporales o participación de personal en formación, lo que repercute negativamente, tanto en la eficiencia en el trabajo, como en la correcta aplicación de las normas básicas de manejo del material vegetal.

El cambio climático supondrá, muy probablemente, el aumento de situaciones imprevisibles que pueden provocar desastres naturales con mayor frecuencia, los cuales pueden afectar también al germoplasma conservado en los bancos. Ejemplos de esta situación son las inundaciones sufridas por el banco nacional de Filipinas en 2011, donde una parte de las 20.000 entradas de arroz se perdieron irremediablemente (Snook et al., 2011). Las tormentas tropicales, de creciente frecuencia y virulencia, son una importante preocupación a lo largo del Pacífico, especialmente para bancos que conservan plantas de multiplicación vegetativa, como es el caso del Centro para Cultivos y Árboles del Pacífico (Center for Pacific Crops and Trees, CePaCT), en Suva, Fiji. Las colecciones de coco están también expuestas a amenazas ocasionadas por patógenos y degradación ambiental, muchas veces ocasionados por el cambio climático. Una estrategia en estudio es la descentralización de la colección, repartiendo el germoplasma en pequeñas “islas” con una o dos variedades. Esta técnica de aislamiento geográfico, también llamada “polymotu” (poly: muchos, motu: isla) reduce la expansión de los patógenos, aísla reproductivamente las variedades y minimiza el riesgo de perder la colección (Bourdeix et al., 2011). Otros ejemplos del peligro al que están expuestas las colecciones de germoplasma debido a los desastres naturales han sido el huracán Mitch de 1998, que dañó de forma severa la colección de germoplasma de banano en América Central y las inundaciones causadas por el fenómeno de “El Niño” en Ecuador (FAO, 2015a). Frente a estos desastres que afectan a las colecciones mantenidas en el campo se plantea el establecimiento de colecciones *in vitro* como duplicados de seguridad.

Uno de los retos a los que se enfrentan los bancos de germoplasma para asegurar los materiales conservados es redoblar los esfuerzos en establecer duplicados de seguridad de las colecciones. Como se ha comentado anteriormente, sólo el 30% de las entradas conservadas en los bancos son muestras originales (FAO, 2010). Lejos de resolver el problema de perder el germoplasma conservado, esta enorme cantidad de duplicados, que no están correctamente identificados en cada banco, lleva a una redundancia en los trabajos de mantenimiento de las mismas entradas en diversas instituciones. Es urgente, pues, la supervisión de las colecciones existentes y su racionalización para alcanzar el objetivo del establecimiento de los duplicados de seguridad

de forma organizada. Ésta ha sido una de las prioridades del Programa Cooperativo Europeo de Recursos Fitogenéticos (ECPGR). Todos los grupos de trabajo han contribuido activamente en el establecimiento de cajas negras conservadas en bancos de germoplasma del mismo o de diferentes países, que ayuden a paliar la pérdida de germoplasma debido a los previsible desastres naturales que puedan surgir como consecuencia del cambio climático. El Grupo de Documentación e Información del ECPGR ha desarrollado la herramienta informática PGR Duplicate Finder (<http://ecpgr.cgn.wur.nl/aegis/AEGISDF/>), basada en los datos de pasaporte, que facilita la identificación de duplicados entre bancos. Estas actividades de racionalización son un primer paso imprescindible para preparar los bancos de germoplasma frente al reto de una mayor utilización de los mismos. Nuestro país lleva años trabajando a este respecto y una gran parte de los recursos fitogenéticos conservados en los distintos bancos dispone de una copia de seguridad en el Centro Nacional de Recursos Fitogenéticos, a la vez que se avanza en la identificación de duplicados entre distintos bancos establecidos por intercambio de materiales a lo largo del tiempo.

4. Mejorando la documentación

El interés en la conservación de los RFGAA tiene una doble vertiente, en primer lugar la conservación *per se*, para conocer la diversidad del mundo que nos rodea y para preservarla, en la medida de lo posible, de la erosión genética, y en segundo lugar para su utilización como una herramienta imprescindible para dar respuesta a la demanda creciente de producción de alimentos, más acuciante si cabe, en los nuevos escenarios de cambio climático. Uno de los puntos clave que favorece la utilización de RFGAA es dar a conocer estos recursos de la forma más amplia posible, estableciendo y manteniendo sistemas de documentación amplios. La documentación de las colecciones de germoplasma incluye varios grupos de datos: datos de pasaporte, caracterización y evaluación y de gestión de las colecciones. Los dos primeros grupos facilitan la selección y utilización de muestras por parte de los usuarios mientras que los últimos se manejan a nivel interno en los bancos.

El establecimiento de los sistemas de documentación debe empezar en cada institución que conserva una colección, donde los materiales deben estar identificados, al menos, con datos de pasaporte. Con el fin de poder comparar materiales conservados en distintas instituciones es recomendable que se utilicen variables identificadoras comunes, recomendándose en el ámbito internacional el uso, al menos parcial, de



los descriptores incluidos en los datos de pasaporte multicultivo (MCPD) publicados por FAO/Bioversity International (Alercia et al, 2015). En el caso de la mayoría de los países europeos, las bases de datos de las diferentes instituciones se unifican y publican conjuntamente en forma de inventarios nacionales, que a través de las personas focales nacionales se incluyen en la base de datos europea EURISCO, gestionada por el ECPGR desde la sede del IPK en Gatersleben en Alemania, accesible a través del enlace <https://eurisco.ipk-gatersleben.de>, que en enero de 2018 incluía información de casi dos millones de entradas conservadas en 43 países pertenecientes a casi 43.000 especies de 6.000 géneros botánicos. Además, EURISCO pretende ser una plataforma que informe y guíe a sus participantes a cumplir con las obligaciones y los compromisos internacionales contraídos por sus países (Weise et al, 2017). Históricamente, en el ECPGR se han mantenido bases de datos por cultivos, en las que además de la información de pasaporte, cada responsable de la red tenía el cometido de ampliar la información con datos de caracterización y evaluación; después de unos años de funcionamiento el sistema no ha sido todo lo eficaz que se esperaba, por eso en estos momentos se barajan dos opciones a) el diseño de portales con información por cultivos y b) la incorporación de datos caracterización y evaluación en EURISCO.

En un intento de crear un sistema de documentación que dé cobertura mundial a las colecciones de los 17 cultivos más importantes para facilitar su uso, en 2011 se estableció la base de datos *on line* denominada Genesys (<https://www.genesys-pgr.org/es/welcome>) que, en enero de 2018, incluía datos de pasaporte de más de 3,5 millones de entradas conservadas en 435 instituciones, entre las que se encuentran los bancos europeos que aportan su información a través de EURISCO, los bancos del CGIAR, el sistema de recursos genéticos de Estados Unidos (USDA, ARS, NPGS) y los datos de SINGER (System-wide Information Network for Genetic Resources), que en ese momento era la red de información de los bancos del CGIAR. El sistema permite hacer búsquedas por datos de pasaporte, de caracterización y variables ambientales.

