

EL ROMERILLO (*Taxus globosa* Schlecht.): BIOLOGÍA, DIFICULTADES Y PERSPECTIVAS DE SU USO

F. Zavala-Chávez¹; M. Soto-Hernández²; Ma. T. Rodríguez-González²

¹Departamento de Ecología y Silvicultura, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Apartado Postal 84, Chapingo, Estado de México. México. C.P. 56230, (Tel. y fax 595-4-19-57).

²Laboratorio de Fitoquímica, Programa de Botánica, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. México.

RESUMEN

El propósito de este trabajo fue presentar información integrada de *Taxus*, en particular de la especie mexicana (*T. globosa*). Fue basado en una revisión bibliográfica, trabajo de campo, laboratorio y de herbario. La información existente muestra que las especies son morfológicamente semejantes pero biológicamente poco conocidas, su taxonomía se apoya en su distribución geográfica. *T. globosa* se distribuye de manera discontinua desde el norte de México (Tamaulipas y Nuevo León) hasta Honduras en Centroamérica; florece de enero a marzo y fructifica de mayo a noviembre; su regeneración natural se basa en las semillas; aunque produce rebrotes del tallo, lo que puede ser un potencial de propagación vegetativa importante. Es una planta venenosa en todas sus partes excepto el arilo, el cual es atractivo y comestible para aves. En su naturaleza tóxica radica su importancia económica ya que produce un pseudoalcaloide llamado taxol, el cual actúa contra diversos tipos de cáncer, entre ellos el ovárico, por lo que se espera un aumento considerable en su demanda. La información bibliográfica de *Taxus* es muy escasa, especialmente sobre la especie mexicana; además de ser una especie rara, no se ha estudiado, por lo que se desconocen sus características biológicas, poblacionales y de su hábitat. Se concluye sobre el potencial de uso de la especie mexicana y las necesidades de su investigación. Se requiere estudiarla para fines de protección, propagación, conservación y posible cultivo.

PALABRAS CLAVE: hábitat, conservación, taxol.

ROMERILLO (*Taxus globosa* Schlecht.): ITS BIOLOGY AND PROBLEMS AND PERSPECTIVES FOR USE

SUMMARY

The purpose of this study was to present integrated information on *Taxus*, particularly the Mexican species *T. globosa*. The study is based on a review of literature, laboratory and field work, and herbarium study. The existing information shows that the species are morphologically similar, but are relatively unknown in terms of their biology, and taxonomically they are classified by their geographic distribution. *T. globosa* is distributed, unevenly, from northern Mexico (Tamaulipas and Nuevo León) to Honduras. It flowers from January to March and produces fruit from May to November. In nature, it reproduces by seed, although it produces sprouts from the stem, an important potential for vegetative propagation. All of the plant's parts are poisonous except for the arilo, which is edible and attracts birds. It is in its toxic nature that its economic importance lies. It produces a pseudo-alkaloid called taxol, which acts against various types of cancer, among these ovarian cancer, and thus a considerable increase in its demand is expected. Bibliographic information on *Taxus* is very scarce, especially on the Mexican species, which is rare and has not been studied, and its biological characteristics, its population and habitat are unknown. The paper concludes with a description of its potential for use and the need to investigate it in order to protect, propagate, conserve, and possibly cultivate it.

KEY WORDS: habitat, conservation, taxol.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales son una importante reserva de biodiversidad. Esta se ha reducido con las crecientes demandas generadas por el aumento de asentamientos humanos en zonas rurales. Uno de los riesgos implícitos es la extinción de especies, muchas de las cuales son benéficas en la resolución de problemas propios de la humanidad, además de constituir acervos genéticos de gran valía. El uso desmedido de especies vegetales para fines diversos (medicinales, combustibles, muebles, etc.) y su desconocimiento, han sido causas de extinción. Esto ha alcanzado proporciones alarmantes en los últimos años, debido a la explotación intensiva de bosques y selvas, así como a los desastres causados por incendios.

La investigación de sustancias activas de plantas ha aumentado recientemente y se ha convertido en una carrera contra el tiempo. Se precisa conocerlas antes que las plantas silvestres se reduzcan o se extingan. Desde el siglo pasado, muchas especies de plantas han sido investigadas científicamente, en la búsqueda de sus actividades biológicas (biosíntesis).

La implementación práctica del aprovechamiento sostenible de los recursos es uno de los mayores retos de la humanidad en estos tiempos. La investigación de fenómenos y procesos naturales con fines de dicho aprovechamiento deberá cumplir con criterios de este tipo, en especial de las especies y ecosistemas «prohibidos» (aquellos que por su fragilidad pueden desaparecer ante disturbios severos). Este conflicto entre factores ecológicos y económicos se ilustra con el caso del taxol, un fármaco presente en especies de *Taxus* para el cual se ha encontrado un uso potencial, principalmente en el tratamiento del cáncer ovárico.

