

LA INVESTIGACIÓN ▶ FORESTAL ▶

EN TIEMPOS DE
CAMBIO GLOBAL:
PROBLEMÁTICAS Y PERSPECTIVAS



SUSANA GUILLÉN RODRÍGUEZ
BEATRIZ SOCORRO BOLÍVAR CIMÉ
EDISON ARMANDO DÍAZ ÁLVAREZ
(coordinadores)



Universidad Veracruzana

Esta obra se encuentra disponible en Acceso Abierto
para copiarse, distribuirse y transmitirse con propósitos no comerciales.
Todas las formas de reproducción, adaptación y/o traducción por medios mecánicos
o electrónicos deberán indicar como fuente de origen a la obra y su(s) autor(es).
Se debe obtener autorización de la Universidad Veracruzana
para cualquier uso comercial.
La persona o institución que distorsione, mutile o modifique el contenido de la obra
será responsable por las acciones legales que genere e indemnizará
a la Universidad Veracruzana por cualquier obligación que surja
conforme a la legislación aplicable.

Encuentra más libros en Acceso Abierto en:

<http://bit.ly/EditorialUVAccesoAbierto>

LA INVESTIGACIÓN
◆ FORESTAL ◆
EN TIEMPOS DE
CAMBIO GLOBAL:
PROBLEMÁTICAS Y PERSPECTIVAS

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

Martín Gerardo Aguilar Sánchez

Rector

Juan Ortiz Escamilla

Secretario Académico

Lizbeth Margarita Viveros Cancino

Secretaria de Administración y Finanzas

Jaqueline del Carmen Jongitud Zamora

Secretaria de Desarrollo Institucional

Agustín del Moral Tejeda

Director Editorial

LA INVESTIGACIÓN
◆ FORESTAL ◆
EN TIEMPOS DE
CAMBIO GLOBAL:
PROBLEMÁTICAS Y PERSPECTIVAS

SUSANA GUILLÉN RODRÍGUEZ
BEATRIZ DEL SOCORRO BOLÍVAR CIMÉ
EDISON ARMANDO DÍAZ ÁLVAREZ
(coordinadores)

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

XALAPA, VER., MÉXICO

2022

Portada: Bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional Los Dinamos, Ciudad de México. Fotografía: Edison Armando Díaz Álvarez.

Clasificación LC: SD356.54.MX I58 2022

Clasif. Dewey: 634.9072

Título: La investigación forestal en tiempos de cambio global : problemáticas y perspectivas / Susana Guillén Rodríguez, Beatriz del Socorro Bolívar Cimé, Edison Armando Díaz Álvarez (coordinadores).

Edición: Primera edición.

Pie de imprenta: Xalapa, Veracruz, México : Universidad Veracruzana, Dirección Editorial, 2022.

Descripción física: 148 páginas : ilustraciones, gráficas, mapas ; 26 cm.

Series: (Quehacer científico y tecnológico)

Notas: Glosario: páginas 143-146.

Incluye bibliografías.

ISBN: 9786078858460

Materias: Bosques--Investigaciones--México.

Ecología forestal--Investigaciones--México.

Conservación de los recursos naturales--Investigaciones--México.

Autores relacionados: Guillén Rodríguez, Susana.

Bolívar Cimé, Beatriz del Socorro.

Díaz Álvarez, Edison Armando.

DGBUV 2022 / 37

Primera edición, 20 de octubre de 2022

D. R. © Universidad Veracruzana

Dirección Editorial

Nogueira núm. 7, Centro, CP 91000

Xalapa, Veracruz, México

Tels. 228 818 59 80; 228 818 13 88

direccioneditorial@uv.mx

<https://www.uv.mx/editorial>

ISBN: 978-607-8858-46-0

DOI: 10.25009/uv.2864.1701

Impreso en México

Printed in Mexico

CONTENIDO

Introducción 11

*Edison A. Díaz-Álvarez, Susana Guillén Rodríguez
y Beatriz Bolívar Cimé*

PROCESOS ECOLÓGICOS Y CAMBIO AMBIENTAL EN LAS ALTURAS

. 1 .

LAS ALTAS MONTAÑAS DE MÉXICO: LABORATORIOS NATURALES PARA EVALUAR EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PLANTAS Y EN LOS ECOSISTEMAS 19

Susana Guillén Rodríguez y Héctor Viveros-Viveros

. 2 .

VARIACIÓN MORFOLÓGICA ADAPTATIVA DE PLANTAS FORESTALES EN GRADIENTES ALTITUDINALES 31

Héctor Viveros-Viveros y Susana Guillén Rodríguez

. 3 .

PARQUE NACIONAL COFRE DE PEROTE:
IMPORTANCIA, RIESGOS Y AMENAZAS 45

*Odettee I. Cadena Morales, Edison A. Díaz-Álvarez
y Rosa Amelia Pedraza Pérez*

**TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS
DE LA INVESTIGACIÓN FORESTAL**

. 4 .

ÁRBOLES NATIVOS PARA LA RESTAURACIÓN
ECOLÓGICA: ¿QUÉ SABEMOS? ¿QUÉ
IGNORAMOS? 59

Rosa Amelia Pedraza Pérez y Claudia Alvarez Aquino

. 5 .

PINUS JALISCANA: DESCUBRIENDO EL MISTERIO
DE SU PROPAGACIÓN VEGETATIVA 71

Armando Aparicio-Rentería

. 6 .

ALGUNAS APLICACIONES DE LA
METODOLOGÍA ESTADÍSTICA EN LA
INVESTIGACIÓN FORESTAL 79

Cecilia Cruz López y Virginia Rebolledo Camacho

. 7 .

METABOLITOS SECUNDARIOS: UN FASCINANTE
VIAJE A TRAVÉS DEL LENGUAJE QUÍMICO DE LAS
PLANTAS Y SUS APLICACIONES 89

Olivia Márquez-Fernández

AMBIENTES ANTROPIZADOS: LAS CIUDADES Y LA NATURALEZA

. 8 .

ZONAS METROPOLITANAS DE MÉXICO Y LA IMPORTANCIA DE SUS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS 101

*Beatriz Bolívar-Cimé, Fernando Zavaleta-Hernández
y Rafael Flores-Peredo*

. 9 .

ISLAS VERDES EN UN MAR DE CONCRETO: SU IMPORTANCIA EN LA CONSERVACIÓN, MANEJO E INVESTIGACIÓN DE FAUNA SILVESTRE 111

*Rafael Flores-Peredo, María Fernanda Salazar-Chamorro,
Isac Mella-Méndez y Beatriz Bolívar-Cimé*

. 10 .

