ADOPCIÓN DE ÁRBOLES NATIVOS VALIOSOS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA Y LA REFORESTACIÓN

CARLOS VÁZQUEZ-YANES Y ANA IRENE BATIS

Centro de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México.
Apdo. Postal 70-275, Ciudad Universitaria, 04510 México D. F., México.

Resumen. Con base en el problema que plantea la destrucción de las comunidades vegetales naturales y el consecuente deterioro ecológico que esto acarrea, se propone la alternativa de emplear especies de plantas leñosas nativas en la restauración ecológica, la reforestación y el desarrollo de sistemas agrosilvopastoriles. La domesticación de plantas silvestres se basa en su conocimiento biológico y ecológico y el dominio de las técnicas de propagación mas adecuadas a cada propósito. Existen además técnicas para seleccionar y fijar en la descendencia cualidades valiosas a través de la selección clonal o sexual y la ingeniería genética. Se discute la importancia de iniciar el desarrollo de un proyecto de domesticación con base en la flora nativa.

Palabras clave: micropropagación, propagación, restauración, selección clonal, semillas.

Abstract. Based on the omnipresent destruction of most natural plant communities and on its consequences on the deterioration of the environment, the need for ecological restoration, reforestation and development of agrosilvopastoralist systems, composed by domesticated native woody plants is urged. The domestication of wild plants is based on the knowledge of their biological and ecological traits and about the best suited propagation means, and the possible amelioration of the clones and lines by using clonal o sexual selection of the best plant traits or by means genetic engineering techniques. The importance of a national initiative for plant domestication is discussed.

Key words: clonal selection, micropropagation, propagation, restauration, seed.

En un período relativamente corto la vegetación de México ha sufrido extensas alteraciones antrópicas. Muy pocas áreas del territorio nacional contienen aún comunidades ecológicas inalteradas. La huella de la deforestación, las quemadas de monte, el sobrepastoreo y sus consecuencias sobre la vegetación y el suelo fértil están a la vista en casi cualquier paisaje del país (Vázquez-Yanes y Orozco-Segovia, 1989). Ante esta situación de tan graves consecuencias sobre la productividad del campo y la conservación de la biodiversidad, aparece como una prioridad inaplazable comenzar a desarrollar estrategias para revertir este terrible deterioro de una manera inteligente.

A pesar de que en la gran mayoría de las superficies muy alteradas no lograremos ya recuperar lo que antes existía, es aún posible inducir el desarrollo de una vegetación protectora que permita conservar e incrementar la fertilidad del suelo y parte de la diversidad de plantas y animales.

Un recurso fundamental para lograr lo anterior lo constituyen las especies vegetales herbáceas y leñosas nativas que tengan la potencialidad de crecer en zonas profundamente alteradas y que, con el tiempo, permitan la recuperación de la fertilidad del suelo, un microclima y un ciclo hidrológico similares a los originales y el restablecimiento de al menos parte de la flora y fauna nativa que aún sobrevive en algunos sitios.

Hasta nuestros días, los programas de reforestación desarrollados por los gobiernos estatales, el ejército y las dependencias del gobierno federal han hecho uso principalmente de especies de árboles exóticos mundialmente conocidos y algunas especies nativas biológicamente mal conocidas, lo que ha impedido que se tenga algún éxito en los propósitos anteriormente mencionados (Cervantes, 1996). Los bosques de especies exóticas se transforman por lo general en "desiertos verdes" que no permiten la subsistencia de la gran mayoría de las especies locales de plantas y

animales (Evans 1992). Los socorridos eucaliptos, cuando son cultivados en pendientes, cumplen muy pobremente su pretendida función de proteger el suelo de la erosión y ayudar a restaurar el ciclo hidrológico original (Vázquez-Yanes y Cervantes, 1994).

En contraposición a lo anterior, varias especies de árboles presentes en México han sido empleadas para reforestación en otros continentes. Un caso notable es el país centroafricano de Malawi, en el que se han cultivado las especies mesoamericanas *Caesalpinia velutina*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y varias otras, para renovar las fuentes de carbón para uso doméstico, sumamente escaso en esa zona de África (Ngulube, 1989).

Cuando se reforesta con especies exóticas se tienen resueltos los problemas de domesticación y disponibilidad de propágulos; sin embargo, los resultados obtenidos con éstas obligan a replantear la necesidad de domesticar y aprender a propagar especies nativas, para lo cual es necesario realizar un inventario de las especies que presenten las propiedades biológicas y ecológicas más adecuadas para cada clima y condición ambiental del país.

Para hacer uso exitoso de las especies nativas de cada región en programas de desarrollo de sistemas agrosilvopastoriles, restauración ecológica y reforestación es indispensable profundizar nuestro conocimiento sobre la biología, la ecología, la propagación y el manejo de las especies disponibles, a fin de posibilitar la domesticación de dichas especies y desarrollar técnicas eficientes de propagación, e incluso llegar a mejorar por selección sexual, clonal o ingeniería genética algunas de sus características más valiosas (Leakey y Newton, 1994). Es importante también tomar en consideración la utilidad de las especies para la población local, ya que ello redundará en una mejor conservación de las zonas restauradas.

A lo largo de las siguientes páginas se hará énfasis en las especies leñosas; sin embargo, no debemos descartar el valor que otro tipo de plantas como las gramíneas puede tener en la restauración ecológica.