A nivel internacional hay otras iniciativas que pretenden reunificar información y hacerla accesible de forma fácil y amigable, entre las que se pueden citar la Plataforma GRIN Global, promovida por el Global Crop Diversity Trust, Bioversity International y el Servicio de Investigación Agraria de Estados Unidos, cuya primera versión se lanzó en 2011 y que se ha puesto a disposición de todos los bancos del mundo. Esta plataforma está diseñada para incluir datos de pasaporte, de gestión, de caracterización fenotípica y genotípica y sobre el estado sanitario de la muestra y los requerimientos para su intercambio. Con unos objetivos semejantes, pero tratando

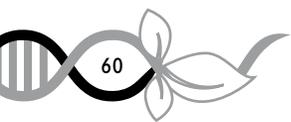
de simplificar el funcionamiento del sistema, se está desarrollando y poniendo a disposición de los usuarios el sistema de bases de datos de germoplasma del CATIE, en Costa Rica (<https://banco de germoplasma.catie.ac.cr/sbdg/?view=bancos>) que está siendo evaluado por diferentes países del entorno. Otro ejemplo reciente es el desarrollo del sistema de documentación del Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG) de México, que incorpora información de recursos fitogenéticos de distintos subsistemas (agrícola, forestal, acuático, pecuario y microbiano) mantenidos como diferentes tipos de muestras como son hojas, semillas o ADN (Yamasaki et al, 2016). Entre los casos de sistemas ya establecidos que incorporan diferentes tipos de datos, se podrían citar casos de éxito que ya son funcionales como el sistema del CGN (banco de germoplasma de la Universidad de Wageningen) que se puede consultar en <https://cgngenis.wur.nl/> o el del USDA de Estados Unidos (<https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/search.aspx>).

Los ejemplos mencionados ilustran el interés mundial por hacer accesible la información de las colecciones de germoplasma, que ha llevado al desarrollo de diferentes iniciativas, a la vez que ponen de manifiesto la complicación que ha tenido hasta el momento la incorporación de datos de distinta naturaleza en el mismo sistema de documentación. A pesar de la ingente labor de captación de información y construcción de bases de datos, la utilidad de las mismas para una búsqueda inmediata de información acerca de variedades adaptadas al cambio climático aún no es posible. Hace falta, no sólo completar la información de pasaporte de las entradas aún no incluidas en las bases, es necesario mejorar la información disponible de las que ya lo están. Entre las vías que se estudian, y que pueden paliar la falta de datos, se encuentra la utilización de datos ecogeográficos asociados a los lugares de origen de las muestras de germoplasma, disponibles en diferentes sistemas de información geográfica, y que pueden ser incorporados como datos de caracterización indicativos de adaptación a determinadas condiciones ambientales, siempre y cuando se disponga de coordenadas de alta calidad del lugar de origen de la entrada. Partiendo del principio de que las plantas se adaptan al entorno en el que se han desarrollado a lo largo del tiempo, las particularidades del entorno pueden informar sobre las características de estas plantas y la información de estas variables ecogeográficas puede ser empleada como elemento informativo de alto valor a la hora de manejar colecciones de germoplasma para actividades tales como el establecimiento de colecciones nucleares basadas en características de adaptación (Parra-Quijano et al, 2011). Valiosas colecciones históricas carentes de una buena información de pasaporte pueden verse beneficiadas de estas posibilidades, facilitando así su utilización.



Además, la información histórica y cultural que aportan los agricultores, botánicos, horticultores o campesinos durante las expediciones de recolección, así como el conocimiento de la población local con respecto al origen de una accesión o su resistencia a plagas y enfermedades, resulta de interés para la utilización del germoplasma conservado en los bancos. Estos conocimientos son el resultado de siglos de adaptación dinámica al entorno, por lo que concentran un enorme potencial para afrontar un futuro incierto donde la sostenibilidad es el factor clave. Esta información se denomina conocimiento tradicional, que la Ley 42/2007 de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, define en su artículo 3.4. como *“el conocimiento, las innovaciones y prácticas de las poblaciones locales ligados al patrimonio natural y la biodiversidad, desarrolladas desde la experiencia y adaptadas a la cultura y el medio ambiente local”*. Sin embargo, en general, esta información no está disponible en los bancos de germoplasma. Este vacío de información ha impulsado el desarrollo de estrategias para la investigación y la conservación de los conocimientos tradicionales, que además de su indudable valor histórico-cultural, suponen una enorme valía en el contexto de cambio global, incluido el cambio climático. Así, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, consciente del valor y de la urgencia que tiene la recopilación de las prácticas tradicionales, ha promovido la puesta en marcha del Inventario Español de Conocimientos Tradicionales relativos a la Biodiversidad (Pardo de Santayana et al., 2014) y del Inventario Español de Conocimientos Tradicionales relativos a la Biodiversidad Agrícola. Por su parte, la Red Andaluza de Semillas ha publicado la *“Guía de conocimiento sobre utilización y manejo tradicional ligadas a las variedades autóctonas”* (Red Andaluza de Semillas *“Cultivando Biodiversidad”*, 2011)

A pesar de los datos expuestos, la documentación de colecciones para facilitar su utilización tiene que mejorar porque, según el Segundo Informe FAO, poco más de la mitad de los recursos conservados en el mundo tiene alguna información asociada. Es preciso buscar soluciones trabajando con metodologías sencillas y amigables que apliquen a los datos los principios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Re-usable), para lo que se propone, entre otras medidas, el uso de doi (Digital Object Identifiers) como identificadores permanentes únicos propuestos en el sistema de información GLIS de FAO, que pretende dar respuesta al Artículo 17 del Tratado Internacional de RFGAA que indica *“que las Partes Contratantes deben cooperar en la elaboración y fortalecimiento de un Sistema Mundial de Información de intercambio de datos sobre todos los aspectos relativos a los recursos fitogenéticos”*. El sistema permitirá hacer un seguimiento de los movimientos de cada recurso fitogenético, así como facilitar el acceso a toda la información que se ha generado en los diferentes procedimientos en



los que se emplea, todo ello con el objetivo final de facilitar el reparto de beneficios derivado de su uso.

Con este objetivo, y en nuestro entorno más cercano, se trabaja en iniciativas como el Repositorio de datos del INIA o el desarrollo de herramientas bioinformáticas de gestión de información de colecciones.