BIOMONITOREO: INTERACCIÓN ENTRE PLANTAS Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA 123

Edison A. Díaz-Álvarez

EPÍLOGO

UNA BREVE REFLEXIÓN SOBRE NUESTRO LUGAR EN EL MUNDO 139

*Edison A. Díaz Álvarez, Susana Guillén Rodríguez
y Beatriz Bolívar-Cimé*

Glosario 143

Sobre los autores 147

INTRODUCCIÓN

El Instituto de Investigaciones Forestales (Inifor) de la Universidad Veracruzana (UV) inició su historia el 16 de octubre de 1985, cuando esta casa de estudios y la Universidad Autónoma de Chapingo crearon el Centro de Genética Forestal A. C. en Chapingo, Estado de México. En 1987 se creó en Xalapa, Veracruz, la subsede, que en 1991 pasó a formar parte de la UV. En 1999 se transformó en el Instituto de Genética Forestal, y diez años después adquirió su nombre actual. Las líneas de investigación que se desarrollan en el Inifor son muy variadas, incluyendo las de genética forestal, ecología forestal, ecología del paisaje, restauración ecológica, ecofisiología vegetal, propagación de especies forestales, manejo y conservación de recursos naturales, fitoquímica, biomonitoreo y ecología global. En el marco del Plan de Desarrollo del Inifor, con este libro queremos conmemorar los 35 años de historia de nuestro instituto y hacer un breve repaso a las investigaciones que algunos profesores llevamos a cabo en pro de la conservación y el desarrollo forestal del país, con un lenguaje cotidiano y sencillo dirigido a personas sin entrenamiento en el campo de las ciencias naturales, sin embargo, los especialistas son igualmente bienvenidos para compartir experiencias y colaboraciones. Hacemos una mención especial sobre la contribución “Parque Nacional Cofre de Perote: importancia, riesgos y amenazas”, que fue elaborado por una de las estudiantes del tercer semestre de nuestra Maestría en Ciencias en Ecología Forestal.

Nos parece importante comentar sobre los cambios ambientales que ha ocasionado la humanidad al planeta sin que un solo ecosistema

sea ajeno a ellos; un caso particular son los ecosistemas forestales, los cuales han proporcionado gran parte del sustento a nuestra llamada “civilización”. Los bosques albergan la mayor diversidad de especies del planeta; sin embargo, desde el comienzo mismo de la humanidad han estado bajo una creciente presión debido a sus valiosos recursos, que han sido extraídos sin parar con el fin de mantener nuestro estilo de vida. Los bosques nos brindan los llamados servicios ecosistémicos, también conocidos como ambientales, que en conjunto constituyen una red intrincada de bienes y servicios que los ecosistemas sanos proveen para el bienestar humano (Turner y Daily, 2008). Se dividen en tres grandes grupos: de provisión, de regulación y cultural. Entre los servicios más importantes podemos mencionar, para el primer grupo, el suministro de agua, de comida, de madera y de fibras; en el segundo encontramos la contribución a la regulación climática, de inundaciones y de enfermedades, mientras que el tercero proporciona educación, recreación, valor estético y espiritual (MEA, 2005; FAO, 2020).

Desde la última mitad del siglo XX, el acelerado crecimiento poblacional y sus hábitos de consumo han sido posibles gracias a la extracción desmedida de recursos naturales, lo que ha acelerado la transformación del planeta, de su estado natural a uno que no reconocería un viajero del tiempo de la era de las cavernas. Dicha transformación se denomina cambio global y está constituido por diferentes componentes, incluyendo el cambio de uso de suelo, el cambio climático, la contaminación en todos los niveles, el movimiento de especies exóticas, entre otros (Sala *et al.*, 2000). Pero no solo es un problema estético, sino que afecta también, de manera profunda, los flujos de materia y energía del planeta. Un ejemplo es el aumento de las temperaturas globales, que resulta en el aumento de las catástrofes relacionadas con la variación climática, como la hambruna, las inundaciones, las sequías, el aumento del nivel del mar, los huracanes y ciclones, entre otros muchos, incluyendo la liberación de patógenos causantes de pandemias (IPCC, 2014a, b; Mal *et al.*, 2018). Otro problema importante es que este proceso de cambio ha llevado a la desaparición de un gran número de especies, no solo de plantas, animales y hongos, sino también de microorganismos que en conjunto forman una red de interacciones muy complejas que propician ecosistemas saludables capaces de brindar los servicios que tanto necesitamos (Turner y Daily, 2008; Mooney *et al.*, 2009). El cambio global es particularmente agresivo con los bosques, tanto que se estima que desde 1990 se han perdido 420 millones de hectáreas de bosque, principalmente para su conversión en campos de cultivo y

ganadería a gran escala (FAO, 2020). Esta pérdida de bosques no ocurre con la misma intensidad en todo el mundo ya que, mientras que en las regiones templadas se ha incrementado la superficie forestal entre los años 2000 y 2010, en los trópicos se ha reducido drásticamente para abrir paso a las actividades productivas (FAO, 2016).

México no es ajeno al cambio global, por ello, en el marco de la legislación ambiental mexicana, se han expedido varias leyes que en conjunto tienen como finalidad la protección de los recursos naturales. En total son 12 leyes que cubren los diferentes rubros ambientales, como el agua, el aire, el suelo y los bosques, entre otros. En particular, la política nacional en temas forestales ha estado enfocada en fomentar la conservación de estos ecosistemas y sus recursos mientras se hace su aprovechamiento, para propiciar el desarrollo forestal sustentable del país, tal como está estipulado en la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable expedida en 2012 (DOF, 2020). Sin embargo, a pesar de este sólido marco regulatorio, el panorama de los bosques en México es preocupante, pues está ubicado entre los primeros diez países con mayor pérdida de bosque primario en el mundo. Entre 2001 y 2019 se han perdido al menos 3.99 millones de hectáreas de la cobertura de bosques en México, principalmente en los estados de Campeche, Chiapas, Quintana Roo, Yucatán y Veracruz (Global Forest Watch, 2020).

Los capítulos de este libro están agrupados en tres secciones en las cuales tratamos temas de gran importancia y sobre todo de actualidad en investigación ambiental. Primero, abordamos el estudio de los procesos ecológicos, en particular sobre aquellos que intervienen en la supervivencia de las plantas de los gradientes altitudinales de las montañas; se trata de un tema relevante para la investigación de los recursos forestales de México, particularmente en tiempos de cambio climático, cuando el aumento de las temperaturas globales será la causa de la extinción de muchas especies, incluyendo aquellas de alta montaña adaptadas a condiciones muy particulares, las cuales ya están en proceso de cambio (“Las altas montañas de México: los laboratorios naturales para evaluar el efecto del cambio climático en las plantas y ecosistemas” y “Variación morfológica adaptativa de plantas forestales en gradientes altitudinales”).

El cambio climático no es la única amenaza para la continuidad de las especies en las montañas, hay otros factores como el cambio de uso de suelo, la extracción y la caza de especies que también contribuyen a su desaparición. Una de las montañas más importantes de Veracruz es el Cofre de Perote, que alberga gran cantidad de especies de plantas

y animales de gran valor para los habitantes de su área de influencia, pero afectado por la intervención humana (“Parque Nacional Cofre de Perote: importancia, riesgos y amenazas”).