Las especies de *Taxus* son árboles biológicamente poco conocidos, especialmente sobre los aspectos reproductivos. Su desconocimiento, en particular de la especie mexicana (*T. globosa* Schlecht.), se debe, en buena parte, a su escasez en las áreas de su distribución natural. Se trata de lugares protegidos, propios de cañadas relativamente húmedas y a menudo con pendientes pronunciadas, constituyendo paisajes atractivos para esparcimiento.

Debido a la escasez de información sobre *T. globosa* en México y a que es una especie con gran potencial de uso medicinal, se ha preparado el presente escrito. El propósito fue mostrar lo que es y lo que puede ser de *T. globosa* en nuestro país. Se presenta de manera integrada y sucinta, información bibliográfica complementada con datos de campo y de laboratorio, obtenida mediante trabajos preliminares realizados por los autores, así como con datos de herbario.

ANTECEDENTES Y DISCUSIÓN

Taxonomía

Taxus es un género taxonómico de la familia Taxaceae, que agrupa entre siete y doce especies del Hemisferio Norte (Cope, 1998); ha tenido problemas de ubicación taxonómica. Según Sporne (1974), una de las familias muy afines a Taxaceae es Podocarpaceae, a tal grado que algunos autores habían considerado a ambas en una sola familia junto con *Cephalotaxus* y *Podocarpus*. En alguna ocasión, por ejemplo, *T. globosa* fue considerada como una pinácea, denominándosele entonces *T. mexicana* subsp. *senilis* (Cope, 1998). No obstante, registros fósiles de *Taxus* del Jurásico (*T. jurassica*) y de especies modernas mostraron que producía óvulos terminales solitarios, por lo cual se consideró a *Taxus* y géneros afines en una sola familia, Taxaceae (Sporne, 1974). Al nivel específico, también han existido problemas taxonómicos, debido a que todas las especies de *Taxus* son morfológicamente semejantes. Esto ha provocado el uso de la distribución geográfica como principal característica distintiva (Standley y Steyermark, 1958). Se ha propuesto que todas las especies pertenecen a *T. baccata*; así, un nombre usado para la especie mexicana, de acuerdo con esa propuesta, es *T. baccata* subsp. *globosa* (Cope, 1998). Al respecto, el uso de características fitoquímicas podría ayudar en el esclarecimiento taxonómico de estas especies.

Importancia económica

Taxus ha sido considerado de importancia económica en los países europeos desde antaño. Por su belleza escénica, *T. baccata* se hizo popular en los jardines europeos del siglo XVII, siendo aprovechada como ornamental en Europa y posteriormente en América. En general, diversas especies de *Taxus* se plantan para una gran variedad de propósitos hortícolas, particularmente en jardines como árboles de ornato y setos. A pesar de su carácter venenoso, se plantan de manera abundante (Cope, 1998); se cultivan en parques y jardines públicos; su madera es de buena calidad, dura y compacta; en Europa se han usado tradicionalmente en marquetería. El tejo europeo se presta fácilmente al cultivo, lo cual ha permitido la obtención de unas 40 variedades cultivadas en países del Reino Unido. Tal especie suele ser llamada «árbol de la muerte», lo cual está justificado por el carácter venenoso tanto del follaje como del fruto, excepto el arilo. Esta característica fue utilizada por Catavoleus de la época del imperio romano, quien prefirió envenenarse con extractos de tejo antes que rendirse ante los romanos. También ha sido utilizado como antídoto contra picadura de víboras; en los Siglos XVII y XVIII fue considerado como un antimalárico y antirreumático (Apendino, 1993). En tiempos más recientes se le ha reconocido su actividad sobre el corazón, por lo que se ha sugerido como tónico cardíaco. Sin embargo, la naturaleza tóxica de las plantas de *Taxus* ha obstaculizado su uso

terapéutico; se sabe de su uso como abortivo en la medicina tradicional, lo cual ha sido una de las causas principales de envenenamiento humano. Actualmente se conocen variedades cultivadas de al menos seis especies (*T. baccata*, *T. brevifolia*, *T. canadensis*, *T. cuspidata*, *T. chinensis* y *T. floridana*) (Cope, 1998). Bajo condiciones de cultivo, las plantas de *Taxus* parecen resistir el pleno sol y tienen la ventaja de retoñar generosamente después de la poda, razón por la cual también es común su uso para setos en Estados Unidos.

Los usos locales actuales y potenciales que se le han dado al romerillo (*T. globosa*) en México y Centroamérica son poco conocidos. Se sabe que rara vez se usa localmente como planta de ornato (Hidalgo), maderable, cortiente y en la elaboración de carbón (Zamudio, 1992). Pero su importancia mayor, y a más corto plazo, tal vez sea su uso medicinal, pues su investigación puede brindar importantes perspectivas. Aún se requiere indagar en el potencial de uso de *T. globosa*, pues, dado su carácter escaso en el país y la necesidad de propagarla, su importancia podría ser más hortícola que forestal.