5. Incrementando las colecciones

5.1. ESPECIES SILVESTRES EMPARENTADAS CON LOS CULTIVOS

Las especies silvestres son, sin duda, un recurso de gran interés para la mejora de los cultivos por su adaptación en muchos casos a ambientes naturales de condiciones extremas. Además, en sí mismas suponen una fuente de alimentación, en especial en países en vías de desarrollo y son una fuente importante de alimentación para el ganado en países cuya economía está basada en su explotación. Según el Segundo Informe de la FAO sobre Recursos Fitogenéticos (FAO, 2010), se estima entre 50.000 y 60.000 el número de especies pertenecientes a los mismos géneros que las especies cultivadas y de las cuales 700 han sido descritas como de alta prioridad para su conservación por pertenecer a sus “gene pools” primario y secundario. Como prueba del interés en estas especies silvestres basta señalar que supusieron un 27% de las muestras cedidas por los centros del CGIAR en la década de 1996 a 2006 (Lusty et al., 2014). Estas especies son difíciles de conservar y regenerar, por eso en algunos casos no se hace pública su existencia, al no estar disponibles porque se conserva poca cantidad de semilla. Salvada esta circunstancia, el Segundo Informe sobre RFGAA afirma que sólo el 18% de las entradas conservadas en los bancos pertenecen a este tipo de materiales y, aunque está demostrado que los peticionarios se dirigen a los bancos para solicitar estas especies, su escasa representación restringe de forma importante su utilización (FAO, 2010). Adicionalmente, se ha estimado que entre el 16% y el 22% de las especies silvestres pueden estar en peligro de extinción en los próximos 50 años (Jarvis et al., 2008).

El impacto que el cambio climático puede tener sobre ellas no ha sido estudiado en profundidad, pero se puede asumir que distintos factores como el tipo de estrés, el taxa, la capacidad de adaptación a la nueva situación, las posibilidades de migración y dispersión o la capacidad de reproducirse si desaparecen determinados agentes polinizadores, va a afectar la distribución y/o presencia de poblaciones de plantas de estas especies. Ya hay datos que indican que las especies silvestres son



más vulnerables al cambio climático que las cultivadas y, consecuentemente, debe priorizarse su recolección (FAO, 2015a).

El interés en la conservación *in situ* de especies silvestres ha aumentado considerablemente en los últimos años, así como el desarrollo de metodologías para el manejo de las poblaciones conservadas (Iriondo et al., 2008; Hunter y Heywood, 2010; Maxted et al., 2012). También se ha avanzado en la integración de la conservación *in situ* y *ex situ* para asegurar la conservación y facilitar su utilización. Sin embargo, queda mucho camino por recorrer y en los últimos años se están llevando a cabo distintos proyectos que tratan de dar un fuerte impulso a este tema. Así, recientemente en Europa ha habido varios proyectos centrados en la elaboración de listas de parientes silvestres de los cultivos, entre ellos el proyecto PGR-secure “Novel characterization of crop wild relative and landrace resources as a basis for improved crop” coordinado por la Universidad de Birmingham (<http://www.pgrsecure.bham.ac.uk/>). Entre otros objetivos, se trata de establecer una estrategia europea para la conservación de las especies silvestres y variedades tradicionales más prioritarias. En España ha participado en este proyecto la Universidad Rey Juan Carlos, que ha elaborado la lista de especies silvestres emparentadas con las cultivadas en nuestro país (Rubio-Teso et al., 2018). Diversos trabajos, entre ellos algunos desarrollados en España (De la Rosa et al., 2013), indican que estas especies están mal representadas en las colecciones *ex situ*. Con el objetivo de mejorar esta situación, se está llevando a cabo en el proyecto “Adapting Agriculture to Climate Change: Collecting, Protecting and Preparing Crop Wild Relatives” financiado por el Global Crop Diversity Trust, a través de un sub-proyecto centrado en la recolección de 25 especies silvestres emparentadas con los cereales de invierno y las leguminosas grano. Otra iniciativa europea liderada por la universidad de Birmingham es la recientemente iniciada Acción Especial “Farmers Pride”, cuyo objetivo principal es establecer una red de mantenedores de germoplasma, incluyendo conservadores *ex situ*, *in situ*, mejoradores y usuarios de diversos tipos con el objetivo de salvaguardar y potenciar el uso del germoplasma conservado en Europa, integrando a la comunidad de usuarios con el fin de maximizar su sostenibilidad.

El reto de los bancos de germoplasma a este respecto es completar las colecciones con nuevas expediciones de colectas, lo que conlleva un detallado estudio de las áreas de distribución de las especies, y la participación activa junto a diferentes actores en estos proyectos que tratan de establecer redes que coordinen los esfuerzos realizados hasta ahora de forma muchas veces inconexa.

5.2. AUMENTANDO EL RANGO DE ESPECIES PARA LA ALIMENTACIÓN: INCREMENTAR Y POTENCIAR EL USO DE ESPECIES MINORITARIAS E INFRAUTILIZADAS

La especialización en cultivos y sistemas de producción que son altamente eficientes en ciertos rangos de temperatura o aportes hídricos puede no ser efectiva a largo plazo en todas las áreas de producción. Hay una necesidad urgente de investigar formas alternativas de manejo de la agricultura en las cuales las especies infrautilizadas pueden jugar un papel clave. Por especies infrautilizadas (en inglés, Neglected and Underutilized Plants, NUS) se entiende aquellas cuyo potencial para mejorar el sustento de la humanidad no está completamente explotado, debido a su limitada competitividad con especies y variedades empleadas en la agricultura convencional (Padulosi et al. 2011). A pesar de ello, pueden tener una significativa importancia a nivel local, estando altamente adaptadas a condiciones marginales, de ambientes extremos y que pueden por tanto contribuir a la diversificación y resiliencia de los agroecosistemas (Padulosi et al., 2002). Existe, además, una gran cantidad de especies, que en sí representan una amplia oportunidad de encontrar cultivos adaptados a diferentes condiciones y de satisfacer diferentes propósitos y necesidades. Las ventajas que estos cultivos ofrecen incluyen su pre-adaptación a condiciones marginales o extremas de temperatura, humedad, sequía, etc. y su resistencia a plagas y enfermedades. Muchos de estos cultivos poseen una amplia variabilidad intraespecífica que puede ser explotada en mejora (Williams, 2013).

Ejemplos de especies infrautilizadas son *Vigna subterranea*, una nutritiva leguminosa originaria del oeste de África y cultivada en África Subsahariana. Es muy conocida y apreciada por su tolerancia a la sequía y adaptación a crecer en suelos duros y marginales (Andika et al, 2008). Otros cultivos infrautilizados y conocidos por su adaptación a la sequía son las especies de mijos menores, empleados particularmente en el Sur de Asia. Estos mijos, que combinan caracteres de adaptación a la sequía con unas excelentes cualidades nutricionales, constituyen una oportunidad para el desarrollo de áreas frecuentemente afectadas por graves sequías (Padulosi et al., 2009). En España existe una gran diversidad de cultivos infrautilizados descrita con detalle en Hernández (2013). Un ejemplo de éxito en este sentido es la gran extensión y utilización de quinoa, que en pocos años ha pasado de ser una especie localizada sólo en el Altiplano de los Andes a tener una amplísima distribución y uso mundial.