En la segunda sección comentamos diferentes técnicas para estudios forestales. Una alternativa para corregir las consecuencias de las modificaciones ambientales que producimos en los diferentes ecosistemas es la restauración ecológica, que consiste en el manejo de la vegetación mediante la elección correcta de especies arbóreas (“Árboles nativos para la restauración ecológica: ¿Qué sabemos? ¿Qué ignoramos?”). Una herramienta de gran utilidad que puede contribuir no solo a la restauración ecológica sino también a la conservación, con el mejoramiento genético forestal, es la propagación vegetativa, en particular el enraizado de estacas que permite obtener gran número de plántulas (“*Pinus jaliscana*: descubriendo el misterio de su propagación vegetativa”). Estos estudios se valen de herramientas estadísticas muy poderosas que permiten conocer con bastante exactitud si los resultados obtenidos se ajustan efectivamente a las hipótesis planteadas (“Algunas aplicaciones de la metodología estadística en la investigación forestal”). Además de contribuir con la conversión de energía lumínica en química durante la fotosíntesis, las plantas tienen una compleja red de comunicación química y utilizan su propio lenguaje con diferentes propósitos, que podemos aprovechar para nuestro propio beneficio (“Metabolitos secundarios: un fascinante viaje a través del lenguaje químico de las plantas y sus aplicaciones”).

Finalmente, en la tercera sección consideramos los ambientes antropizados, como las ciudades, que son una de las principales causas de la crisis ambiental por la gran concentración de población en el mundo. Los recursos requeridos para el funcionamiento de las ciudades ejercen gran presión sobre los recursos naturales a nivel local dentro del área de influencia del centro urbano; sin embargo, puede ser tan grande que afecte regiones a miles de kilómetros de distancia. Los procesos de cambio de uso de suelo en estos ambientes, como la urbanización, son significativos no solo en extensión sino también en el impacto que tienen sobre la biodiversidad de las regiones en donde se erigen. Tal es el caso de las zonas metropolitanas de México, en las cuales la urbanización ha producido la reducción de sus áreas naturales protegidas, que brindan servicios ambientales vitales para sus habitantes (“Zonas metropolitanas de México y la importancia de sus áreas naturales protegidas”), lo que ha resultado en que solo se pueden disfrutar pequeñas islas verdes en un mar de concreto, en donde se resguardan especies de fauna de

gran valor científico que aún estamos descubriendo (“Islas verdes en un mar de concreto: áreas verdes urbanas y su importancia para la conservación, manejo e investigación de fauna silvestre”). De igual manera, en estos ambientes enviamos una gran cantidad de desechos a la atmósfera como resultado de nuestras actividades cotidianas, que a su vez son causa importante de enfermedades y muerte en el mundo, por lo que es apremiante monitorear el estado de la calidad del aire (“Biomonitoreo: el caso de la interacción entre plantas y contaminación atmosférica”).

Esperamos que este libro no solo acerque al lector al quehacer científico de los profesores del Inifor en sus diferentes líneas de investigación, sino que también conozcan de primera mano la problemática ambiental por la que atraviesa nuestro mundo cambiante, así como las perspectivas de investigación para abordar este tema tan importante y urgente de atender en pro de nuestra continuidad y la de muchas especies que nos acompañan en este planeta.

Bibliografía

- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2020). Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Última reforma publicada el 13-04-2020. Consultado el 01/10/2020. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/lgdfs_130420.pdf
- Ecosystems and human well-being. Synthesis. (2005). *Millennium Ecosystem Assessment*. Washington: Island Press, p. 137.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2016). *The state of the world's forests. Forest and agriculture: land-use challenges and opportunities*. Roma. ISBN: 978-92-5-309208-6.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *The state of the world's forests. Forests, biodiversity and people*. Roma. ISSN: 1020-5705, pp 188.
- Global Forest Watch. (2020). Consultado el 01/10/2020. Disponible en www.globalforestwatch.org
- Mal, S. et al. (2018). Introducing linkages between climate change, extreme events, and disaster risk reduction. En Mal S. et al. (eds.) *Climate change, extreme events and disaster risk reduction. Sustainable development goals*. Cham: Springer.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington: Island Press, p. 137.
- Mooney, H. et al. (2009). *Biodiversity, climate change, and ecosystem services, Current opinion in environmental sustainability*. 1(1): 46-54.

- Sala, O. E. *et al.* (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100, *Science*. 287(5459): 1770-1774.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014a). *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Working Group II. Contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge and Nueva York: Cambridge University Press.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014b). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: regional aspects. Working Group ii. Contribution of to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge and Nueva York: Cambridge University Press.
- Turner, R. K., G. C. Daily (2008). The ecosystem services framework and natural capital conservation, *Environmental and Resource Economics*. 39(1): 25-35.

Edison Armando Díaz Álvarez
Susana Guillén Rodríguez
Beatriz Bolívar Cimé

PROCESOS
ECOLÓGICOS
Y CAMBIO AMBIENTAL
EN LAS ALTURAS

LAS ALTAS MONTAÑAS DE MÉXICO: LABORATORIOS NATURALES PARA EVALUAR EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PLANTAS Y EN LOS ECOSISTEMAS

Susana Guillén Rodríguez y Héctor Viveros-Viveros

CADENAS MONTAÑOSAS DE MÉXICO

México es un país geográficamente extenso y con una orografía accidentada, por lo que un gran número de sierras, cordilleras, montañas y volcanes cruza el territorio en diferentes direcciones formando extensas cadenas montañosas, que se dividen en la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur, el Eje Neovolcánico Transversal y las montañas de Chiapas y Guatemala (Ferrusquía-Villafranca, 1990). Las montañas de México son producto de una historia biogeográfica compleja asociada con eventos muy antiguos y reiterados

procesos de expansión y contracción que fueron creando un intrincado mosaico de ambientes y especies (Sarukhán *et al.*, 1996; Morrone y Márquez, 2001). Estos procesos han sido particularmente importantes en las regiones y montañas de mayor relieve del país, ubicadas en el Eje Neovolcánico Transversal, cuya localización geográfica, en el límite norte del trópico, ha contribuido a la evolución de ambientes únicos con alta diversidad biológica y alto contenido de especies endémicas, siendo el *hotspot* de muchos *taxa* (figura 1; Morrone y Márquez, 2001).

Las montañas de México constituyen importantes sitios de estudio que por su ubicación geográfica en la zona de transición entre las provincias biogeográficas Neártica y Neotropical albergan una enorme biodiversidad (Morrone y Márquez, 2001). Además, por su amplio gradiente altitudinal de 1 000 a más de 5 000 msnm, constituyen áreas con franjas climáticas muy bien delimitadas y separadas por distancias relativamente cortas (Challenger y Soberón, 2008).



FIGURA 1. Montañas Popocatepetl e Iztaccíhuatl observadas desde La Malinche, las tres circundadas por los asentamientos más extensos del país (Susana Guillén Rodríguez).

¿QUÉ ES UNA MONTAÑA?

Aunque actualmente no se ha llegado a un consenso acerca de lo que son las montañas, ni de su extensión en el mundo, Byers *et al.* (2013) las definen como un accidente geográfico alto y sobresaliente respecto al paisaje que lo circunda, y con gran parte de su superficie con pendientes pronunciadas. Körner y Ohsawa (2005) las definen como prominencias terrestres que van de los 1 000 msnm en el ecuador, reduciendo linealmente su altura hasta en 300 m hacia latitudes mayores en el norte y el sur. Bajo esta definición, las áreas de montaña estarían cubriendo 3.7% de la superficie terrestre, encontrándose en México algunas de las montañas más altas del mundo.

¿POR QUÉ LAS MONTAÑAS SON CONSIDERADAS COMO LABORATORIOS NATURALES?