Sistemas agrosilvopastoriles

Una muestra de cómo podemos utilizar plantas silvestres domesticadas de forma combinada con la producción agropecuaria son los sistemas agrosilvopastoriles, que pueden tener una estructura espacial muy variable dependiendo del tipo de ecosistema del que se trate y del propósito perseguido en su diseño. Se trata de combinaciones de cultivos de árboles y arbustos con cultivos o pastizales, que varían en secuencia temporal, composición de especies, arre-

glo espacial y en las interacciones biológicas que se dan entre sus componentes (ver figura 1). Si están bien diseñados, sus componentes leñosos pueden prestar servicios valiosos como: sombra, protección al cultivo contra el viento, control de erosión eólica, e hídrica, reducción de la evapotranspiración, acumulación de materia orgánica en el suelo, fijación del nitrógeno atmosférico en el suelo y por la vegetación, reciclaje eficiente de nutrientes minerales, retención e infiltración del agua en el suelo y un hábitat adecuado para algunas especies nativas, al mismo tiempo que se obtienen productos suplementarios a los que origina el cultivo o el ganado que se produce en el sitio (Jordan, *et al.* 1992; Lawrence, *et al.* 1994). Estos productos pueden ser: forrajes, leña y carbón, postes, abonos verdes, vainas comestibles, miel, árboles maderables y frutas, entre otras cosas (ver cuadro 1). Las otras ventajas que nos proporcionan los sistemas agrosilvopastoriles son en esencia una mejor conservación del suelo y reducción en el uso de fertilizantes. Desafortunadamente con frecuencia presiones de índole económica o estructuras sociales derivadas de las formas de tenencia de la tierra dificultan la implementación de estos sistemas.

Las leguminosas (Fabaceae) juegan un papel primordial en los sistemas agrosilvopastoriles tropicales por su capacidad para la fijación del nitrógeno molecular atmosférico en moléculas orgánicas; sin embargo, lo ideal es lograr una combinación de árboles cuya hojarasca tenga diferentes niveles de concentración de carbono y nitrógeno, ya que esto propicia una mejor calidad del humus formado y por lo tanto, con el tiempo, la mejora en la capacidad de intercambio catiónico en el suelo (Anónimo, 1987).

Ya se trate de restauración ecológica, reforestación o desarrollo de sistemas agrosilvopastoriles, la domesticación es la primera etapa del manejo de los árboles.

Domesticación de árboles

La domesticación es la adopción de plantas en la naturaleza con propósitos específicos o múltiples su manejo y propagación controlada y, eventualmente, el mejoramiento de sus propiedades valiosas (Leakey y Newton, 1994). En Mesoamérica han sido domesticadas numerosas plantas de valor, entre ellas se encuentran algunos árboles frutales que han sido, al menos parcialmente, manejados por el hombre (ver cuadro 2).

Las etapas de la domesticación de árboles, de acuerdo con su nivel de complejidad son:

- 1) adopción en la naturaleza de plantas valiosas, selección de individuos con cualidades óptimas;
- 2) determinación del o los métodos de propagación

Cuadro 1. Algunos árboles (multi-propósitos) encontrados frecuentemente en diferentes agroecosistemas tradicionales del trópico mexicano