A pesar del creciente interés por este tipo de cultivos, las especies infrautilizadas están muy poco representadas en los bancos de germoplasma (FAO, 2010). Los esfuerzos por fomentar la conservación *in situ* han sido fructíferos en los últimos años, pero la



conservación *ex situ*, que asegura con mayores garantías su conservación y disponibilidad, es casi inexistente (Heywood y Dulloo, 2005). Esto supone una severa barrera para el acceso al germoplasma, su mejora, utilización y promoción. El reto para los bancos de germoplasma es potenciar la recolección de este tipo de cultivos antes de que desaparezcan por el uso generalizado de los cultivos mayoritarios, prácticas de monocultivo y estandarización del mercado. La información y concienciación sobre su utilización son aspectos que también pueden ser asumidos por los bancos de germoplasma.

6. Colaborando en la caracterización y evaluación

Como se ha indicado en el apartado correspondiente a la Documentación, el esfuerzo dedicado a optimizar la información de pasaporte sobre el germoplasma conservado ha sido muy grande y, a pesar de la indudable mejora que debe realizarse, se puede decir que en la actualidad hay bases de datos que facilitan el uso del germoplasma principalmente en lo referente a los datos de pasaporte. La situación es distinta para datos de caracterización. Como se ha indicado, pocos bancos de germoplasma ofrecen información de caracterización *on line*. Los más importantes a este respecto son el World Vegetable Center (AVRDC) (<http://seed.worldveg.org/about>), el National Plant Germplasm System en Estados Unidos (NPGS) (www.ars-grin.gov/npgs), o en Países Bajos, el Center for Genetic Resources (CGN) (<https://www.wur.nl>). En España, también existen datos de caracterización accesibles. Así el CRF tiene disponible *on line* datos de caracterización primaria de las colecciones de cereales de invierno y leguminosas grano; el COMAV y el CITA ofrecen datos de caracterización de parte de la colección; el IMIDRA ha creado una página web con información de las colecciones españolas de vid; el IVIA ha puesto a disposición de los usuarios fichas con los datos de sus colecciones de cítricos y la Universidad de Lleida ha publicado *on line* los datos de caracterización de sus colecciones de manzano y peral. Sin embargo, estos datos son totalmente insuficientes para ofrecer posibilidades reales de utilización del germoplasma conservado, tal y como se ha indicado en los informes publicados sobre el estado de los RFGAA en el mundo (FAO, 1996 y 2010). Desde entonces, a pesar de que se han realizado muchas actividades de caracterización, la información producida está infrutilizada debido, en gran medida, a la falta de normalización y a las restricciones de accesibilidad. En 1996, el Plan de Acción Mundial resaltó la importancia de la caracterización, tanto como una manera de ayudar a vincular la conservación de los RFGAA con su utilización, como para facilitar la identificación de deficiencias en las colecciones y el desarrollo de colecciones de referencia.



Actualmente, este problema continúa siendo un obstáculo sustancial para su uso en la investigación de cultivos, en general, particularmente en la mejora genética. En este sentido, el reto de los bancos de germoplasma para hacer frente al cambio climático es doble, a) hacer accesible a los potenciales usuarios la información ya disponible y b) obtener la máxima información acerca de las características de los materiales conservados. Este reto requiere ir más allá de las actividades que habitualmente realizan los conservadores de germoplasma, y que generalmente se limita a la caracterización primaria. Para hacerlo posible hay que cambiar el enfoque hacia uno más integrado que involucre a múltiples actores especializados en el manejo y la utilización de los recursos genéticos, como son los mejoradores, los agricultores y los investigadores. Este nuevo enfoque puede ayudar a cambiar el panorama respecto a la insuficiente información de caracterización y evaluación, contribuyendo a garantizar el suministro de germoplasma necesario para abordar la mejora frente a estreses bióticos y abióticos (Dwivedi et al., 2017). De otro modo, los bancos se asemejarán a una biblioteca con muchos libros que no han sido todavía abiertos, y mucho menos leídos, como afirman Naylor et al. (2007).

El reto de hacer accesible para los usuarios la información ya disponible no es una tarea trivial, ya que es necesaria una labor de estandarización muy complicada puesto que los ensayos de evaluación se han realizado con diferentes criterios, variables y materiales de referencia. Aunque se está trabajando a este respecto, el progreso se adivina lento.

Por otro lado, la obtención de la máxima información sobre el material pasa por una caracterización y evaluación según variables específicas de interés en programas de mejora orientados al desarrollo de materiales adaptados al cambio climático. Estos caracteres incluyen el rendimiento en ambientes concretos, la resistencia a plagas y enfermedades, la tolerancia a estreses abióticos (sequía, temperaturas extremas, salinidad), procesos relacionados con la floración, el cuajado del grano o de los frutos, eficiencia fotosintética y en el uso del agua, etc. El grado de implicación de los bancos de germoplasma en esta evaluación es una cuestión controvertida, no habiendo acuerdo sobre en qué medida los bancos deben implicarse. Lusty et al. (2014) proponen que no sería necesaria la intervención de los bancos en los cultivos más importantes como por ejemplo el arroz o el trigo, en los que hay programas de mejora bien desarrollados y una ingente cantidad de información generada. Sin embargo, para otros cultivos de menor importancia y con menos recursos, los bancos de germoplasma pueden ser el lugar óptimo, y en algunos casos el único, para realizar estas actividades. No hay que olvidar, sin embargo, que la evaluación requiere un elevado



aporte financiero, además de competencia técnica, instalaciones especiales y un conocimiento detallado de las necesidades de los usuarios. En consecuencia, son pocos los bancos de germoplasma que pueden llevar a cabo programas importantes de evaluación bajo su propia dirección y empleando los fondos para las actividades de manejo básico del banco. Con objeto de aportar soluciones a la falta de instalaciones se están desarrollando plataformas de fenotipado y de simulación de condiciones ambientales futuras entre las que se pueden citar la Center for Plant Science de la University College of Dublin o Pheno3C del INRA.

Existen, además, varias opciones viables de manejo de la evaluación cuya eficacia ha sido demostrada, especialmente cuando cuentan con la participación colaborativa de otros bancos de germoplasma (Engels y Visser, 2007), que puede realizarse a muchos niveles, por ejemplo, germoplasma conservado en un banco puede trasladarse a otro con instalaciones más adecuadas para ser evaluado para ciertas características. Esto es especialmente ventajoso en el caso de cribado de germoplasma para la resistencia o tolerancia a patógenos que no están presentes en el país donde se ubica el banco que conserva el germoplasma. También posibilita la realización de evaluaciones en diferentes ambientes, permitiendo el estudio de interacciones genotipo-ambiente y de adaptación a condiciones específicas, tan importante para el desarrollo de materiales adaptados al cambio climático. En el momento actual existe una gran cantidad de convenios a distintos niveles, bilaterales entre bancos (Ej.: convenio entre el banco de germoplasma del COMAV de la Universitat Politècnica de València y el Centro de Recursos Genéticos de Holanda para regeneración y caracterización de germoplasma de pimiento), entre países (como el existente entre Holanda y Alemania para el mantenimiento de las colecciones de remolacha azucarera, patata y achicoria), subregionales (colaboración entre las colecciones de los países nórdicos Dinamarca, Finlandia, Islandia, Noruega y Suecia) y regionales como el ECPGR que ha supuesto el marco legal para el establecimiento de múltiples colaboraciones nacionales e internacionales (Engels y Visser, 2007).