Al ascender por una montaña es posible percibir que las condiciones ambientales cambian drásticamente entre distancias relativamente cortas (figura 2). De acuerdo con Körner (2007) las condiciones que se modifican con la altitud y que generan un gradiente ambiental son: 1) el área, que disminuye conforme la elevación es mayor, es por esto que las cimas de las montañas forman picos; 2) la temperatura, que disminuye con la



FIGURA 2. En las montañas las condiciones ambientales cambian drásticamente entre distancias cortas y se refleja en la vegetación (Susana Guillén Rodríguez).



FIGURA 3. Las montañas son consideradas “islas en el cielo”, delimitadas por las condiciones ambientales de las tierras bajas circundantes (Susana Guillén Rodríguez).

altitud y modifica la humedad ambiental; 3) la presión atmosférica, que disminuye con la elevación; y 4) la radiación ultravioleta (UV), que se incrementa con la altitud. La variación de estos factores y de otros que no están asociados con la altitud y que dependen de la orografía y de la ubicación geográfica de cada montaña, generan “pisos ecológicos” en los que es posible observar diferencias en la vegetación (Körner, 2007).

Por otro lado, las cimas de las altas montañas se consideran “islas del cielo” (*sensu* MacArthur y Wilson, 1963), delimitadas por las condiciones ambientales de las tierras más bajas que actúan como barreras para la dispersión de especies (figura 3), facilitando la divergencia de poblaciones, pudiéndose encontrar especies endémicas y poblaciones relictas; a las primeras solo se les puede encontrar distribuidas en una determinada zona geográfica, y las segundas están restringidas actualmente a un área (Hoorn *et al.*, 2018).

El gradiente altitudinal y el aislamiento de las cimas de las montañas ejemplifican “experimentos naturales” que permiten poner a prueba diferentes teorías ecológicas y plantearse preguntas relacionadas con la evolución adaptativa de las especies (Körner, 2007; véase el artículo “Variación morfológica adaptativa de plantas forestales en gradientes altitudinales”).

RESPUESTA DE LAS PLANTAS EN EL GRADIENTE AMBIENTAL

El gradiente altitudinal de las montañas ha sido el escenario idóneo para plantearse diferentes preguntas de investigación, en su mayoría relacionadas con los cambios adaptativos de las especies (Körner, 2007). Al respecto, se han encontrado patrones asociados a la altitud en los procesos de crecimiento, desarrollo, maduración, reproducción y supervivencia de los individuos, que son producto de la plasticidad fenotípica de las especies o de su adaptación local (Laiolo y Obeso, 2017). A través de la plasticidad fenotípica un individuo tiene la capacidad de modificar diferentes características de su desarrollo, en respuesta a las condiciones ambientales presentes en su hábitat. Las modificaciones pueden ocurrir en forma constante, por lo que son rápidas y reversibles. Un ejemplo de plasticidad fenotípica es la etiolación, que consiste en el alargamiento de los tallos que ocurre en respuesta a una prolongada exposición de las plantas a condiciones de baja intensidad luminosa; este proceso se revierte en cuanto las condiciones de luz aumentan. Se dice que algunas especies son más plásticas que otras; esto está relacionado con los límites de tolerancia ambiental o en los que cada especie puede sobrevivir. Por otro lado, la continua selección dirigida hacia individuos con características que los hacen ser más exitosos, en el sentido reproductivo, induce la diferenciación genética de subpoblaciones que estarán restringidas a un hábitat específico o a un ambiente particular, por lo que se dice que están adaptadas localmente. En las montañas esto se ejemplifica bien en poblaciones con diferencias genéticas y de desempeño fuertemente ligadas al gradiente altitudinal (Viveros-Viveros *et al.*, 2009; Saénz-Romero *et al.*, 2017a, b). Las respuestas plásticas se consideran menos eficientes que la adaptación para enfrentar condiciones extremas, aun así estas se han documentado para algunas especies (De Witt *et al.*, 1998; Saénz-Romero, 2017a).

De acuerdo con Körner (2007), las adaptaciones morfológicas, fisiológicas, y las tendencias evolutivas de los organismos que se distribuyen en las montañas deben ser estudiadas a la luz de dos factores que están asociados globalmente con la altitud: la temperatura y la disminución del área. A este tipo de estudios se puede integrar la variable de la historia geográfica particular de la montaña y el grado de aislamiento de la biota.

En las montañas la temperatura decrece a una tasa de 0.54 a 0.65 °C por cada 100 m de elevación (Körner, 2007). Esto tiene un peso importante en las respuestas de los organismos a lo largo del gradiente

altitudinal porque conforme la temperatura disminuye las reacciones químicas y físicas ocurren a una menor velocidad y con ello disminuye la actividad metabólica, teniendo efectos en procesos como la fenología, el crecimiento y los patrones reproductivos (Laiolo y Obeso, 2017). También la presión atmosférica, el contenido de humedad en el aire y las presiones parciales de gases biológicamente relevantes, como el oxígeno y el bióxido de carbono, decrecen al aumentar la elevación, y aunque esto parece no afectar la fotosíntesis, se han observado modificaciones morfológicas y fisiológicas en respuesta al decremento de estos gases, *i.e.* algunas especies alpinas tienen un incremento en el número de estomas (Körner, 2007).

De acuerdo con Laiolo y Obeso (2017), las tendencias en la historia de vida de los organismos que habitan a mayores altitudes son: ciclo de vida lento y largo, maduración retrasada, baja asignación de recursos para la reproducción y baja tasa reproductiva.

Entre las poblaciones de una misma especie distribuidas en un gradiente altitudinal se podrán observar variaciones morfológicas y fisiológicas; al respecto la hipótesis del centro-periferia propone que las condiciones para la regeneración son menos propicias en los extremos que en el centro del área de distribución, y que al mismo tiempo los ciclos de vida en las mayores elevaciones serán más lentos (Hengeveld y Haeck, 1982).

ECOSISTEMAS DE ALTA MONTAÑA Y SU VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Las montañas tienen una gran importancia ecológica, económica y social, al poseer un tercio de la biodiversidad del planeta (Chakraborty, 2019). Son vitales para la existencia de muchas personas al proveer de servicios ecosistémicos, destacando el agua, por lo que se les ha denominado “torres de agua”. A pesar de su importancia en la era del Antropoceno (véase Davies, 2016) son sistemas altamente vulnerables caracterizados por regímenes de disturbio intenso y amenazados por impactos antropogénicos directos, como el cambio de uso de suelo, la alteración de los afluentes pluviales y la destrucción del hábitat de un gran número de especies; e indirectos, como el cambio climático (Chakraborty, 2019).

Desde la época preindustrial la temperatura global ha aumentado en promedio entre 0.8 y 1.5 °C. De mantenerse esta tasa de cambio la temperatura y los días de calor extremo a corto plazo seguirán aumentando, además habrá un déficit de precipitación que podría generar

largos periodos de sequía (IPCC, 2018). Para México, las proyecciones históricas y futuras de cambio climático, generadas específicamente para el Eje Neovolcánico Transversal, muestran un aumento en la temperatura y un decremento en la precipitación desde mediados del siglo XX (Cuervo-Robayo *et al.*, 2020; Sáenz-Romero *et al.*, 2010).