Biología

Los llamados tejos en Europa y Norteamérica, o romerillos o granadillos en México, son árboles dioicos que se reproducen por semilla. Una de las características comúnmente mencionadas de las especies de plantas conocidas es su talla. Por ejemplo, el romerillo en México (*T. globosa*) es un árbol pequeño de 6 a 10 m de alto, con tallo de 30 a 40 cm de diámetro a la altura del pecho. En cambio, la especie europea, *T. baccata*, alcanza los 20 m de alto, con un tallo de cerca de 2.2 m de diámetro a la altura del pecho. No obstante, se desconoce la distribución diamétrica o la estructura de edades de las poblaciones de la especie mexicana.

Los árboles de *T. globosa* florecen de diciembre a marzo o de febrero a mayo, según el sitio; se ha observado polinización abundante en febrero y marzo. La fructificación ocurre de mayo a agosto en algunas localidades del norte del país o de julio a noviembre en otras del centro (Figura 1), pero aún se desconoce la variabilidad y el grado de sincronía o asincronía en la floración de las poblaciones silvestres. Abundantes frutos maduros se han observado entre septiembre y noviembre en Hidalgo. Las estructuras reproductoras activas se presentan en los brotes del crecimiento del año anterior. De acuerdo con observaciones de campo, la regeneración parece basarse de manera más importante en la producción de semillas, pero en algunos lugares se ha encontrado una notable producción de rebrotes a partir de la base del tallo. Esto podría ser indicio de un mecanismo regenerativo combinado, una característica de la especie que podría ser aprovechada para su propagación y regeneración artificial en México.

Estudios fenológicos cuantitativos de la especie en varias localidades del país serían interesantes para el conocimiento del proceso reproductivo. Uno de los pocos estudios al respecto es el de Dupler (citado por Miller, 1988), quien estudió las estructuras ovulíferas del tejo canadiense (*T. canadensis*). Según Miller (1988), los árboles femeninos de *Taxus* presentan brotes primarios sobre los cuales se desarrollan brotes secundarios, que a su vez son portadores de un óvulo terminal en un eje axilar con escamas arregladas helicoidalmente, el cual, al madurar, se cubre con una estructura carnosa de color rojizo (arilo), comestible y muy atractiva para aves (Figura 1a). Los árboles masculinos presentan sus estructuras reproductoras en diminutos estróbilos formados por cinco a nueve sacos polínicos (Figura 1b). El ciclo reproductivo de *T. globosa* parece cubrirse en un año, iniciándose de octubre a noviembre y concluyendo de septiembre a noviembre del siguiente año (Figura 2); pero se desconocen los detalles de la diferenciación de estructuras reproductoras y de la fertilización de óvulos, además de la fenología completa de la especie.



Figura 1. Ramillas de *Taxus globosa* Schlecht. del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México, durante la época de fructificación (a, estructuras femeninas en septiembre) y polinización (b, estructuras masculinas en enero).

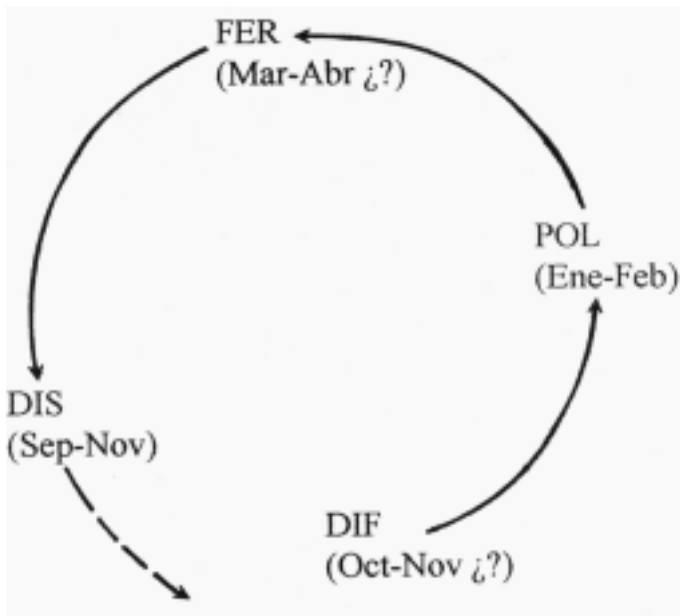


Figura 2. Ciclo reproductivo aproximado de *Taxus globosa* (DIF: diferenciación; POL: polinización; FER: fertilización; DIS: diseminación; ¿?: falta de información). Basado en observaciones de campo.

Stiles (1980), *T. canadensis* llega a producir unas 19,400 semillas por kg en la época de fructificación (que inicia en agosto) en Norteamérica, las cuales son dispersadas principalmente por aves. Este tipo de dispersión ha permitido sentar las bases para la explicación de la variación geográfica del tejo europeo (*T. baccata*) (Sporne, 1974). Esta última especie también es conocida como «árbol de la muerte», debido a que es una planta venenosa en todas sus partes excepto en la colorida estructura carnosa (arilo) mencionada, y que rodea la semilla. Este arilo es comestible y de sabor dulce; al comerlo de la especie mexicana recuerda el sabor de una cereza madura, pero la semilla es venenosa en todas las especies. Tal vez por esta razón las aves transportan el fruto, comen el arilo y arrojan la semilla como desecho, participando en su dispersión. Sin embargo, observaciones recientes en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo, también han mostrado arilos eliminados y semillas aparentemente consumidas por alguna especie aún no identificada.