Además de la colaboración entre bancos de germoplasma, la participación de agricultores puede ser muy valiosa. Por ejemplo, Etiopía dispone de un avanzado programa de conservación y evaluación *on farm* que se apoya en la cooperación entre agricultores e investigadores para reintroducir variedades locales que se perdieron durante la sequía de los años 80 del pasado siglo. El banco suministra variedades locales de los cultivos más importantes (teff, cebada, garbanzo, sorgo y judías) a agricultores, quienes las cultivan aportando datos sobre su capacidad de adaptación a los diferentes ambientes. El programa está diseñado con una aproximación descentralizada. En Fi-



lipinas están en marcha colaboraciones similares entre distintas instituciones para el cultivo de arroz (FAO, 2015).

En conclusión, los retos de los bancos de germoplasma para hacer frente al cambio climático, respecto a la caracterización y evaluación del material que conservan, son, por un lado, organizar y difundir la información de la que ya disponen, para que los usuarios puedan hacer un uso más racional y eficiente del germoplasma; y por otro lado, implementar actividades, con un enfoque multidisciplinar, para la caracterización y evaluación del germoplasma, que debe de ir más allá de la caracterización primaria. Ambas tareas requieren mucho trabajo y no es previsible ver sus frutos de una forma apreciable en un futuro inmediato.

7. Integrando los datos de secuenciación para facilitar el manejo de las colecciones de germoplasma

Las nuevas tecnologías de secuenciación han propiciado una extraordinaria reducción de los costes de genotipado, lo que ha dado lugar a una revolución que afecta a todas las áreas relacionadas con la genética y en la que se incluyen los bancos de germoplasma. Esta capacidad de genotipado puede ser utilizada con distintos fines en los bancos, por ejemplo, para determinar la estructura de la variación en las colecciones. Por otro lado, estas tecnologías están facilitando el estudio de los procesos que han creado la variación actual de una forma precisa y este conocimiento puede ser utilizado para racionalizar las colecciones.

Una aplicación inmediata es la localización de duplicados mediante métodos moleculares. Estudiando los datos de pasaporte y caracterización se pueden encontrar numerosos duplicados, pero un genotipado barato de alta densidad puede ser incluso más eficiente. Los datos de pasaporte pueden presentar grandes lagunas y pueden contener errores debidos al manejo de los materiales y a la transferencia de información entre distintas colecciones. Los datos de caracterización pueden presentar, a su vez, importantes ambigüedades, dado que una mera similitud morfológica no es una garantía de una similitud genética. Por ello, el genotipado es hoy en día una interesante alternativa, además de ser más barato que la caracterización morfológica y más fácilmente estandarizable.

Por otro lado, la determinación de la estructura poblacional de las especies silvestres y la caracterización de la diversidad de las mismas, pueden ser utilizadas para tomar decisiones respecto a qué poblaciones merece la pena representar más o menos abundantemente en las colecciones. Existen especies con una muy baja diversi-



dad molecular y morfológica que pueden ser representadas por unas pocas entradas, mientras que de otras más diversas deberían guardarse muchos más materiales. Una estrategia muy similar puede ser aplicada a las variedades tradicionales, aunque en este caso la variabilidad morfológica y funcional puede ser mucho más relevante y un mero análisis molecular podría subestimar esta valiosa diversidad. En estas variedades puede haberse seleccionado por parte de los agricultores una variabilidad morfológica o funcional muy relevante que puede ser debida a muy pocos loci que podrían pasar desapercibidos en un análisis molecular.

Finalmente, si consideramos a un genotipo como un haplotipo particular de los *loci* que componen su genoma, podemos diseñar nuevas estrategias de conservación y racionalización de las colecciones. La búsqueda de todos los alelos presentes en un gen concreto suele denominarse *ecotilling* y la aproximación basada en bloques haplotípicos trataría de hacer lo mismo, pero intentando conservar todos los alelos existentes de todos los bloques haplotípicos. Una vez tenemos una buena representación de la variabilidad molecular de una especie, se puede determinar la magnitud del desequilibrio de ligamiento así como los bloques haplotípicos (bloques que presentan un muy alto desequilibrio de ligamiento), que constituyen el acervo genético. Estos bloques son conjuntos de *loci* cercanos que no han sufrido prácticamente recombinaciones en la población durante un largo tiempo. Esta es una estrategia análoga a la utilizada por el proyecto Hapmap, el predecesor del proyecto de los 1000 genomas humanos. Una vez determinados estos bloques, se puede determinar cuáles son los alelos de cada uno de ellos presentes en la especie y podríamos diseñar una colección de germoplasma en la que todos los haplotipos de cada bloque/*loci* estuviesen representados.

El ligamiento puede ser utilizado también para determinar de un modo muy sencillo las introgresiones que están siendo utilizadas comercialmente en una especie concreta. Esto nos permite averiguar la historia de estas variedades mejoradas, incluyendo qué materiales fueron utilizados para crearlas.

Obviamente, el genotipado de las colecciones permite el acceso a los materiales mediante selección alélica o haplotípica, pero además podría posibilitar la realización de estudios de asociación. Para llevarlos a cabo se requiere un genotipado de muy alta densidad, siendo lo ideal una secuenciación completa del genoma, y un fenotipado de los caracteres de interés. Este último punto puede ser una de las limitaciones principales del uso directo de los datos de caracterización, dado que en muchas ocasiones han sido recogidos en distintos experimentos de caracterización que difícilmente serán comparables para caracteres con una alta influencia ambiental.



En cualquier caso, los bancos de germoplasma deberían jugar un papel relevante en esta nueva era genómica dado que, además de albergar las colecciones de materiales biológicos, podrían encargarse de organizar y poner a disposición de la comunidad los datos ya mencionados de pasaporte, caracterización y evaluación, que se deberían completar con los de genotipado de un modo integrado. Sin un repositorio que integre esta información, la investigación y el uso de la misma, tanto en investigación como en mejora se dificulta enormemente, puesto que cualquier proyecto requiere un gran esfuerzo previo de búsqueda de información en distintos artículos y bases de datos, así como una difícil tarea de integración, que se ve dificultada por el uso de numerosos códigos incompatibles. Esto podría constituir una muy valiosa aportación, dado que estos datos, en la mayor parte de las ocasiones, están dispersos y su integración resulta muy costosa. Los bancos son un candidato ideal para realizar esta tarea dado que son ellos la fuente última de la mayor parte de los materiales vegetales utilizados en investigación y cualquier dato de caracterización o genotipado que integren estaría ligada a los materiales biológicos que posibilitan, en última instancia, tanto las investigaciones como los desarrollos industriales.