Cada día hay más evidencia de que, de manera más rápida e intensa, en las altas montañas se están presentando los efectos del cambio climático en comparación con regiones de menor elevación, y se espera que sean más severos en los próximos años (Pepin *et al.*, 2015). De ser así se estaría incrementando la probabilidad de que los ecosistemas de alta montaña sufran cambios en composición de especies y en el tamaño de sus poblaciones por desacoplamiento a sus hábitats climáticos (Pepin *et al.*, 2015). Ante esto, las posibles respuestas de las especies son la migración altitudinal, la adaptación y la extinción o extirpación (Aitken, 2008), aunque esto dependerá de la sensibilidad de las especies y sus poblaciones (Saénz-Romero *et al.*, 2019). De acuerdo con Körner (2012), los efectos del calentamiento podrían ser más claros y perceptibles en los límites de la distribución de las especies donde las condiciones ambientales se tornan extremas. Las poblaciones del límite inferior serán las que producirán las semillas que habitarán las mayores altitudes (Kueppers *et al.*, 2017).

PERSPECTIVAS

Ante los pronósticos de calentamiento es fundamental evaluar la sensibilidad que tienen diferentes especies y sus poblaciones ubicadas en el gradiente altitudinal ante las condiciones de estrés que generará el aumento de la temperatura; la información generada ayudará a crear programas efectivos de conservación que podrían mitigar la problemática socioambiental generada por el cambio climático.

En México los bosques de montaña albergan una enorme biodiversidad. Tan solo 50% de las especies descritas de *Pinus* y 30% de *Quercus* se encuentran en nuestro país (Farjon y Styles, 1997; Valencia, 2004). Son uno de los principales reservorios de carbono, fuente de recursos maderables y no maderables, además proveen de servicios ecosistémicos tanto a las poblaciones aledañas como a las ciudades capitales (Torres-Rojo *et al.*, 2016). Varias especies arbóreas coocurren frecuentemente, por lo que están adaptadas a condiciones ambientales similares. Sin embargo, al pertenecer a clados distintos cada una ha estado sujeta a historias biogeográficas y demográficas distintas, por lo que es

posible que respondan de forma diferente ante presiones selectivas como el cambio climático.

Ante este escenario, las preguntas a responder son: ¿Cuál es el estado de conservación de las poblaciones a lo largo de los gradientes altitudinales y cómo es la variación a nivel local y regional? ¿Cuáles son las implicaciones de las diferencias poblacionales ante los cambios en el clima proyectados? Para responder estas preguntas es necesario generar información ecológica básica y aplicada. La metodología que imita condiciones de cambio climático y ayuda a responder estas preguntas consiste en experimentos de “jardín común” en campo y bajo condiciones controladas y semicontroladas. En México son diversos los estudios realizados en coníferas bajo el contexto del cambio climático (Viveros-Viveros *et al.*, 2009; Castellanos-Acuña *et al.*, 2013; López-Toledo, 2017; Ortiz-Bibián *et al.*, 2017; Sáenz-Romero 2017b; Gómez-Pineda *et al.*, 2020); en ellos se evalúa la diferenciación morfológica y genética de las poblaciones ubicadas en el gradiente altitudinal; en algunos casos se ha discutido la susceptibilidad ante el cambio climático. Sin embargo, aún hay vacíos respecto de las primeras etapas del ciclo de vida de las plantas, particularmente de la germinación y el establecimiento, además de los procesos implicados en la producción de semillas, como la fenología y los caracteres asociados a la reproducción.

En el Inifor evaluamos la susceptibilidad de las poblaciones consideradas prioritarias para la conservación por su alta vulnerabilidad. A través de experimentos de jardín común se simulan condiciones de estrés térmico e hídrico bajo condiciones controladas y semicontroladas (Montero-Nava, 2020; George-Miranda, 2019; Franquiz-Domínguez, 2019). También consideramos de vital importancia realizar estudios desde la perspectiva de la ecofisiología, con la finalidad de poder identificar especies prioritarias para su conservación y diseñar estrategias de manejo efectivas.

Bibliografía

- Aitken, S. N. *et al.* (2008). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations, *Evolutionary applications*. 1(1): 95-111.
- Byers, A. C. *et al.* (2013). An introduction to mountains. En M. F. Price *et al.* (eds.), *Mountain geography: physical and human dimensions*. Berkeley: University of California Press, pp. 1-10.
- Castellanos-Acuña, D. *et al.* (2013). Variación altitudinal entre especies y procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*. Ensayo de

- vivero, *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 19(3): 399-411.
- Chakraborty, A. (2019). Mountains as vulnerable places: a global synthesis of changing mountain systems in the Anthropocene, *GeoJournal*. 1-20.
- Challenger, A., J. Soberón. (2008). *Los ecosistemas terrestres, Capital natural de México. Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. [The terrestrial ecosystems, in Natural Capital of Mexico Current knowledge of biodiversity]. México: Conabio. I: 87-108.
- Cuervo-Robayo, A. P. *et al.* (2020). One hundred years of climate change in Mexico, *Plos one*. 15(7): 1-19.
- Davies, J. (2016). *The birth of the Anthropocene*. Berkeley: University of California Press.
- DeWitt, T. J. *et al.* (1998). Costs and limits of phenotypic plasticity, *Trends in ecology & evolution*. 13(2): 77-81.
- Farjon A., B. T. Styles (1997). *Pinus* (Pinaceae), *Flora Neotropica*. 75: 1-291.
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1990). Regionalización biogeográfica. Mapa IV.8.10, *Atlas nacional de México*. Vol. 3, México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Franquíz-Domínguez, F. (2019). Factores asociados a la fenología de *Pinus hartwegii*. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas, Tlaxcala: Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- George-Miranda, S. (2019). Germinación de semillas de *Pinus hartwegii* diferentes altitudes del Parque Nacional La Malinche. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas, Tlaxcala: Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- Gómez-Pineda, E. *et al.* (2020). Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios, *Ecological Applications*. 30(2): e02041, Washington.
- Hengeveld, R., J. Haeck. (1982). The distribution of abundance. I. Measurements, *Journal of Biogeography*. 9(4): 303-316.
- Hoorn, C. A. *et al.* (eds.). (2018). *Mountains, climate and biodiversity*. John Wiley & Sons. Consultado el 22/11/2020. Disponible en: <https://redibec.org/ojs/index.php/revibec/article/download/138/42> <https://revistes.ub.edu/index.php/ScriptaNova/article/view/1221>.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). Global Warming of 1.5 °C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Suiza.
- Körner, C. (2007). The use of 'altitude' in ecological research, *Trends in ecology & evolution*. 22(11): 569-574.