Distribución

Las especies de *Taxus* se distribuyen en Norteamérica, Europa, Asia, Oceanía (Malasia) y tal vez norte de África y las Islas Azores (Florin, 1963); se sabe que su distribución es más amplia en Europa y Asia que en América (Cope, 1998). Entre las especies registradas se encuentran *T. baccata* de Europa, *T. brevifolia* del oeste de los Estados Unidos, *T. canadensis* del oeste de Canadá, *T. cuspidata* de Japón, Corea y Manchuria, *T. chinensis*

del este de China, *T. floridana* del este de Estados Unidos (Florida) (Little, 1980a,b) y *T. vallichiana* del Himalaya, además de la especie mexicana (*T. globosa*). *T. globosa* se distribuye desde el norte de México (Tamaulipas y Nuevo León) hasta Honduras en Centroamérica. En México se encuentra en los estados de Hidalgo, Querétaro, México, Oaxaca y Veracruz (Standley, 1920-26; Zamudio, 1992), pero, de acuerdo con información de herbario del Colegio de Postgraduados (CHAPA) y de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo (CHAP), también se encuentra en Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas (Figura 3). Según Rzedowski (1978), es una de las especies mexicanas de distribución discontinua que establecen relación florística con el este de Norteamérica (Estados Unidos y Canadá) y que forman parte del bosque caducifolio en los Estados Unidos y del bosque mesófilo de montaña en México. Además, *T. globosa* es una de las especies características de la provincia florística de las serranías meridionales del país (Rzedowski, 1978).



Figura 3. Distribución natural aproximada de *Taxus globosa* en México (Basada en Standley, 1920-26; Zamudio, 1992 y datos de herbario).

Ecología

Taxus globosa fue incluida en el «listado de especies raras, amenazadas, en peligro de extinción, o sujetas a protección especial, ... en la república Mexicana», bajo el *status* de especie rara en peligro de extinción, debido a que es una especie «...cuyas poblaciones se encuentran reducidas numéricamente hasta un nivel crítico y cuyo hábitat ha experimentado una reducción tan drástica que se les considera en peligro inmediato de desaparecer» (SEDUE, 1991). Sin embargo, de acuerdo con la nueva Norma Oficial Mexicana (SEDESOL, 1994), *T. globosa* ha sido calificada recientemente

como una especie "rara". De cualquier manera, varios de los aspectos relacionados con la especie y su hábitat, han sido constatados por observaciones donde crece *T. globosa* en el país y por otras fuentes (Zamudio, 1992) en las cuales es considerada como una especie escasa y vulnerable. Su hábitat ha sido destruido de manera creciente en los últimos años, lo cual «...puede afectar drásticamente a las pocas poblaciones que existen y ocasionar su desaparición» (Zamudio, 1992). Por tal razón, es pertinente considerar investigaciones a fin de generar información que permita la repoblación y conservación (*in situ* y *ex situ*) de dicha especie, así como de su hábitat.

Los lugares donde habitan las plantas de *Taxus* en el mundo son hondonadas de montañas, cañadas, barrancas y otros lugares sombríos o, al menos, laderas con exposición al norte y por tanto húmedas gran parte del año, ya sea por la precipitación pluvial o por las nieblas frecuentes. Parece ser que no toleran el pleno sol y crecen preferentemente en suelos básicos, aunque lentamente. En general, son árboles longevos, como lo muestran ejemplares ingleses que alcanzan 1,500 años de edad, pero que, bajo condiciones naturales, crecen de manera aislada; son escasos y aparentemente propios de vegetación secundaria sucesionalmente intermedia o tardía y de distintas asociaciones arbóreas. Se cree que los tejos actuales de Europa (*T. baccata*) son restos de antiguas poblaciones muy abundantes y que crecían en condiciones más favorables que en la actualidad (Florin, 1963). El hábitat de los tejos europeos no parece diferir mucho del existente en lugares mexicanos, donde el romerillo (*T. globosa*) también se encuentra de manera escasa. Estos son de difícil acceso, pues se trata de terrenos escarpados, generalmente de fondos de cañadas, pero son agradables y atractivos para los visitantes con fines de esparcimiento. Con frecuencia se observan cantidades de basura esparcida en sitios del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, donde vive el romerillo, lo cual es fuente de contaminación importante de su hábitat.