Nombre Científico	Nombre común	Familia	Usos	Sistemas tradicionales
<i>Acacia farnesiana</i> L. Willd.	Cornezuelo	Leguminosae	Com-M-Ma-Col-Me	Acah-Ma
<i>Adelia triloba</i> Hemsl. (III)	Espino blanco	Euphorbiaceae	Ma-Com-F-T	H.F-Mil-Acah-Ma
<i>Bahuinia divaricata</i> L. (II)	Calzoncillo	Leguminosae	Com-M-Co-Ud-F-Fib-Me	H.F-Acah
<i>Brosimum allicastrum</i> Swartz.	Ojite, Ramón	Moraceae	C-M-Co-It-F-Com-O-S-Ma	H.F-Mil-Acah-Ma
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg. (III)	Palo mulato	Burseraceae	Cf-Co-It-M-Ma-Ar-Cv-Com-S-F-Ce-Me	H.F-Mil-Acah-Ma-Po
<i>Casearia nitida</i> Jacq.	Café cimarrón	Flacourtiaceae	Co-M-Com-Ce-Me	H.F-Mil-Acah
<i>Cedrela odorata</i> L.	Cedro	Meliaceae	M-Ud-Ar-Ce-Ma-S-Co-Me	H.F-Acah-Ma-Po
<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	Ceiba	Bombacaceae	C-M-Ar-Co-Ma-Cv-S-O-Fib-Ce	H.F-Acah-Ma-Po
<i>Chlorophora tinctoria</i> (L.) Goud.	Moral, morillo	Moraceae	C-Ma-M-F-Col-Co	H.F-Ma
<i>Coccoloba barbadensis</i> Jacq. (III)	Boliche	Polygonaceae	Com-Co-It	Mil-Acah
<i>Cordia alliodora</i> (R. & P.) Cham.	Laurel	Boraginaceae	Cf-M-Co-It-Ma-Cv-F	Mil-Ma-Po
<i>Crescentia cujete</i> L.	Jícaro	Bignoniaceae	Cf-M-Ma-Com-Ud-Ar-Co-Cv-Me	H.F-Mil-Acah-Po
<i>Diospyros digyna</i> Jacq.	Zapote negro	Ebenaceae	Cf-M-Ma	H.F-Ma-Cafetal
<i>Ehretia tinifolia</i> L.	Roble, sauco	Boraginaceae	S-F-M-Co-Com-Ar-Me	H.F-Ma
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Gr.	Guanacastle	Leguminosae	Cf-Ma-M-Ud-It-Co-Cv-Com-Ar-F-S	H.F-Acah-Ma
<i>Eugenia capuli</i> O. Berg. (III)	Capulín	Myrtaceae	Cf-M-Co-Com-S-Cv-O-T	H.F-Mil-Acah-Ma-Po
<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Stendel (III)	Cocuile, mataratón	Leguminosae	C-M-Ma-Co-Cv-Com-S-Me-It-F	H.F-Acah-Po
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam. (III)	Guácimo	Sterculiaceae	Cf-M-It-Ma-Ud-Cv-S-Com-Co-F-A-Me	H.F-Mil-Acah-Ma
<i>Haematoxylon campechianum</i> L.	Palo de Tinta	Leguminosae	Co-Cv-M-Ma-Col-Ar-Me-E	H.F-Ma
<i>Lonchocarpus rugosus</i> Benth (II)	Matabuey,	chaperno	Leguminosae	M-Co-It-Col-F-Me
<i>Manilkara zapota</i> (L.) Van Royen.	Chicozapote	Sapotaceae	Cf-M-Co-Ma-F-Ud-Ar	Acah-Ma
<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urban	Chechem negro	Anacardiaceae	F-Ma-M	H.F-Acah-Ma
<i>Muntingia calabura</i> L.	Capulín	Elaeocarpaceae	Cf-M-S-Com-Ud-Co-Fib	Acah-Ma
<i>Parmentiera edulis</i> DC.	Cuajilote	Bignoniaceae	Cf-M-It-Com-F-S-Ud-Me	H.F
<i>Persea americana</i> Mill.	Aguacate	Lauraceae	Cf-M-S-Co-Ma	H.F-Mil-Acah-Ma-Po
<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg. (III)	Jabín	Leguminosae	C-Com-Co-F-M-Ma-Ar	H.F-Acah-Ma-Po
<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.	Guachimol, espino	Leguminosae	Cf-F-Co-Ma-Col-Me	H.F-Mil-Acah-Ma
<i>Pouteria sapota</i> (Jacq.) Moore & Stearn.	Mamey	Sapotaceae	Cf-Ma-M	H.F-Ma
<i>Sapindus saponaria</i> L.	Jaboncillo	Sapindaceae	C-Cv-Com-M-Co-It-Ud-Ar	H.F-Mil-Acah-Ma
<i>Spondias mombin</i> L.	Jobo	Anacardiaceae	Cf-M-Co-Ma-Cv-S-F-It	H.F-Mil-Acah-Ma-Po
<i>Swietenia macrophylla</i> King.	Caoba	Meliaceae	M-Ma-Co-Cv-Ar-Me	H.F-Acah-Ma
<i>Swietenia humilis</i> Zucc.	Caoba	Meliaceae	M-S-Co-Ma-Ud-Ar	Ma-Po
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.	Palo de rosa	Bignoniaceae	M-Co-Ma-S-Cv-Me-It	H.F-Mil-Acah-Ma
<i>Talisia olivaeformis</i> (H.B.K.) Radlk.	Guayo	Sapindaceae	Cf-M-Ma-Com-F-Me	H.F
<i>Tamarindus indica</i> L.	Tamarindo	Leguminosae	Cf-M-Ma-Com-F-Me	H.F
<i>Trichilia havanensis</i> Jacq.	Limoncillo	Meliaceae	M-Co-It-Com-Ud-Ar-Ce-Cv-T	H.F-Mil-Acah-Ma-Po
<i>Vitex gaumerii</i> Grienm	Crucillo	Verbenaceae	M-Co-It-Ma-Com-F-Me	H.F-Acah

Claves. Usos: C=Comestible; Cf=Frutal; M=Medicinal; O=Ornamental; Co=Construcción; Cv=Cerca viva; S=Sombra; Ud=Uso doméstico; Ma=maderable; Com=Combustible; Ar=Artesanal; Col=Colorante; Ce=Ceremonial; A=Abono; E=Especias, condimentos; F=Forraje; It=Instrumentos de trabajo; T=tutor de vainilla; Me=melífera; Fib=fibra.

Sistemas Tradicionales: H.F=huerto familiar o solar; Mil=milpa (diferentes etapas serales en la vegetación manejada bajo el sistema roza-tumba-quema; Acah=acahuales manejados de diferentes edades (1-40 años); Ma=monte alto manejado (acahuales viejos, más de 40 años) Po=potrero.

Tipos de crecimiento: I=bajo; II=mediano y III=rápido.

Nota: Las especies contenidas en este Cuadro no son exclusivamente nativas. Algunas especies provienen de otras regiones neotropicales o de los trópicos del viejo mundo.

Fuentes: (Alcorn, 1984; Medellín, 1988; Granich, 1995; Levy et al., 1995; Vara, et al., 1995; Barrera, 1980).

Aspectos que se toman en cuenta para definir un sistema agroforestal

- La secuencia temporal
- La composición del sistema
- El arreglo espacial
- Las interacciones biológicas entre componentes
- Las interacciones económicas entre componentes

Composición arbórea dentro de los sistemas agroforestales

- Árboles de propósitos múltiples
- Árboles de frutales y cultivos perennes
- Árboles maderables

Tipos de sistemas agroforestales según el arreglo espacial, orientación o densidad de árboles dentro de los sistemas

Árboles en linderos

- Postes vivos
- Cortinas rompevientos
- Plantaciones en linderos

Árboles dispersos

- Árboles de sombra para cultivos perennes o frutales
- Árboles dispersos en potreros

Árboles en callejones

- Cultivos anuales en callejones
- Cultivos perennes en callejones
- Barbechos en callejones
- Callejones forrajeros de estratos múltiples
- Cultivos de estratos múltiples