- Körner, C. (2012). *Alpine tree lines: functional ecology of the global high elevation tree limits*, Springer Science & Business Media. 220 p.
- Körner, C., M. Ohsawa. (2005). "Mountain systems". En R. Hassan *et al.* (eds.). *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*. Washington, 1: 681-716.
- Kueppers, L. M. *et al.* (2017). Warming and provenance limit tree recruitment across and beyond the elevation range of subalpine forest, *Global Change Biology*. 23(6): 2383-2395.
- Laiolo, P., J. R. Obeso. (2017). Life-history responses to the altitudinal gradient. En J. Catalan *et al.* (eds). *High mountain conservation in a changing world*. Cham, Suiza: Springer, pp. 253-283.
- Lopez-Toledo, L. *et al.* (2017). Reproductive investment of *Pinus pseudostrubus* along an altitudinal gradient in Western Mexico: implications of climate change, *New Forests*. 48(6): 867-881.
- MacArthur, R. H., E. O. Wilson. (1963). An equilibrium theory of insular zoogeography, *Evolution*. 17(4): 373-387.
- Montero-Nava, R. (2020). Diferenciación entre poblaciones a lo largo de un gradiente altitudinal de indicadores reproductivos de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional La Malinche. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas, Tlaxcala: Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- Morrone J. J., J. Márquez. (2001). Halffter's Mexican Transition Zone, beetle generalized tracks, and geographical homology, *Journal of biogeography*. 28(5): 635-650.
- Ortiz-Bibian, M. A. *et al.* (2017). Genetic variation in *Abies religiosa* for quantitative traits and delineation of elevational and climatic zoning for maintaining monarch butterfly overwintering sites in Mexico, considering climatic change, *Silvae Genetica*. 66(1): 14-23.
- Pepin, N. *et al.* (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world, *Nature climate change*. 5(5): 424-430.
- Sáenz-Romero, C. *et al.* (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation, *Climatic change*. 102(3-4): 595-623.
- Sáenz-Romero, C. *et al.* (2017a). Adaptive and plastic responses of *Quercus petraea* populations to climate across Europe, *Global Change Biology*. 23(7): 2831-2847.
- Sáenz-Romero, C. *et al.* (2017b). Mexican conifers differ in their capacity to face climate change, *Journal of Plant Hydraulics*. 4: e003.
- Sáenz-Romero, C. *et al.* (2019). Common garden comparisons confirm inherited differences in sensitivity to climate change between forest tree species, *PeerJ*. 7: e6213.

- Sarukhán, J. *et al.* (1996). Biological conservation in a high beta diversity country. En E. Castri, T. Younes (eds.), *Biodiversity, science and development: toward a new partnership*. París: CAB International-IUBS, pp. 246-263.
- Torres-Rojo, J. M. *et al.* (2016) Sustainable forest management in Mexico, *Current Forestry Reports*. 2(2): 93-105.
- Valencia, S. (2004). Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México, *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 75: 33-53.
- Viveros-Viveros, H. *et al.* (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings, *Forest Ecology and Management*. 257: 836-842.

VARIACIÓN MORFOLÓGICA ADAPTATIVA DE PLANTAS FORESTALES EN GRADIENTES ALTITUDINALES

Héctor Viveros-Viveros y Susana Guillén Rodríguez

¿QUÉ ES LA VARIACIÓN ADAPTATIVA?

A través del tiempo las especies de plantas forestales y las poblaciones que conforman van sufriendo cambios evolutivos sucesivos que les permiten adaptarse a condiciones ambientales diversas por medio de adecuaciones en su estructura genética (Rehfeldt, 1988). Por definición, las poblaciones con distribución restringida presentan adaptación local cuando tienen mayor eficiencia reproductiva y mejor desempeño fisiológico en su sitio de origen que en otros sitios (Savolainen *et al.*, 2007). Sin embargo, las especies cuyas poblaciones se encuentran ampliamente distribuidas y en ambientes diversos, generalmente muestran variación o variaciones en algunas características que les permiten prosperar en los ambientes en donde se localizan. Esta variación puede estar determinada genéticamente y es el resultado del efecto de la selección natural direccional impuesta por las diferentes condiciones ambientales en su área de distribución. A este tipo de variación se le conoce como variación adaptativa (Savolainen *et al.*, 2007; Sgró *et al.*, 2011; Sáenz-Romero *et al.*, 2016).

¿QUÉ CARACTERÍSTICAS DE LAS PLANTAS FORESTALES PUEDEN ESTAR RELACIONADAS CON LA ADAPTACIÓN?

Entre las características de las plantas forestales que pueden estar asociadas con la adaptación al medio ambiente donde se desarrollan destacan las tasas de crecimiento, la resistencia al daño por heladas o al estrés por sequía, además de la producción de semillas, su viabilidad, su capacidad de dispersión en distancia y tiempo y la tasa de germinación, así como la fenología (Ortiz-Bibian *et al.*, 2019; Sáenz-Romero *et al.*, 2016); también, la tasa de elongación de la yema terminal y la supervivencia y el número de cotiledones que producen (Rehfeldt, 1988; Sáenz-Romero *et al.*, 2004).

Las características fisiológicas y morfológicas de las plantas, como la respiración, el contenido de clorofila y carotenos, la tasa de asimilación fotosintética, la densidad y conductancia estomática, el contenido de nitrógeno foliar, la resistencia a la cavitación y el grosor de la hoja y biomasa asignada a las raíces, juegan en su conjunto un papel fundamental en la adaptación (caja 1, Bresson *et al.*, 2011; Sáenz-Romero *et al.*, 2013).

Caja 1. La adaptación y la selección natural direccional

La adaptación es un proceso que permite a los organismos incrementar sus posibilidades de dejar descendencia, lo cual ocurre debido a los cambios en las características físicas y genéticas en sus poblaciones a través de generaciones; estos cambios han sido moldeados por la selección natural. Hay diferentes tipos de selección natural dependiendo de cómo esté actuando. Una de ellos es la selección natural direccional en la que se favorece a los organismos que presentan una forma particular de un gen, lo que hace que con el tiempo existan en la población mayor número de individuos con esa forma de gen.

¿CÓMO SE PUEDE ESTUDIAR LA VARIACIÓN ADAPTATIVA EN PLANTAS?

Antes de conocer la forma más común de evaluar la variación adaptativa en plantas, es importante saber que a la variación de las características de las plantas observada directamente en las poblaciones en campo

se le llama variación fenotípica, y es el reflejo del efecto del ambiente donde se desarrollan (variación ambiental), de la constitución genética que tenga cada planta (variación genética) y además de la interacción entre estas dos (White *et al.*, 2007).

Con este antecedente se debe indicar que la forma clásica de evaluar la variación adaptativa es a través del establecimiento de ensayos de procedencias en vivero, en jardín común, ya sea con ensayos de corta duración, de dos a cuatro años, o en campo, con mayor duración (Schmidting, 1994). Los ensayos de procedencias consisten en evaluar la variación de características con valor adaptativo de individuos que provienen de distintos lugares (procedencias), es decir, diferentes genotipos colocados en un mismo ambiente, o sea, a una misma temperatura, a una misma cantidad de luz y humedad, etc., todo bajo un diseño experimental (Dorman *et al.*, 2009). La variación adaptativa que se observa en los ensayos de procedencias es reflejo únicamente de la constitución genética de los individuos que conforman la población (procedencia); en otras palabras, es el reflejo únicamente de la variación genética, ya que cuando las procedencias se ubican en un mismo ambiente se elimina la variación ambiental, incluyendo la interacción entre el genotipo y el ambiente (caja 2, White *et al.*, 2007).