8. Facilitando el acceso a los recursos fitogenéticos

La humanidad depende de la disponibilidad continua de un amplio conjunto de recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura, que le permita mantener la seguridad alimentaria y económica. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de recursos que existen, nos enfrentamos a obstáculos importantes para su movilización y uso sostenible (Kell et al., 2017).

Hay que considerar que el cambio climático es un proceso en curso, por lo que los recursos genéticos tendrán que conservarse y movilizarse continuamente para hacer frente a los nuevos retos conforme cambien las condiciones en las próximas décadas (FAO, 2015b). Esto provoca una mayor interdependencia entre países y regiones, de forma que la producción a nivel mundial recae en los recursos fitogenéticos procedentes de todo el mundo, lo que implica que su movimiento resulte esencial. El Segundo Plan de acción mundial para RFGAA, aprobado por el Consejo de la FAO en noviembre de 2011, reconoce este mayor grado de interdependencia de los países como consecuencia de las nuevas condiciones ambientales y propone, entre los elementos para hacer frente al cambio climático, dar más apoyo a su acceso y movilización (FAO, 2011).

Las nuevas condiciones climáticas pueden provocar que los cultivares locales y variedades comerciales pierdan su adaptación a las condiciones ambientales de los lugares



donde tradicionalmente se han cultivado, por lo que se necesitarán cultivos de otras regiones que presenten mejor adaptación al nuevo entorno. Por ejemplo, las expectativas climáticas para África indican que para 2050 muchos países de este continente experimentarán nuevos entornos climáticos que actualmente no existen. De estos países se estima que el 75% presentarán climas análogos con el clima actual de al menos otros cinco países, lo que sugiere que el movimiento internacional del germoplasma será fundamental para la adaptación de la agricultura a estos nuevos climas (Burke et al., 2009).

Los bancos de germoplasma, además de conservar los recursos genéticos, tienen como objetivo promover su utilización, que se materializa en la actividad de suministro a los usuarios de material y la información asociada. Esta transferencia se realiza según las limitaciones normativas o acuerdos vigentes en cada país, lo que provoca que en muchos países el acceso a los recursos genéticos esté limitado por un entorno político demasiado complejo.

El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), establecido en la Conferencia de Naciones Unidas celebrada en Río de Janeiro en 1992 y ratificado inicialmente por 168 países, supuso un importante avance en la regulación del intercambio de recursos genéticos. En él se reconoce la soberanía de los países sobre su germoplasma original, si bien este Convenio no es aplicable a las colecciones *ex situ* establecidas con anterioridad a su entrada en vigor. Esto significa que los recursos genéticos pasan de ser “patrimonio de la humanidad de libre acceso” a estar sujetos a la jurisdicción de los países donde se encuentran (Art. 15). Actualmente lo han ratificado 196 países y es el único instrumento internacional que se ocupa de la biodiversidad en su conjunto. El CDB establece un acceso a los recursos de forma bilateral, con las dificultades que supone, para cada caso, tener que negociar términos específicos de acceso a los recursos genéticos y el reparto de beneficios (ABS, Access to genetic resources and Benefit Sharing).

Sin embargo, dadas las características especiales y diferenciadas de los RFGAA, y la gran interdependencia de los países respecto a su uso (Flores-Palacios et al., 1997; Khoury et al., 2015), la aplicación del CDB generaba una situación de incertidumbre respecto a la seguridad alimentaria. Para solucionar estos problemas la FAO abrió un proceso negociador que culminó en 2001 con la firma en Roma del Tratado Internacional sobre los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura, en adelante el Tratado. España, junto a la mayoría de países de la UE, lo ratificó en 2004, año en el que entró en vigor. El Tratado establece un Sistema Multilateral de Acceso, frente al sistema bilateral del CDB, mediante el cual los países firman-



tes acuerdan poner sus recursos genéticos para usos agrícolas a disposición de los otros países firmantes y aceptan, a la vez, hacer un reparto común de los beneficios derivados de unos determinados usos del material genético (investigación, mejora y capacitación). Las colecciones *ex situ* bajo el control y la administración de los países firmantes están obligadas a incluir en el Sistema Multilateral del Tratado el material del Anexo 1, en el que se listan los 64 cultivos para los que aplica el Tratado, siempre que no esté sujeto a derechos de propiedad intelectual. Una característica de este tratado es que las transferencias de cualquier material incluido en el mismo se deben realizar bajo los mismos términos y condiciones, utilizando un único Acuerdo Normalizado de Transferencia de Material (ANTM).

A pesar de la existencia de legislación internacional, en una encuesta a nivel mundial realizada por la Secretaría del Tratado se constata, entre otros “cuellos de botella” del uso de los RFGAA, la necesidad crítica de abordar el acceso al material vegetal e información asociada (Kell et al., 2017).

Entre las limitaciones del Tratado se podría destacar el número de países y de cultivos en los que se aplica. Actualmente, el tratado incluye 143 países firmantes más la Unión Europea: todos los países de la Unión Europea, Estados Unidos, muchos países latinoamericanos, y la gran mayoría de los países de África, Asia y Oceanía. Importantes ausencias son China, Rusia, México y Sudáfrica. El Sistema Multilateral da cobertura a 35 de los aproximadamente 150 cultivos alimentarios que se comercializan en el mercado a nivel mundial. Considerando que además existen otros cultivos que se comercializan exclusivamente a nivel local y que, a medida que avance el cambio climático, es probable que sea necesario intercambiar una mayor variedad de especies entre países y regiones, resulta necesario poder garantizar que estos recursos también tengan un acceso justo y equitativo para quienes lo necesitan (Jarvis et al., 2015).

Estos aspectos se trataron en la Séptima reunión del Órgano Rector del Tratado, celebrada en octubre de 2017 en Kigali (Rwanda), donde se puso de manifiesto además, la necesidad de mejorar el funcionamiento del Sistema Multilateral, revisar el ANTM, ampliar la cobertura del Sistema Multilateral, aumentando el número de especies que se incluyen en el Anexo I, y preparar una evaluación adecuada sobre el funcionamiento del sistema y los mecanismos de su puesta en marcha.

A nivel nacional, en cuanto a la aplicación del Tratado, es importante destacar que todas las colecciones públicas españolas con material que cumpla los requisitos del Sistema Multilateral están obligadas a facilitarlo mediante el ANTM, cuando el solicitante se encuentre bajo la jurisdicción de un país firmante del Tratado.