La información recabada sobre los sitios donde crece *T. globosa* en México, muestra que se encuentra en diversos tipos de vegetación de varias de las entidades federativas antes mencionadas, particularmente en el bosque mesófilo de montaña. La altitud de los lugares donde se encuentra varía desde 1,000 m en Querétaro, hasta cerca de los 3,000 m de altitud en Oaxaca, casi siempre coexistiendo con elementos propios del bosque mesófilo de montaña, o con los propios de bosques de coníferas, entre otros (Cuadro 1). Sin embargo, no existe aún trabajo alguno sobre *T. globosa* que haya documentado las características particulares de su hábitat y las especies asociadas al mismo, de sus poblaciones actuales y anteriores (por ejemplo, estructura) y sus tendencias (crecimiento o disminución), los usos locales y los mecanismos regenerativos u otros aspectos de interés.

CUADRO 1. Datos sobre la distribución de *Taxus globosa* y su asociación con otras especies en el país. Basado en observaciones de campo y datos de herbario.

Entidad	Altitud (m)	Tipo de vegetación	Géneros asociados
Hidalgo	2500-2600	BO, BO-E	<i>Abies</i> , <i>Quercus</i>
Querétaro	1000-2900	BMM, BP, BO	<i>Abies</i> , <i>Garrya</i> , <i>Pinus</i>
Nuevo León	2600-2700	BMC	<i>Pinus</i> , <i>Pseudotsuga</i> , <i>Abies</i> , <i>Quercus</i>
Oaxaca	2000-3000	BP-E	<i>Pinus</i> , <i>Quercus</i>
San Luis Potosí	2300-2500	BMM, BP-A	<i>Pinus</i> , <i>Garrya</i>
Tamaulipas	1400-1500	BMM	<i>Quercus</i> , <i>Liquidambar</i> , <i>Podocarpus</i> , <i>Acer</i>

BMC: bosque mixto de coníferas, BMM: bosque mesófilo de montaña, BO: bosque de oyamel, BO-E: bosque de oyamel-encino, BP: bosque de pino, BP-A: bosque de pino-aguacatillo, BP-E: bosque de pino-encino.

Recientemente se han visitado con relativa frecuencia algunos de los sitios donde crece *T. globosa*, en los cuales existen relativamente pocos árboles de esta especie. En estos lugares hay claros en los bosques provocados por la tala en sus inmediaciones, así como basura, a causa de la afluencia de visitantes, pues son lugares muy cercanos a las vías de acceso. Aparentemente, esto ha causado que la lluvia caiga más directamente al piso del bosque, provocando algún grado de erosión, además de aumentar la creciente de los arroyos del fondo de las cañadas y con ello arrastrar árboles juveniles o plántulas de *T. globosa*, deteriorando finalmente su hábitat. Como consecuencia, la escasez de plántulas es lo común, pues sólo son observadas bajo el dosel de los árboles más grandes. En estos sitios, como ocurre posiblemente en todos los del país donde existe *Taxus*, no se sabe qué especie o especies de fauna silvestre participan en su dispersión o depredación de semillas, o si la producción de éstas es suficiente para abastecer los requerimientos para mantener e incrementar la población. Por ser una especie dioica, *T. globosa* requiere de una proporción de individuos masculinos y otra de femeninos en la población para que se lleve a cabo el proceso reproductivo, pues aparentemente la regeneración es sólo a partir de semilla, aunque se han observado individuos con rebrotes cerca de la base del tallo y que sugieren un potencial de propagación vegetativa importante. Aún no existe información sobre la cantidad de individuos masculinos, femeninos y juveniles de alguna población de *T. globosa* en México. Se requiere saber cuántos individuos son incorporados a la población, cuántos son eliminados y cuáles son los principales factores de mortalidad y la magnitud de la producción de semillas, etc. Las características de las semillas de *Taxus* también requieren ser analizadas, a fin de idear métodos de regeneración artificial o de producción de plántulas en vivero.

Las semillas de *T. baccata* presentan un letargo embrionario, el cual significa que no germinan normalmente con el rompimiento de su testa (Bewley y Black, 1994).

Ese tipo de letargo es más “profundo” que en las semillas con letargo impuesto por la testa, como sucede en el colorín (*Erythrina*, leguminosa). Aparentemente las condiciones que provocan lixiviación atenúan el reposo y permiten el crecimiento de la radícula. El causante del letargo en semillas de *Taxus* es el ácido abscísico y se ha probado que en un medio líquido dicho ácido se libera por lixiviación y el embrión germina.