Servicios o productos derivados de árboles o arbustos de propósitos múltiples

• Sombreamiento	• Mejoramiento del suelo
• Protección de vientos	• Forraje
• Control de la erosión eólica	• Leña y carbón
• Control de la erosión hídrica	• Postes
• Reducción de evaporación	• Abonos verdes
• Fijación de nitrógeno	• Vainas comestibles
• Reciclaje de nutrientes	• Miel
• Conservación del agua	• Árboles maderables
	• Frutas

Figura 1. Los sistemas agrosilvopastoriles consisten en combinaciones de plantas de uso múltiple, leñosas y herbáceas, con cultivos agrícolas y/o pastizales forrajeros. Tienen efectos benéficos sobre el ambiente y el suelo, al mismo tiempo que proporcionan muy diversos productos. Las posibilidades de arreglo espacial y temporal son muy diversas.

mas efectivos, ya sea por medio de semillas o segmentos vegetativos;

3) determinación de las condiciones más favorables para el establecimiento y crecimiento de las plantas;

4) recolección, caracterización, evaluación, diversificación, mejoramiento y conservación del germoplasma disponible de la especie;

5) clonación de individuos con características óptimas, inducción de cambios en el genoma para optimizar la adecuación de las plantas a ambientes particulares y/o para incrementar su productividad (figura 2). Eventualmente la domesticación puede llevar a la pérdida de la capacidad de las plantas para sobrevivir en su ambiente natural original.

Preservar la variabilidad genética natural de las especies debe ser una de las prioridades de toda domesticación. Esta variabilidad puede conservarse *ex situ*, por ejemplo, bancos de semillas en los que se almacenen propágulos de varias poblaciones de cada especie. Preferiblemente la conservación de la diversidad genética de las especies debe ser resultado de la persistencia de sus poblaciones en comunidades naturales, por lo que un sistema de reservas de la naturaleza es un complemento importante de la domesticación de especies nativas (Longman, 1992).

La domesticación de plantas multipropósito trae beneficios para las comunidades rurales, se obtienen ingresos y trabajo por la obtención de productos de consumo para el hogar y las pequeñas industrias, al mismo tiempo que se obtienen efectos favorables en el ambiente. Los productos pueden ser: carbón, leña, madera, gomas, resinas y aceites, materiales para artesanías, medicinas, hongos, frutos comestibles, forraje, fibras materiales de construcción y otros. Entre los efectos ambientales están, control de la erosión, mejoramiento de la fertilidad del suelo, mejora del ciclo hidrológico, control de las inundaciones, disponibilidad de agua, protección de la flora y fauna y su hábitat, sombra, protección contra el viento y la lluvia (Lawrence, *et al.*, 1994).

Las plantas valiosas para la restauración ecológica que pueden mejorar con el tiempo la calidad de los suelos degradados deberían tener las siguientes cualidades:

1) ser de fácil propagación;

2) resistir condiciones limitantes, como baja fertilidad, sequía, suelos compactados, con pH alto o bajo, salinidad,

3) tener rápido crecimiento y buena producción de materia orgánica como hojarasca;

4) tener alguna utilidad adicional a su efecto restaurador; por ejemplo, producir leña, buen carbón, forraje nutritivo, vainas comestibles, madera y néctar. Al representar un beneficio para la comunidad estas plantas, no serían menospreciadas y destruidas;

Cuadro 2. Especies frutales domesticadas en Mesoamérica

Especie	Nombre común
<i>Achras zapota</i> Linn	zapote
<i>Ananas comosus</i> (L.)	piña
<i>Anona diversifolia</i> Saff.	ilama
<i>A. glabra</i> Linn.	anona
<i>A. purpurea</i> Moc et Sesse	chincuya
<i>A. reticulata</i> Linn.	anona
<i>A. squamosa</i> Linn.	zaramullo
<i>Brosimum alicastrum</i> Swartz.	ramón
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) DC	nance
<i>Carica papaya</i> Linn.	papaya
<i>Casimiroa edulis</i> Llave et Lex	zapote blanco
<i>C. sapota</i> Oerst.	matasano
<i>Crataegus pubescens</i> (HBK) Steud.	tejocote
<i>Diospiros ebenaster</i> Retz.	zapote negro
<i>Opuntia</i> spp.	tuna
<i>Parmentiera edulis</i> DC.	cuajilote
<i>Persea americana</i> Mill.	aguacate
<i>Persea schiedeana</i> Ness.	chinín
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	capulín
<i>Psidium guajava</i> Linn.	guayaba
<i>Spondias mombin</i> Linn.	ciruela de agua
<i>S. purpurea</i> Linn.	ciruela de agua

Fuente: Harlan J.R. 1975. Crops & Man. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, pp. 77

- 5) nula tendencia a adquirir una propagación malezoides invasora, incontrolable;
- 6) presencia de nódulos fijadores de nitrógeno o micorrizas que compensen el bajo nivel de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes en el suelo.
- 7) que tiendan a favorecer el restablecimiento de las poblaciones de elementos de la flora y fauna nativas proporcionándoles un hábitat y alimento (Gómez-Pompa, 1985).

Con el tiempo los conglomerados de estas plantas pueden llegar a facilitar de forma natural el reciclaje de nutrientes, preservándose la fertilidad, y en general acercándose gradualmente a la manera como funcionan las comunidades naturales.

Existen en México varios miles de especies leñosas nativas que son potencialmente valiosas para proceder a utilizarlas con los propósitos antes mencionados. Un primer paso sería inventariar los recursos vegetales disponibles, haciendo énfasis en incrementar nuestro conocimiento acerca de las características de las especies y su relación con su potencialidades de uso, tales como: taxonomía, distribución geográfica, usos conocidos y conocimiento empírico y científico existente, historia de vida, hábitat y ubicación en la sucesión ecológica, resistencia a factores limitantes, capacidad para tolerar suelos pobres, degradados y químicamente alterados, potencialidad reproductiva, etcétera.