Caja 2. Diseños experimentales

Cuando vas a establecer un experimento es necesario que definas qué diseño va a tener, es decir, hay que tener bien claro: ¿qué quieres conocer?, ¿qué vas a medir para conocerlo?, ¿cuántas mediciones harás?, ¿en cuántos individuos o plantas?, ¿en dónde lo vas a ubicar?, ¿cómo lo vas a colocar?, etc. Lo anterior para que puedas analizar correctamente tus resultados y que tus conclusiones sean válidas. Entre los principales diseños experimentales comúnmente utilizados destacan: completamente aleatorios, en bloques completos e incompletos, factoriales, en parcelas divididas, etcétera.

IMPORTANCIA DE LA VARIACIÓN ADAPTATIVA

Pero quizá te preguntes: ¿Qué importancia tiene la variación adaptativa de las especies de plantas forestales? Es importante porque sirve para poder definir y programar las actividades que se realizan, con

el propósito de aprovechar los recursos forestales de un bosque sin afectar su productividad.

Por ejemplo, la variación adaptativa es útil en la toma de decisiones en cuanto a la selección de especies o de procedencias a utilizar en los programas de reforestación o de restauración para incluir material genético local o foráneo. Este conocimiento permite sugerir cambios en los sistemas silvícolas, por ejemplo, definiendo los métodos que favorezcan la regeneración incluyendo la selección de los árboles a dejar en el bosque para incrementar la resiliencia del mismo (Flores *et al.*, 2018).

La variación adaptativa de plantas forestales también es importante para delimitar zonas productoras de semillas y para la elaboración de guías para su transferencia, con las cuales, en caso de pretender hacer movimiento de germoplasma, se asegura el acoplamiento de los genotipos (plantas) a las condiciones ecológicas de los sitios a plantar. Además, se debe considerar en la planeación del establecimiento de programas de conservación *in situ* o *ex situ* de las especies de plantas forestales (caja 3, Sáenz-Romero *et al.*, 2004).

Caja 3. Árboles padres o semilleros

Cuando se van a cortar árboles de un bosque para obtener madera se tiene la obligación de no acabar con ellos; para lograrlo, los encargados del manejo del bosque (silvicultores) deben crear o mantener las condiciones que faciliten el nacimiento de árboles nuevos (regeneración) para sustituir a los que son cortados y esto lo hacen principalmente a través de cortas de regeneración; entre ellas hay una muy utilizada que se llama árboles padres o semilleros y consiste en seleccionar algunos de los mejores árboles para dejarlos en el lugar con el propósito de repoblar el área a partir de su semilla, mientras que los demás árboles se cortan para obtener de ellos madera.

PATRONES DE VARIACIÓN ADAPTATIVA EN AMBIENTES DE MONTAÑA

Los ambientes presentes en diferentes pisos altitudinales de las montañas se caracterizan por presentar condiciones físicas heterogéneas (figura 1, Premoli *et al.*, 2011). Por ejemplo, a lo largo de los gradientes altitudinales

de las montañas ocurren fuertes cambios de temperatura en distancias cortas (Savolainen *et al.*, 2007), se presentan diferentes intensidades de los vientos, y en los sitios altos hay presencia de nieve (Vitasse *et al.*, 2013), factores que imponen diferentes presiones de selección sobre las especies presentes en dichas montañas (Premoli *et al.*, 2011).

En términos generales, las partes bajas de las montañas se asocian con altas temperaturas y estrés hídrico, en contraste con las partes altas donde pueden presentarse heladas con mayor frecuencia e intensidad (Rehfeldt, 1988; Sáenz-Romero *et al.*, 2006). Por lo mismo, en lo alto de las montañas las plantas tienden a diferir en características morfológicas y fisiológicas respecto de las plantas que crecen en poblaciones ubicadas en altitudes intermedias o bajas (Vitasse *et al.*, 2013). Por ejemplo, las plantas de las poblaciones de altitudes bajas, a diferencia de las de altitudes mayores, presentan hojas más largas y gruesas, menor contenido de nutrientes foliares y mayor crecimiento, que se prolonga por más tiempo en el año y son más susceptibles al daño por heladas (figura 2, imagen A; Rehfeldt, 1988; Bresson *et al.*, 2011). Se piensa que estas diferencias fisiológicas y morfológicas se atribuyen a una mayor eficiencia fotosintética en los individuos de



FIGURA 1. Las plantas forestales distribuidas a lo largo de gradientes altitudinales en las montañas pueden presentar variación adaptativa (Foto: Susana Guillén Rodríguez).

mayor elevación, como adaptación a las temperaturas bajas y mayor resistencia a las heladas (Weih y Karlsson, 1999). Este patrón (forma o manera) de variación adaptativa es común en los individuos que conforman poblaciones, pero también se presenta al comparar diferentes especies que crecen en distintos pisos altitudinales en las montañas (Viveros-Viveros *et al.*, 2007).

Otro patrón indica que los individuos de las poblaciones marginales (las de los extremos superiores e inferiores) son los más afectados en términos de producción de semillas y tasas de germinación y crecimiento, como resultado de la exposición periódica a eventos climáticos extremos como las sequías en los límites altitudinales inferiores y heladas en el límite altitudinal superior, comparado con los individuos de altitudes intermedias (figura 2, imagen B; Sáenz-Romero *et al.*, 2006). Por otra parte, un último patrón indica que las plántulas derivadas de las plantas de poblaciones ubicadas en los límites de distribución (altitud superior e inferior) muestran mayor supervivencia que las de las poblaciones intermedias; lo anterior es posible que se deba a una alta interacción entre las procedencias y el ambiente donde se probaron (interacción Genotipo \times Ambiente) (figura 2, imagen C; Cruzado-Vargas *et al.*, 2020).

ESTUDIOS DE VARIACIÓN ADAPTATIVA EN ESPECIES FORESTALES CON DISTRIBUCIÓN EN MÉXICO

De los patrones antes descritos, ¿cuáles se han observado en especies mexicanas? Al respecto cabe mencionar que desde inicios de siglo en el país se ha estudiado la variación adaptativa de varias especies forestales (cuadro 1). En el estado de Michoacán es donde se ha realizado la mayoría de los estudios (87.5%) debido a que es el área de acción principal del doctor Cuauhtémoc Sáenz Romero y su equipo de trabajo, quienes laboran en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia. Él es pionero en el establecimiento de este tipo de trabajos en México. Solamente dos de ellos, en *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., han sido desarrollados por el mismo equipo de trabajo en el estado de Oaxaca (Ruiz-Talonia *et al.*, 2014; Sáenz-Romero *et al.*, 2011).

En el país, 87.5% de los estudios sobre variación adaptativa en plantas forestales se ha realizado en coníferas, y solamente uno con una herbácea *Lupinus elegans* Kunth. Entre las coníferas, la mayoría de los estudios se ha realizado en especies de pinos (85.7%), y solo uno en

oyamel *Abies religiosa* (Kunt) Schltdl. & Cham. Todas las especies son de clima templado frío.