Un análisis preliminar hecho en tres sitios de Hidalgo en época de floración de *T. globosa* (febrero de 1992, 1995 y 1998), mostró que de 150 individuos observados, los individuos femeninos reproductivamente maduros fueron relativamente escasos y más de la mitad (68 %) fueron juveniles (incluidas unas cuantas plántulas) (Figura 4); estos últimos mostraron un promedio de edad estimada de 10.6 años (± 8.0), siendo de 19 y de 3 años el de mayor y menor edad, respectivamente. El diámetro promedio a la altura del pecho de los adultos fue de 31 cm (± 16.5) para los femeninos y de 26 cm (± 14.1) para los masculinos, de los cuales posiblemente sean de más edad los primeros por su mayor diámetro; un individuo juvenil (inmaduro reproductivamente) tuvo 3.5 cm de diámetro en la base, 2 m de alto y 25 años de edad, estimada ésta con el recuento del número de cicatrices de brácteas de las yemas apicales y que muestran los crecimientos anuales del tallo; esto evidencia la lentitud de su crecimiento. Aparentemente son pocos los juveniles que se han incorporado a la población en los últimos años. Esto podría indicar disminución poblacional o en la producción de semillas, pero no se sabe aún de cuántos individuos se compone la población completa, cuáles son sus edades, cuál es la producción anual de semilla, cuántas llegan a germinar y cuál es la supervivencia de las plántulas, etc. Observaciones realizadas de septiembre a noviembre de 1998 mostraron una acentuada escasez de semillas, contrastando con lo observado en 1997. Esto sugiere un hábito mayor producción de semillas en *T. globosa*, lo cual no ha sido registrado en la literatura, o un efecto detrimental causado por incendios forestales ocurridos en 1998.

Figura 4. Proporción de individuos de *T. globosa* en edad reproductiva y juveniles, encontrados en sitios del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, en 1992, 1995 y 1998.

Fitoquímica

En 1964 se descubrió que un extracto de la corteza del tejo americano o del Pacífico (*T. brevifolia*) era tóxico para varios animales e incluso el hombre. El aislamiento del compuesto responsable de la toxicidad empezó un año después y se le llamó “taxol”. Se obtuvo en forma pura en 1964, y en 1971 su estructura fue descrita, con una serie de dificultades debido a su complejidad estructural y baja concentración en la planta (Wani *et al.*, 1971). El taxol es un pseudoalcaloide diterpénico, pero no es constituyente de la toxina, pues su nitrógeno está acilado con ácido benzoico y no tiene propiedades básicas. La historia de esta molécula empezó en la década de 1970, cuando el National Cancer Institute (NCI) lanzó un ambicioso proyecto para el descubrimiento de agentes anticancerígenos de plantas.

La corteza del tejo de Europa es delgada (de unos 3 mm) y un árbol de 100 años de edad puede rendir en promedio 3 kg de corteza, de los cuales se pueden aislar 300 mg de taxol. Esto significa que se requieren 10 kg de corteza de tres árboles centenarios para obtener 1 g de taxol. La planta, por su parte, necesita alrededor de 100 años para alcanzar dimensiones adecuadas (diámetro a la altura del pecho de 25 cm y altura de 6 a 9 m) para aprovechar la corteza, pero el descortezamiento mata a la planta; la corteza es relativamente delgada (3-7 mm), incluso en individuos adultos (Figura 5). La plantas de *Taxus* crecen esporádicamente, alcanzando densidades promedio de apenas 12.3 a 24.7 plantas por ha. Esta densidad es aún mayor que los 6.6 árboles por ha registrados en un sitio de bosque de oyamel de la Sierra de Pachuca, Hidalgo (Zavala, 1996).



Figura 5. Vista de la corteza externa de un ejemplar de *T. globosa* en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México.

Debido a la dificultad para obtener el taxol y a su insolubilidad en agua, su importancia fue reconocida hasta finales de la década de 1970, cuando se descubrió su mecanismo de acción. Se encontró que el taxol bloquea la división celular, debido a su capacidad de estabilizar los microtúbulos, inhibiendo la depolarización de la tubulina. De esta manera, las células pierden el control de ensamblar y desensamblar los microtúbulos que ya no se pueden dividir. Se desconoce de la existencia de otro tipo de compuestos con esta actividad (Wani *et al.*, 1971).

Los estudios con modelos experimentales, tanto *in vivo* como *in vitro*, recalcan el potencial del taxol como agente anticancerígeno en 31 tipos de tumores. Por ejemplo, la corteza del tejo occidental (*T. brevifolia*) es fuente del taxol utilizado en el tratamiento de cáncer de mama y ovárico en Estados Unidos (NGS, 1999). Se asegura que la demanda de taxol se incrementará exponencialmente en los próximos años, agravándose la dificultad de su abastecimiento. Sin embargo, la corteza de especies americanas no puede ser una solución, debido a que los árboles crecen muy lentamente (un décimo de la velocidad del abeto Douglas, *Pseudotsuga menziesii*) para obtener un rendimiento entre crecimiento y utilización.

El taxol se puede usar en medicina sólo si se desarrolla un método para obtenerlo de fuentes renovables. Las posibles aproximaciones pueden ser las siguientes:

- 1) **Fitoquímica.** Esta es una estrategia basada en la extracción del taxol de las hojas de *T. brevifolia* y de otras especies de tejo. Las hojas se pueden cosechar sin dañar a la planta y son una fuente renovable. La cosecha de hojas de plantas silvestres podría también tener efectos ecológicos favorables, protegiendo a la planta de una tala inmoderada. El mayor problema es la variabilidad en el contenido de taxol, que es más bajo (de diez a mil veces que el de por sí bajo contenido de la corteza). Por esta última razón, por la complejidad de la composición de la fracción diterpénica de las hojas y también por la presencia de derivados alcaloides muy tóxicos que pueden originar problemas de contaminación, el aislamiento de taxol de dicha fuente se vuelve muy problemático (Apendino, 1993).
- 2) **Semisíntesis.** Se basa en el aislamiento, a partir de hojas de tejo del 10-deacetil bacatina III, un compuesto que se puede transformar en taxol y del cual difiere sólo en que no tiene la cadena de fenilisoerina de C13 y un grupo acetilo en C10. Este compuesto se obtuvo a través de los estudios estructurales del taxol, siendo un producto de hidrólisis. El contenido de 10-deacetil bacatina III en las hojas del tejo europeo y otras especies es muy variable, pero en cualquier caso es generalmente más alto (hasta 10 veces) que el contenido de taxol de la corteza u hojas del tejo americano. Se han

desarrollado varios procesos para convertir la deacetil bacatina III en taxol; el más efectivo se basa en la condensación de la bacatina III protegida apropiadamente con la betalactona correspondiente al aminoácido del taxol. Esta aproximación tiene todas las ventajas del método fitoquímico, ya que empieza con una fuente renovable de derivados del taxano. Estrategias de este tipo han conducido al taxotere, el derivado sintético del taxol (Denis y Greene, 1988).

- 3) **Biotecnología.** Esta aproximación se basa en obtener el taxol de cultivo de tejidos de tejo, un proceso factible pero con la desventaja de obtener rendimientos muy bajos. A la fecha, los compuestos producidos industrialmente por cultivo de tejidos son muy pocos y los prospectos de producir taxol con este enfoque no son viables a corto plazo. Aún no se conoce en detalle la biosíntesis de taxanos, su naturaleza diterpénica se ha reconocido hasta muy recientemente. Una posibilidad sería el uso de enzimas vegetales en ciertas reacciones sintéticas, tal como cambiar la cadena de fenil-isoerina con un núcleo diterpénico.
- 4) **Síntesis.** El taxol también se ha obtenido puro, mediante su síntesis. Recientemente se descubrió la síntesis total, pero aún es poco probable que se desarrolle una síntesis comercial en la siguiente década.

A la fecha, la única alternativa práctica a partir de la cosecha de corteza de tejo es la semisíntesis, que se podría mejorar significativamente en términos de rendimiento seleccionando variedades de tejo con alto contenido de este taxano y usando también no sólo deacetil bacatina III como precursor, sino también otros como el 10-deacetil taxol, 10-deacetil cefaloneomicina, o la bacatina III, que también se encuentran en las hojas.

Las especies de *Taxus* usadas como ornamentales se han considerado como recursos renovables con un gran potencial como fuentes de taxol y taxanos afines. Actualmente, la corteza del tejo del Pacífico (*T. brevifolia*) es la única fuente de taxol usada de partes alternativas de plantas como fuentes del precursor común 10-deacetil bacatina III, pero también se puede obtener de otras estructuras, como hojas y brotes. Sin embargo, se ha encontrado variación en la concentración de taxol y del precursor común obtenidos de distintas especies cultivadas; alguna especie puede tener mayor concentración de taxol y menor del precursor (*T. baccata*) o al contrario (*T. canadensis* y *T. cuspidata*), pero, según Hansen *et al.* (1994), hay evidencias de factores epigenéticos (época de cosecha, tipo de tejido de la planta, etc.) y ambientales (tipo de suelo y fertilidad, clima, etc.) que provocan cambios en la concentración de ambos en las distintas especies (Cuadro 2).

CUADRO 2. Concentración de taxol y del precursor común (10-deacetil bacatina III) en hojas de plantas cultivadas de *Taxus* (Basado en Hansen *et al.*, 1994).

Especie	Concentración (mg·kg ⁻¹ con base en peso seco)	
	Taxol	10-deacetil bacatina III
<i>T. baccata</i>	30	200
<i>T. brevifolia</i>	60	100
<i>T. canadensis</i>	90	20
<i>T. cuspidata</i>	80	20
<i>T. globosa</i>	¿?	¿?

Las fuentes preferidas de taxol y otros taxanos de plantas de tejos ornamentales son los brotes más recientes (cortados anualmente como una práctica del cultivo estándar en viveros), las raíces y las hojas. El corte de los brotes rectos es recomendable, debido a que facilita la cosecha mecánica y reduce el costo, comparado con la cosecha de corteza de plantas silvestres (Hansen *et al.*, 1994).

Por otra parte, es importante mencionar que se han hecho estudios preliminares con hojas y corteza de *T. globosa* de Hidalgo, con la idea de explorar su contenido en taxoides. Lo observado hasta ahora (datos no publicados) es que el follaje contiene taxoides, tales como taxol y deacetil bacatina III en un orden de 0.001 %, lo cual visualiza el potencial de aprovechamiento de la especie mexicana. Esta proporción de deacetil bacatina III es similar a la encontrada en otras especies de *Taxus*.