La Ley 30/2006 “de semillas y plantas de vivero y de recursos fitogenéticos”, trata por primera vez el acceso a los recursos fitogenéticos para la agricultura y la alimentación, pero no establece un sistema de acceso, únicamente indica algunas pautas para el desarrollo reglamentario. El Real Decreto que desarrollará el capítulo de acceso del Título IV de la citada Ley está actualmente en proceso de desarrollo (MAPAMA, 2017). Este desarrollo reglamentario tendrá como ámbito de aplicación todos los recursos fitogenéticos bajo la administración y el dominio público en España, que no estén bajo la jurisdicción del Tratado, independientemente de la administración que sea (estatal, autonómica o local). Además, establecerá el procedimiento para el acceso a los RFGAA españoles cuando su utilización sea con fines de investigación comercial, y establecerá medidas simplificadas cuando el acceso sea exclusivamente con fines de investigación no comercial. El acceso a los recursos fitogenéticos *in situ*, se regula por el Real Decreto 124/2017 en el que se indica que la autoridad competente es el órgano que designe la Comunidad Autónoma en cuyo territorio se encuentre el recurso. Respecto a los recursos fitogenéticos *ex situ* (bancos de germoplasma), el órgano gestor de la institución de conservación *ex situ* de carácter o titularidad pública, es quién actúa como autoridad competente. Finalmente, cabe destacar que en la Ley se aborda, en su Artículo 48, el Programa Nacional de Conservación y Utilización Sostenible de los RFGAA, que se ha desarrollado mediante el Real Decreto 199/2017, que trata fundamentalmente sobre la conservación de los RFGAA, y tiene entre sus objetivos establecer la adecuada estructura de la Red de Bancos de Recursos Fitogenéticos que encauce la necesaria cooperación nacional e internacional en el tema.

Otro paso adelante en la regulación del acceso a los recursos genéticos y reparto justo y equitativo de los beneficios que se deriven de su utilización fue la entrada en vigor el 12 de octubre de 2014 del Protocolo de Nagoya (PN). El PN regula, para los países firmantes del mismo, el acceso a los recursos fitogenéticos no incluidos en el Anexo I del Tratado, o para países no firmantes del Tratado o para otros usos distintos de la agricultura y la alimentación. El Reglamento UE 511/2014, relativo a las medidas de cumplimiento de los usuarios del PN sobre el acceso a los recursos genéticos y participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de su utilización en la Unión, establece como principal obligación de los usuarios de recursos genéticos y/o conocimientos tradicionales asociados a los recursos genéticos la de actuar con Diligencia Debida, que es la obligación de los usuarios para que busquen, conserven y transfieran a los usuarios posteriores la documentación de acceso, que en la mayor parte de los casos, tras la entrada en vigor del PN, es el certificado inter-

nacional de cumplimiento. También permite acceder a los recursos fitogenéticos que no se encuentran incluidos en el Anexo I del Tratado utilizando el ANTM, entendiéndose que se cumple la Diligencia Debida.

España, a través del artículo 71 de la Ley 42/2007 de Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, tras su modificación por la Ley 33/2015 (entrada en vigor el 7 de octubre de 2015), pasa a regular el acceso a los recursos genéticos españoles, requiriendo la obtención de la preceptiva autorización de acceso. La Ley establece las autoridades competentes de acceso y las oportunas infracciones y sanciones. Igualmente a través de los artículos 72, 74, 80 y 81 de la Ley 42/2007, se establecen las infracciones y sanciones relativas al incumplimiento de las obligaciones y procedimientos previstos en el Reglamento 511/2014 en relación con las medidas de cumplimiento del Protocolo de Nagoya. Todos estos procedimientos se han concretado a través del Real Decreto 124/2017, de 24 de febrero, relativo al acceso a los recursos genéticos procedentes de taxones silvestres y al control de la utilización. En este Real Decreto se introduce, en la legislación española, las obligaciones derivadas de los reglamentos europeos en materia de utilización de recursos genéticos y conocimientos tradicionales asociados, y regula el acceso a los recursos genéticos españoles. Esta legislación deriva del Convenio sobre Diversidad Biológica, que recoge entre sus objetivos la participación justa y equitativa en los beneficios derivados de la utilización de recursos genéticos (tercer objetivo), y del Protocolo de Nagoya, que desarrolla una serie de principios y obligaciones para el efectivo cumplimiento de dicho objetivo.

En definitiva, resulta evidente que la necesidad de adaptación de los cultivos para hacer frente al cambio climático está creando un mayor grado de interdependencia de los recursos fitogenéticos entre los diferentes países y regiones que requiere agilizar el proceso de movilización de estos recursos. Los bancos de germoplasma, que tienen entre sus responsabilidades suministrar el material, deben en consecuencia conocer y aplicar las normativas y acuerdos vigentes que correspondan, con el fin de facilitar la movilización y uso sostenible de los recursos fitogenéticos que conservan.

9. Agradecimientos

Este trabajo de revisión ha sido financiado en parte por los proyectos RFP2015-00016, RFP2015-0012, RFP2015-0008-C4-1 y RFP2016-0008-C4-1.



10. Bibliografía

- Aguirre-Gutiérrez J, Treuren R van, Hoekstra R, Hintum, TJJ van. 2017. Crop wild relatives range shifts and conservation in Europe under climate change. *Diversity and Distributions*, 23: 739-750.
- Alercia A, Diulgheroff S, Mackay M. 2015. *FAO/Bioversity Multi-Crop Passport Descriptors V.2.1 [MCPD V.2.1]*. FAO, Rome, Italy.
- Andika DO, Onyango MOA, Onyango JC. 2008. Role of Bambara groundnut (*Vigna subterranea*) in cropping systems in Western Kenya. In: J Smartt and N Haq (eds) *New Crops and Uses: Their Role in a Rapidly Changing World*. Centre for Underutilized Crops, University of Southampton, Southampton, UK.
- Bhattacharya S. 2016. Syrian seed bank gets new home away from war. *Nature*, 538: 16-17.
- Bourdeix R, Johnson V, Baudouin L, Tuia VS, Kete T, Planes S, Lusty C, Weise S. 2011. Polymotu: A new concept of island based germplasm bank based on an old Polynesian practice. *Ogasawara Research* 37: 33-51.
- Burke MB, Lobell DB, Guarino L. 2009. Shifts in African crop climates by 2050, and the implications for crop improvement and genetic resources conservation. *Global Environ. Change* (2009). doi:10.1016/j.gloenvcha.2009.04.003
- De la Rosa L, Aguiriano E, Mallor C, Rubio-Teso ML, Parra Quijano M, Torres E, Iriondo JM. 2013. Prioritized crop wild relatives in Spain: status on the National Inventory of Plant Genetic Resources for Agriculture and Food. *Crop Wild Relative* 9: 23-26.
- De la Rosa L, Martín I. 2016. Las colecciones de germoplasma de variedades tradicionales. Las variedades locales en la mejora genética de plantas. Ruiz de Galarreta, J.I., Prohens, J., Tierno, R. (eds.). *Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco*. Vitoria-Gasteiz. ISBN: 978-84-457-3395-0, pp 43-59.
- Dwivedi SL, Scheben A, Edwards D, Spillane C, Ortiz R. 2017. Assessing and exploiting functional diversity in germplasm pools to enhance abiotic stress adaptation and yield in cereals and food legumes. *Frontiers in Plant Science*, 8, art. no. 1461.
- Engels JMM, Visser L. (eds.). 2007. Guía para el manejo eficaz de un banco de germoplasma. *Manuales de Bioversity para Bancos de Germoplasma No. 6*. 189 pp. ISBN-13: 978-92-9043-767-3.
- FAO. 1996. Report on the state of the world's plant Genetic Resources for food and agriculture. Commission of Genetic Resources and Agriculture. FAO, Rome, Italy.