Propagación

El dominio de las técnicas de propagación más adecuadas para cada propósito es un requisito básico de la domesticación exitosa. Esta puede ser sexual, por medio de semillas, o asexual, por medio de algunos tipos de segmentos vegetativos como los esquejes. Ambas formas se han practicado desde los orígenes mismos del cultivo de plantas. El injerto es otra valiosa técnica de propagación muy utilizada en fruticultura. Existen numerosos textos en que se explica con detalle cada una de las técnicas y los problemas que pueden presentarse con algunas especies (*e. g.* Arriaga, *et al.*, 1994; Dirr y Heuser, 1987; Hartmann, *et al.*, 1990; Longman, 1993).

El cultivo de tejidos vegetales surgió durante este siglo y tiene ahora muchas aplicaciones en la propagación y mejoramiento de plantas (Smith y Drew, 1990). Por mucho tiempo, las técnicas de micropropagación a través de cultivo de tejidos, han sido consideradas muy complicadas como para convertirse en una opción viable para la propagación de árboles en regiones subdesarrolladas; sin embargo, tal punto de vista es poco realista ya que existen métodos de micropropagación que pueden ser desarrollados, incluso contando con recursos técnicos e instalaciones mínimas. Una vez que se ha probado que una especie de planta puede ser micropropagada exitosamente, es posible simplificar notablemente los procedimientos para hacerlos accesibles a instalaciones de propagación rurales relativamente sencillas (Baker, 1992). Por el contrario, el cultivo de tejidos en su aspectos más avanzados ha permitido el surgimiento de la biotecnología vegetal, que ha llegado a ser uno de los más importantes desarrollos de la botánica aplicada durante este siglo (Mantell, *et al.*, 1989). Sus aplicaciones al manejo y mejoramiento de árboles ofrecen varias opciones. Entre estas destacan la micropropagación masiva de plantas cuyas características genéticas pueden controlarse con gran precisión; la generación de semillas sintéticas; la producción de plantas libres de virus y otros parásitos endófitos; el mejoramiento genético de plantas y la inducción de nuevas potencialidades en los vegetales, a través de la ingeniería genética; la biosíntesis *in vitro* de metabolitos secundarios de valor farmacéutico e industrial, a partir de cultivos de células vegetales en bioreactores, etc (Villalobos, 1996). La técnica de producción de semillas sintéticas de origen somático permitirá en el futuro disponer de un número ilimitado de semillas de árboles genéticamente uniformes. Un litro de cultivo de células de *Picea abies* produce de cincuenta a cien mil embriones somáticos en unas cuantas semanas (Vasil, 1991; Gupta *et al.*, 1993).

Figura 2. Las etapas en la domesticación de árboles y los factores determinantes de su éxito (modificado de Leakey y Newton, 1994).

En México, se han logrado éxitos en la propagación de plantas raras o en peligro de extinción; entre ellas destaca la obtenida a partir de explantes (hojas) de individuos adultos de cicadáceas de los géneros *Zamia* y *Ceratozamia*, utilizando la técnica de generación de embriones somáticos (Chávez, *et al.*, 1992; Litz, *et al.*, 1995).

Una vez determinada la forma de propagación óptima para cada especie y propósito específico, el siguiente paso consiste en proporcionar a las nuevas plantas condiciones óptimas para iniciar su desarrollo y lograr su aclimatación, a fin de prepararlas para enfrentar las condiciones del medio natural, siendo más resistentes a los factores ambientales limitantes de su desarrollo, y por lo tanto teniendo mayores posibilidades de sobrevivir. Para este propósito se utilizan diversos tipos de viveros, sean éstos rústicos, especializados o de nivel industrial, para la producción masiva de plantas. Existen numerosas obras en que se detalla la construcción y manejo de estas instalaciones (Nisley 1990, Arriaga, *et al.*, 1994). El vivero juega también un papel importante en la conservación, manejo, y distribución o comercialización del material vegetal propagado; o sea, en la administración de los programas de repoblación vegetal (Smith, 1986).

Conservación de germoplasma

El almacenamiento de semillas es la forma principal de mantener germoplasma vivo *ex situ* de plantas superiores por largos períodos de tiempo. Los bancos de semillas son un complemento indispensable para el manejo de especies valiosas y permiten conservar el germoplasma de especies o genotipos en peligro de extinción. Su existencia es también un requisito para la restauración ecológica o reforestación a gran escala (Willan, 1985).

Las semillas pueden ser obtenidas a través de la recolecta de campo, por medio de compra o intercambio con otros laboratorios y jardines botánicos, o a partir de rodales de árboles semilleros de alta calidad previamente seleccionados y establecidos en un terreno designado para ese propósito. Es importante que los bancos tengan un control adecuado de las fuentes de semillas y puedan garantizar su continuidad y accesibilidad, ya que de otra manera la existencia continua de semillas de alguna especie podría verse interrumpida al incrementarse la demanda. Las labores cotidianas de los bancos consisten en determinaciones de la viabilidad, la pureza, la sanidad, y el vigor de las semillas con el fin de conservar y intercambiar los mejores lotes de éstas. La documentación de las

semillas consiste básicamente en un registro completo de la edad, origen y características de cada muestra, lo cual se logra a través de la toma de datos esenciales como lugar y fecha de colecta, viabilidad, tratamientos aplicados y cualquier otro asunto relevante (Burley, 1987). Todo esto permite disponer de semillas certificadas en las que la calidad y las características están bien documentadas y pueden ser respaldadas por medio de un certificado (Ellis, *et al.*, 1985, Willan, 1985).