La investigación para una solución práctica al aprovechamiento del taxol ha generado importantes investigaciones básicas, en tanto que la industria farmacéutica ha movilizó a químicos, botánicos y biólogos moleculares, de lo cual resalta la multidisciplinariedad de la ciencia moderna. De esta manera, cualquiera que sea el enfoque, el resultado final será muy sencillo: dar el taxol a quien lo necesite y, al mismo tiempo, respetar la naturaleza, puesto que, considerando las palabras de un viejo jefe indio de Seattle, Estados Unidos, «lo que pertenece a la tierra pertenece a los hijos y a las hijas de la tierra».

CONCLUSIONES

Taxus globosa tiene un gran potencial en su aprovechamiento para fines farmacéuticos, así como para otros, como el de ornato, pero su conocimiento es limitado. Se requiere estudiar esta especie desde diversos puntos de vista, entre los cuales destacan la biología y ecología de poblaciones, la fitoquímica y biosíntesis, la producción de plantas en vivero y sus posibilidades hortícolas para la

producción de taxol, así como el estudio de su hábitat para su propagación y conservación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado por el Colegio de Postgraduados y en menor proporción a la Universidad Autónoma Chapingo a través del proyecto No. 100308 (1997), para la realización del presente trabajo. Asimismo, a los revisores anónimos de la revista Chapingo, Serie Horticultura, por sus atinadas observaciones al manuscrito.

LITERATURA CITADA

- APENDINO, G. 1993. Taxol (Paclitaxel) historical and ecological aspects. *Fitoterapia* 64(1): 5-26.
- BEWLEY, J. D.; BLACK, M. 1994. *Seeds, Physiology of Development and Germination*. 2nd. ed. Plenum Press. New York, USA. 445 p.
- COPE, E. A. 1998. Taxaceae: the genera and cultivated species. *Botanical Review* 64(4): 291-322.
- DENIS J. N.; GREENE, A. E. 1988. High efficient, practical approach to natural taxol. *J. Amer. Chem. Soc.* 110: 5917-5919.
- FLORIN, R. 1963. The distribution of conifer and taxa genera in time and space. *Acta Horti Bergiani* 20(4): 121-326.
- HANSEN, R. C.; COCHRAN, K. D.; KEENER, H. M.; CROOM Jr., E. M. 1994. *Taxus* populations and clippings yields at commercial nurseries. *HortTechnology* 4(4): 372-377.
- LITTLE, E. L. 1980a. *The Audubon Society Field Guide to North American trees, Eastern Region*. Alfred A. Knopf. New York, USA. 714 p.
- LITTLE, E. L. 1980b. *The Audubon Society Field Guide to North American trees, Western Region*. Alfred A. Knopf. New York, USA. 639 p.
- MILLER, C. N. 1988. The origin of modern conifer families, pp. 448-486. *In: Origin and Evolution of Gymnosperms.* : Beck, C. B. (ed.). Columbia University Press. New York. USA.
- NGS. 1999. Diversidad de la vida. *National Geographic Society* 4(2): Mapa suplementario.
- RZEDOWSKI, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa. D. F., México. 432 p.
- SEDESOL. 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-59-ECOL-1994, que determina las especies de flora y fauna silvestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y las sujetas a protección especial y que establece especificaciones para su protección. *SEDESOL. Diario Oficial de la Federación* 488: 2-59.
- SEDUE. 1991. Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos que determinan las especies raras, amenazadas, en peligro de extinción o sujetas a protección especial y sus endemismos, de la flora y la fauna terrestres y acuáticas en la República Mexicana. *Diario Oficial de la Federación. Tomo CDLII. No. 12: 7-36.*
- SPORNE, K. R. 1974. *The Morphology of Gymnosperms*. Hutchinson University Library. London, UK. 216 p.
- STANDLEY, P. C. 1920-26. *Trees and shrubs of Mexico*. *Contr. from U. S. Nat. Herb. Vol. 23, part I.* Washington D. C., U.S.A.
- STANDLEY, P. C.; STEYERMARK, J. A. 1958. *Flora de Guatemala*. *Fieldiana* 24(1): 1-478.

- STILES, E. W. 1980. Patterns of fruit presentation and seed dispersal in bird-disseminated woody plants in the Eastern deciduous forest. *The American Naturalist* 116: 670-688.
- WANI, M. C., TAYLOR, L.; WALL, M. E.; COGGON, P.; MACPHAIL, A. T. 1971. Plant antitumor agents VI. The isolation and structure of taxol, a novel antileukemic and antitumor agent from *Taxus brevifolia*. *J. Amer. Chem. Soc.* 39(9): 2325-2327.
- ZAMUDIO R., S. 1992. Familia Taxaceae. Flora del Bajío y de sus regiones adyacentes, Fascículo 9. Instituto de Ecología, A. C. Centro Regional del Bajío. Pátzcuaro, Michoacán. México. 7 p.
- ZAVALA CH., F. 1996. Repoblación natural de encinos en la Sierra de Pachuca, Hidalgo. Tesis de Doctorado en Ciencias. Programa de Botánica, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 148 p.