- FAO. 2010. The second report on the state of the world's plant genetic resources for food and agriculture. Commission of Genetic Resources and Agriculture. FAO, Rome, Italy.
- FAO. 2011. Segundo Plan de acción mundial para los recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura. En: <http://www.fao.org/agriculture/crops/mapa-tematica-del-sitio/theme/seeds-pgr/gpa/es/>
- FAO. 2015a. Coping with climate change – the roles of genetic resources for food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- FAO. 2015b. Directrices voluntarias en apoyo de la integración de la diversidad genética en la planificación nacional de la adaptación al cambio climático. Comisión de Recursos Genéticos para la Alimentación y la Agricultura. Roma, 2015.
- Flores-Palacios X. 1997. Contribution to the Estimation of Countries' Interdependence in the Area of Plant Genetic Resources. Background Study Paper No. 7, Rev. 1. FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture
- Fu YB. 2017. The Vulnerability of Plant Genetic Resources Conserved Ex situ. *Crop Science*, 57: 2314-2328.
- Hernández E. 2013. Cultivos infrutilizados en España: pasado, presente y futuro. *Ambienta*, 102: 38-55.
- Heywood VH, Dulloo ME. 2005. In situ Conservation of Wild Plant Species—a Critical Global Review of Good Practices. IPGRI Technical Bulletin No. 11. FAO & IPGRI. IPGRI, Rome.
- Hunter D, Heywood VH (eds). 2010. *Crop Wild Relatives: A Manual of in situ Conservation*. Earthscan, London.
- Iriondo JM, Maxted N, Dulloo ME (eds). 2008. *Conserving Plant Genetic Diversity in Protected Areas*: CAB International, Wallingford.
- Jarvis A, Lane A, Hijmans R. 2008. The effect of climate change on crop wild relatives. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 126: 13–23.
- Jarvis A, Upadhyaya H, Gowda CLL, Aggarwal PK, Fujisaka S, Anderson B. 2015. Plant genetic resources for food and agriculture and climate change. En: *Coping with climate change – the roles of Genetic Resources for Food and Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Pp: 9-20.
- Kell S, Marino M, Maxted N. 2017. Bottlenecks in the PGRFA use system: Stakeholders' perspectives. *Euphytica* 213: 170, 24 pp.



- Khoury CK, Achicanoy HA, Bjorkman AD, Navarro-Racines C, Guarino L, Flores-Palacios X, Struik PC. 2015. Where our food crops come from: A new estimation of countries' interdependence in plant genetic resources. CIAT Policy brief, 25. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 4 pp. Cali, Colombia.
- Lusty C, Guarino L, Toll J, Lainoff B. 2014. Genebanks: Past, Present and Optimistic Future. En: NK Van Alfen (ed) Encyclopedia of Agriculture and Food Systems. Elsevier. Amsterdam. Pp: 417-431.
- MAPAMA. 2017. Normativa española en materia de ABS. Jornada Técnica sobre el Acceso y la Utilización de los Recursos Genéticos en el sector de la Mejora Vegetal. Madrid, 28 de noviembre de 2017.
- Maxted N. (ed). 2012. Agrobiodiversity Conservation: Securing the Diversity of Crop Wild Relatives and Landraces. CAB International, Wallingford.
- Naylor R, Falcon W, Fowler C. 2007. The Conservation of Global Crop Genetic Resources in the Face of Climate Change. Summary Statement from a Bellagio Meeting held on September 3-7, 2007. Department for International Development. Discussion Paper. 20 pp.
- Padulosi S, Heywood V, Hunter D, Jarvis A. 2011. Underutilized species and climatic change: current status and outlook. En: SS Tadvav, RJ Redden, L Hatfield, H Lotze-Campen, AE Hall (eds) Crop Adaptation to Climatic Change. John Wiley & Sons, Ltd. Sussex. Pp: 507-521.
- Padulosi S, Hodgkin T, Williams JT, Haq N. 2002. Underutilized crops: trends, challenges and opportunities in the 21st Century. In: JMM Engels et al. (eds) Managing Plant Genetic Resources, pp. 323-338. CAB International, Wallingford, UK and IPGRI, Rome, Italy.
- Padulosi S, Mal Bhag, Ravi S Bala, Gowda J, Gowda KTK, Shanthakumar G, Yenagi N, Dutta M. 2009. Food security and climate change: role of plant genetic resources of minor millets. Indian Journal of Plant Genetic Resources, 22: 1-16.
- Pardo de Santayana M, Morales R, Aceituno L, Molina M (eds) 2014. Inventario español de conocimientos tradicionales relativos a la biodiversidad. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. 411 pp.
- Parra-Quijano M, Iriondo JM, Torres E, De la Rosa L. 2011. Evaluation and Validation of Ecogeographical Core Collections using Phenotypic Data. Crop Science, 51: 694-703. doi:10.2135/cropsci2010.05.0273

- Red Andaluza de Semillas “Cultivando Biodiversidad”. 2011. Memoria final de la Actividad sobre la Guía de conocimientos sobre utilización y manejo tradicional ligadas a las variedades autóctonas. Red Andaluza de Semillas “Cultivando Biodiversidad” (ed). Sevilla.
- Rubio-Teso L, Torres E, Parra-Quijano M, De la Rosa L, Fajardo J, Iriondo JM. 2018. National Inventory and Prioritization of Crop Wild Relatives in Spain. *Genetic Resources and Crop Evolution* (En prensa).
- Snook LK, Dulloo ME, Jarvis A, Scjeldeman X, Kneller M. 2011. Crop Germplasm Diversity: The role of Gene Bank Collections in Facilitating Adaptation to Climate Change. En: SS Tadvav, RJ Redden, L Hatfield, H Lotze-Campen, AE Hall (eds) *Crop Adaptation to Climatic Change*. John Wiley & Sons, Ltd. Sussex. Pp: 495-506.
- Vernooy R, Shrestha P, Sthapit B, Ramirez, M. (eds.) 2016. Bancos comunitarios de semillas: orígenes, evolución y perspectivas. Bioversity International, Lima, Perú. 1ª ed.
- Weise S, Oppermann M, Maggioni L, Hintum TJL van, Knüpffer, H. 2017. EURISCO: The European search catalogue for plant genetic resources. *Nucleic Acids Research*, 45: 1003- 1008, <https://doi.org/10.1093/nar/gkw755>
- Williams DE. 2013. Cultivos infrautilizados, cambio climático y un nuevo paradigma para la agricultura. *Ambienta*, 102: 56-65.
- Yamasaki, F, Borrayo E, Castro-Cortes ME, Martínez-Peña MD, Takeya, M. (2016). Development of a National Center of Genetic Resources Passport Database: Managing Agriculture, Forestry, Livestock, Microbial, and Aquatic Genetic Resources with an Integrated Schema. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 50: 387-393.