La mayoría de las semillas pueden permanecer vivas por mucho tiempo, cuando se almacenan en un ambiente seco y frío, que es el más apropiado para interrumpir su deterioro natural (semillas ortodoxas). Otras plantas producen semillas que no resisten esas condiciones y sufren un deterioro rápido por causas endógenas, independientes de las condiciones externas (semillas recalcitrantes). Algunas semillas toleran la desecación pero no el frío (intermedias) de las cuales por ahora se conocen pocas especies como la papaya (Vázquez-Yanes *et al.*, 1996).

Existen procedimientos relativamente simples para almacenar por tiempo prolongado semillas ortodoxas como el que se sigue en la Universidad Tecnológica de Madrid, según Gómez-Campo (1985), (figura 3).

En México, la Universidad Autónoma de Chapingo ha desarrollado un banco de germoplasma de especies nativas dentro de su Programa Nacional de Etobotánica, que cuenta con colecciones de semillas de numerosas especies de árboles (Cuevas Sánchez, 1994). Otras instituciones intentan hacer lo mismo.

No todas las semillas pueden ser almacenadas con éxito, pero existen alternativas para la conservación del germoplasma *in vitro* por medio de técnicas basadas en el cultivo de tejidos, como los cultivos de tejidos de crecimiento lento, la criopreservación y criodeshidratación, el encapsulado y la vitrificación de tejidos que se aplican ya a algunos árboles (Villalobos y Engelman, 1995).

Mejoramiento

Existen tecnologías, tanto ancestrales como modernas, para acentuar y mejorar algunas características valiosas de las plantas y lograr que éstas sean transmitidas a su descendencia.

Selección clonal

La propagación vegetativa permite emplear técnicas de selección y mejoramiento de las características favorables de las plantas a través de la selección clonal. Las características que pueden mejorarse cubren un amplio rango de posibilidades; por ejemplo, la

resistencia de las plantas a las temperaturas extremas, a la sequía, a crecer en suelos pobres o con características desfavorables como acidez o alcalinidad excesiva, salinidad alta o saturación de humedad. También puede mejorarse el rendimiento de forraje y/o frutos, su sabor y calidad nutricional, la velocidad de crecimiento, la calidad de la madera producida y la concentración de compuestos secundarios valiosos como sustancias químicas, látex, gomas y otras. Por ejemplo, la selección clonal ha permitido que el árbol del caucho (*Hevea brasiliensis*) haya incrementado su producción de látex de aproximadamente tres litros anuales por árbol silvestre a más de 16 litros por árbol en plantaciones (Carron *et al.*, 1989).

Existen fundamentalmente dos aproximaciones a la selección clonal que consisten en: 1) buscar en la naturaleza las plantas que presenten la característica deseada en forma óptima; por ejemplo, los frutos más deliciosos y grandes, tomando de ese individuo en particular los meristemos o segmentos que se vayan a utilizar para la propagación vegetativa y obtener de esa manera muchos individuos con la característica deseada; 2) recolectar semillas, segmentos o meristemos de muchos individuos de una o varias poblaciones de la especie a propagar, producir con este material gran número de plantas pequeñas en un vivero para someterlas a las condiciones desfavorables para las que se desea tener una mayor resistencia o, alternativamente, comparar su velocidad de crecimiento o su producción de forraje o cualquier otra cualidad que se desee resaltar. Se escogen así los individuos que muestren las características óptimas, según el caso, y se utilizan para propagarlos vegetativamente, y obtener los individuos mejores para el propósito deseado. Esta técnica incluye la exploración de las diversas poblaciones de una especie en el medio natural, ya que en el área natural de distribución geográfica de una especie puede haber gran variación en muchos de los atributos deseables de ésta (Abbott y Atkin, 1988). Por selección clonal se han obtenido especies de *Acacia* resistentes a la salinidad o al suelo ácido, mezquites (*Prosopis*) ornamentales resistentes al frío, especies del género *Leucaena* productoras de abundante forraje de alta calidad y vainas, combinada con rápido crecimiento en suelos pobres y por último, árboles maderables cuyo crecimiento está determinado por una fuerte dominancia apical, lo cual ha permitido repoblar las selvas con individuos que producen un fuste o tronco recto y alto, muy apropiado para seguir técnicas óptimas de aserrado y uso en ebanistería, como en el caso de los árboles africanos del género *Triplochiton* en los que fue posible restablecer el fuste derecho de los individuos en la selva (figura 4). Éste se había perdido por el corte

Figura 3. Diagrama de los pasos y tratamientos que hay que seguir para almacenar muestras de semillas ortodoxas, deshidratadas y a baja temperatura. Este procedimiento permite almacenar semillas a muy largo plazo de forma sencilla (Gómez-Campo, 1985).

selectivo de los individuos más perfectos, consecuentemente, se tenía el predominio de los individuos deformados en las poblaciones de las selvas de Nigeria (Leakey, 1987, Macklin, 1993).

Mejoramiento sexual

En árboles y en general en muchas especies leñosas, el empleo de técnicas de entrecruza y generación de vigor híbrido para la producción de plantas mejoradas se dificulta grandemente por los largos ciclos

generacionales de estas plantas. Debido a esto, deben transcurrir muchos años para obtener varias generaciones en el proceso de mejoramiento por selección sexual; sin embargo, este obstáculo está siendo allanado gracias a la inducción temprana de la floración en árboles a través de técnicas *in vitro*. Se ha tenido éxito en especies de bambú (Chambers, *et al.*, 1991). En una especie de álamo ha sido posible acelerar la floración en plantas de sólo cinco meses de edad, a través de la transformación de su genoma con un gene de floración de *Arabidopsis* (Weigel y Nilson, 1995).

Ingeniería genética

Es posible transformar genéticamente a las plantas introduciéndoles, por medio de las técnicas de ingeniería genética, características nuevas procedentes del genoma de otros organismos vivos (Mantell, Matthews *et al.*, 1989). Aunque el porvenir del uso de estas técnicas en la domesticación de plantas leñosas para usos múltiples es aún incierto, hay grupos de investigación interesados en esta línea de trabajo (Whetten y Sederoff, 1991). Uno de los aspectos más desarrollados es la inducción de resistencia a insectos por medio de la introducción en el genoma de árboles de genes codificadores de toxinas procedentes de algunas bacterias (Strauss, *et al.*, 1991).

Conclusiones

En los umbrales del siglo XXI México tiene un futuro ecológico sombrío e incierto que sin duda pondrá en riesgo los éxitos económicos y políticos que puedan alcanzarse más adelante.

Es imperativo iniciar un programa nacional de restauración de la cubierta vegetal que tome en cuenta la diversidad florística y la de los árboles nativos de cada región ecológica, escogiendo aquéllos que por sus características biológicas y ecológicas valiosas, tengan mayores posibilidades de promover la protección del suelo y de las cuencas de los ríos, el mejoramiento de la fertilidad del suelo y el restablecimiento de las condiciones ecológicas que permitan el retorno, a partir de las zonas más conservadas, de la fauna y la redistribución de la flora nativas que poblaron antes las áreas ahora degradadas. Se cuenta con los conocimientos y la tecnología para iniciar esta empresa.

Agradecimientos

Este trabajo es una versión modificada de la Conferencia Magistral impartida por el autor (CVY) en el XIII Congreso Mexicano de Botánica, que tuvo lugar en Cuernavaca, Morelos, México, del 5 al 11 de no-

Figura 4. La selección clonal para obtener árboles de fuste recto se logra en dos etapas. 1) Obtener en la comunidad natural segmentos de árboles de fuste recto (A), evitando los que no lo presenten (B). 2) Al desarrollarse las estacas, las que presenten la mayor dominancia apical en su yema en desarrollo (A') para ser nuevamente propagadas, se seleccionan y se desechan las que no presentan esta característica (B').

viembre de 1995. Agradecemos a la Mesa Directiva en turno, de la Sociedad Botánica de México, su invitación a presentar dicha conferencia. Mariana Rojas-Aréchiga gentilmente transcribió la conferencia. Elena Álvarez-Buylla proporcionó valiosas referencias bibliográficas. Dos revisores anónimos hicieron observaciones valiosas para mejorar el manuscrito.

Literatura citada

- Abbott A. and Atkin R. Eds. 1988 *Improving vegetatively propagated crops*. Academic Press, Londres.
 Alcorn J.B. 1984. *Huastec Mayan Ethnobotany*, University of Texas Press, Austin Tx.

- Anónimo. 1987. *Proceedings and recommendations of a project planning meeting on amelioration of soil by trees*. Commonwealth Science Council, Eldoret, Kenya.
 Arriaga V., Cervantes V. y Vargas-Mena A. 1994. *Manual de reforestación con especies nativas: colecta y preservación de semillas, propagación y manejo de plantas*. Instituto Nacional de Ecología, SEDESOL/ UNAM, México D. F.
 Baker F.W.G. Eds. 1992. *Rapid propagation of fast-growing woody species*. CAB International, Wallingford, United Kingdom.
 Barrera A. 1980. Sobre la unidad de habitación tradicional campesina y el manejo de recursos bióticos en el área maya yucatanense. *Biótica* 5(3):115-129.
 Burley J. 1987. Problems of tree seed certification in developing countries. *Commonwealth Forestry Review* 66:151-159.
 Carron M.P., Enjalric F., Lardet L. and Deschamps A. 1989. Rubber (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) En: Bajaj Y.P.S. Eds. *Biotechnology in agriculture and forestry*, Vol. 5 Trees II, Springer Verlag, Berlin. 222-245.
 Cervantes V. 1996. *La reforestación en la Montaña de Guerrero: una alternativa con leguminosas nativas*. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, Mexico D. F.
 Chambers S.M., Heuch J.H.R. and Pirrie A. 1991. Micropropagation and *in vitro* flowering of the bamboo. *Plant, Cell, Tissue and Organ Culture* 27:45-48
 Chávez V.M., Litz R.E. and Norstog K. 1992. Somatic embryogenesis and organogenesis in *Zamia fischeri*, *Z. furfuracea* and *Z. pumila*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 30:99-105
 Cuevas Sánchez J.A. 1994. *Banco de germoplasma de especies nativas*. Programa Nacional de Etnobotánica 1. Depto de Fitotecnica, Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México.
 Evans J. 1992. *Plantation forestry in the tropics*. Clarendon Press, Oxford. 403 pp
 Dirr M.A. and Heuser Ch.W. 1987. *The reference manual of woody plant propagation: from seed to tissue culture*. Varsity Press, Athens, Georgia.
 Ellis R.H., Hong T.D. and Roberts E.H. 1985. *Handbook of seed technology for genebanks. Vol I. Principles and methodology II. Compendium of specific germination information and test recommendations*. International Board for Plant Genetic Resources, FAO, Roma, Italia.
 Gómez-Campo C. 1985. Seed banks as an emergency conservation strategy. En: Gómez-Campo C, Eds. *Plant conservation in the mediterranean area*. Dr. W. Junk Publishers. Dordrecht, 237-247.
 Gómez-Pompa A. 1985. *Los Recursos bióticos de México (Reflexiones)*. Editorial Alhambra Mexicana, México D. F.
 Granich C.I. 1995. Vegetación y milpa en el ejido de Yaxcaba, Yucatán. En: Hernández-Xolocotzi E., Bello E.B. y Levy S. compiladores. *La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional*. Tomo I. Colegio de Postgraduados, 129-148.
 Gupta P.K., Pullman G., Timmis R., Kreitingner M., Carlson

- W.C., Grob J., and Welty E. 1993. Forestry in the 21st Century: the biotechnology of somatic embryogenesis. *Bio/Technology* 11:454-457.
- Harlan J.R. 1975. *Crops & man*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- Hartmann H.T., Kester D.E. and Davies F.T. 1990. *Plant propagation, principles and practices*. Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ.
- Jordan C.F., Gajaseni J. and Watanabe H, Eds. 1992. *Taungya: forest plantations with agriculture in Southeast Asia*. CAB International, Wallingford, United Kingdom.
- Lawrence A., Pennington T. and Johnson J. Eds. 1994. *Guía para uso de árboles en sistemas agroforestales para Santa Cruz, Bolivia*. Centro de Investigación Agrícola Tropical, Santa Cruz, Bolivia.
- Leakey R.R.B. 1987. Clonal forestry in the tropics, a review of developments, strategies and opportunities. *Commonwealth Forestry Review* 66:61-75.
- Leakey R.R.B. and Newton A.C. Eds. 1993. *Trees: the potential for domestication and the rebuilding of forest resources*. Institute of Terrestrial Ecology, Scotland. UK.
- Leakey R.R.B. and Newton A.C. Eds. 1994. *Domestication of tropical trees for timber and non-timber products*. MAB Digest 17. UNESCO, Paris.
- Levy S., Hernández-Xolocotzi E., García E., y Castillo A. 1995. Estudio de la sucesión secundaria bajo roza-tumba-quema en Yucatán. En: Hernández-Xolocotzi, E, Bello, E.B. y Levy, S, compiladores. *La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional*. Tomo I. Colegio de Postgraduados, 149-170.
- Litz R.E., Moon P.A. and Chávez V.M. 1995. Somatic embryogenesis from leaf callus derived from mature trees of the cycad *Ceratozamia hildae*. (Gymnospermae). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 40:25-31.
- Longman K.A. 1992. Growth physiology, propagation and replacing the tropical forest. *Botanical Journal of Scotland* 46:311-320.
- Longman K.A. 1993. *Rooting cuttings of tropical forest trees*. Commonwealth Science Council, Londres. .
- Macklin D. 1989. A nursery for the rainforest. *New Scientist* 1693:47-52.
- Mantell S.H., Matthews J.A. and McKee R.A. 1989. *Principles of plant biotechnology. An introduction to genetic engineering in Plants*. Blackwell, Oxford, UK.
- Medellín S. 1988. *Arboricultura y silvicultura tradicional en una comunidad totonaca de la costa*. Tesis de Maestría en Ecología y Recursos Bióticos. INIREB, Xalapa, Veracruz.
- Nisley R.G. Eds. 1990. *The container tree nursery manual*. Agriculture Handbook 674. U. S, Department of Agriculture, Forest Service, Washington D. C.
- Ngulube M.R. 1989. Seed germination, seedling growth and biomass production of eight Central-American multipurpose trees under nursery conditions in Zomba, Malawi. *Forest Ecology and Management* 27:21-27.
- Smith D.M. 1986. *The practice of silviculture*. John Wiley & sons, New York, NY.
- Smith M.K. and Drew R.A. 1990. Current applications of tissue culture in plant propagation and improvement. *Australian Journal of Plant Physiology* 17:267-289.
- Strauss H.S., Howe G.T. and Goldfarb B. 1991. Prospects for genetic engineering of insect resistance in forest trees. *Forest Ecology and Management* 43:181-209.
- Vara A. 1995. La dinámica de la milpa en Yucatán: el solar. En: Hernández-Xolocotzi E., Bello E.B. y Levy S. compiladores. *La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional*. Tomo I. Colegio de Postgraduados, 225-246.
- Vasil I.K. Edr. 1991. *Scale-up and automation in plant propagation*. Academic Press, San Diego, CA.
- Vázquez-Yanes C. y Orozco-Segovia A. 1989. *La destrucción de la naturaleza*. La Ciencia desde México 83, Fondo de Cultura Económica, México D. F.
- Vázquez-Yanes C. y Cervantes V. 1993. Estrategias para la reforestación con árboles nativos de México. *Ciencia y Desarrollo* 19:52-58.
- Vázquez-Yanes C., Orozco-Segovia A., Sánchez-Coronado M.E., Rojas-Aréchiga M. y Cervantes, V. 1996. *La Reproducción de las plantas: semillas y meristemos*. La ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México D. F. (en prensa).
- Villalobos V.M. 1996. Impacts of biotechnology in international agriculture and forestry, en: Sobral B.W.S. Edr. *The impact of plant molecular genetics*, Birkhäuser, Boston MA. pp 299-314.
- Villalobos V.M. and Engelmann F. 1995. *Ex situ* conservation of plant germplasm using biotechnology. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 11:375-382.
- Weigel D. and Nilsson O. 1995. A developmental switch sufficient for flower initiation in diverse plants. *Nature* 377:495-500.
- Wetten R. and Sederoff R. 1991. Genetic engineering of wood. *Forest Ecology and Management*. 43:301-316.
- Willan R.L. 1985. *A guide to forest seed handling with special reference to the tropics*. FAO, Rome, Forestry Paper 20/2, 379 p.