En la mayoría de los trabajos (57.1%) se ha encontrado un patrón de variación adaptativa en el que se muestra una asociación negativa entre la altitud de los sitios de donde provienen las plantas y la característica adaptativa, es decir, conforme aumenta la altitud de origen las características disminuyen en magnitud (figura 2, imagen A),

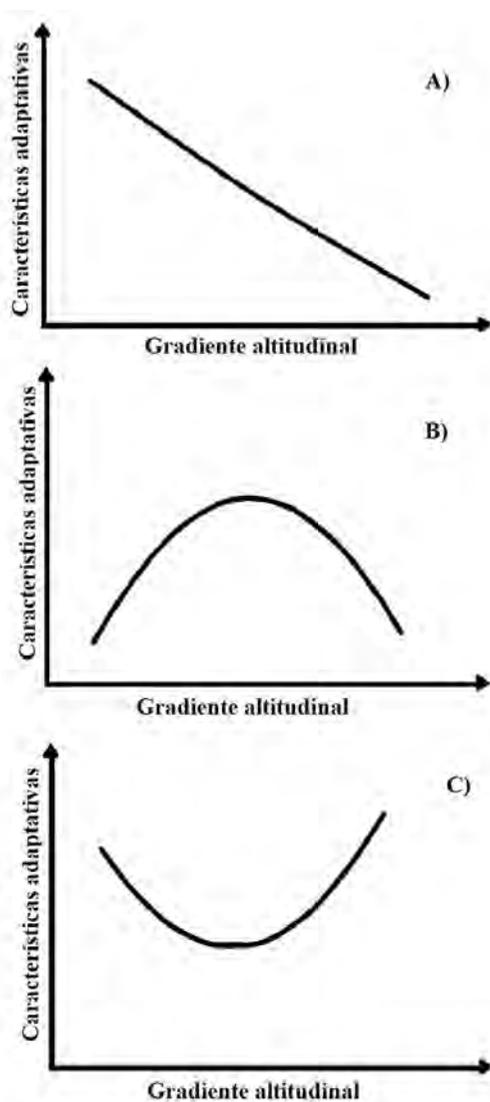


FIGURA 2. Patrones de variación adaptativa de las plantas forestales en gradientes altitudinales que indican cómo varía o cambia una característica con la altitud: A) mayor magnitud de la característica en menores altitudes, B) mayor magnitud de la característica en altitudes intermedias, y C) mayor magnitud de la característica en las altitudes extremas (inferior y superior).

mientras que 35.7% de los trabajos muestra un patrón de variación en el que las plantas de las poblaciones intermedias muestran un valor mayor de las características adaptativas que las de las poblaciones de los extremos inferior y superior (figura 2, imagen B); y solamente un trabajo reportó que las plantas de las poblaciones de los extremos altitudinales de las montañas mostraron valores mayores en las características adaptativas que las de las poblaciones intermedias (figura 2, imagen C).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El patrón de asociación entre las características adaptativas y la altitud varía con la especie estudiada, incluso en una misma especie puede variar dependiendo de la característica, lo que indica que la presión de selección impuesta por los ambientes locales actúa a diferentes escalas sobre las poblaciones forestales.

CUADRO 1. Patrones de variación altitudinal en características adaptativas de plantas forestales con distribución en México.

<i>Especie</i>	<i>Número de sitios</i>	<i>Rango altitudinal (msnm)</i>	<i>Característica adaptativa</i>	<i>Patrón de variación</i>	<i>Referencias</i>
<i>Abies religiosa</i>	15	2850-3540	Viabilidad y germinación de semillas.	B < I > A	Ortiz-Bibian <i>et al.</i> (2019)
			Elongación a los 19 meses de edad, daños por bajas temperaturas a los 26 meses de edad, componente formado por elongación total, cesación del crecimiento, peso seco del follaje a los 18 meses de edad y daños por bajas temperaturas.	B > I > A	Ortiz-Bibian <i>et al.</i> (2017)
			Supervivencia a los 18 meses de edad.	B > I < A	Cruzado-Vargas <i>et al.</i> (2019)

<i>Especie</i>	<i>Número de sitios</i>	<i>Rango altitudinal (msnm)</i>	<i>Característica adaptativa</i>	<i>Patrón de variación</i>	<i>Referencias</i>
<i>Lupinus elegans</i>	12	2312-2885	Altura de la planta y biomasa aérea a los 10 meses de edad	B > I > A	Soto-Correa <i>et al.</i> (2012)
<i>Pinus devoniana</i> Lindl. (= <i>P. michoacana</i> Martínez)	18	1600-2450	Daños por bajas temperaturas 30 meses de edad.	B > I > A	Sáenz-Romero & Tapia-Olivares (2008)
	Cinco	1650-2310	Altura de plántula a tres y cinco meses de edad.	B > I > A	Castellanos-Acuña <i>et al.</i> (2013)
<i>P. hartwegii</i> Lindl.	13	3000-3600	Altura de plántula a los siete y 18 meses de edad, plantas que rompieron el estado cespitoso (%), plantas que presentaron un estado avanzado de desarrollo del brote terminal (%), daños por bajas temperaturas	B > I > A	Viveros-Viveros <i>et al.</i> (2009)
	Siete	3150-3650	Punto de inflexión de la curva de vulnerabilidad ante la pérdida de conductancia hidráulica y conductividad hidráulica específica del xilema.	B > I > A	Sáenz-Romero <i>et al.</i> (2013)
	13	3150-3750	Componente formado por altura total de plántula, diámetro basal, tasa de elongación y peso seco para hojas, ramas y tallo.	B > I > A	Loya-Rebollar <i>et al.</i> (2013)

<i>Especie</i>	<i>Número de sitios</i>	<i>Rango altitudinal (msnm)</i>	<i>Característica adaptativa</i>	<i>Patrón de variación</i>	<i>Referencias</i>
<i>P. leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	Cuatro	2110-2422	Altura de plántula a tres meses de edad.	B < I > A	Castellanos-Acuña <i>et al.</i> (2013)
<i>P. oocarpa</i> Schiede ex Schltdl.	Cinco	1075-1505	Número de cotiledones. Altura de plántula a los 30 meses de edad.	B < I > A, excepto población de mayor altitud B < I > A	Sáenz-Romero <i>et al.</i> (2004) Sáenz-Romero <i>et al.</i> (2006)
<i>P. patula</i>	13	2400-3000	Altura de plántula a los 6 meses de edad. Altura de plántula a los 36 meses de edad.	B < I > A B < I > A	Sáenz-Romero <i>et al.</i> (2011) Ruiz-Talonia <i>et al.</i> (2014)
<i>P. pseudostrabus</i> Lindl.	Ocho	2200-2900	Días para finalizar el crecimiento. Peso seco total de plántula.	B < I > A B > I > A	Sáenz-Romero <i>et al.</i> (2012)

NOTA: donde: B = Población de altitud baja, I = Población de altitud intermedia y A = Población de altitud elevada.

Por otra parte, de la gran riqueza de especies con que cuenta el país se han estudiado muy pocas, por lo que es importante ir abordando el estudio de más de ellas con importancia económica o ecológica. Además, hace falta investigar si los patrones encontrados en las especies estudiadas se conservan en otras montañas o si actúa la adaptación local modificando estos patrones, y comenzar a estudiar la variación adaptativa de especies de otros climas.

Por último, el personal del Inifor-UV ha participado en los estudios de variación adaptativa de tres especies de pino: *P. hartwegii*, *P. oocarpa* y *P. pseudostrabus*. En la actualidad seguimos estudiando algunas de estas especies, pero en diferentes montañas hemos incorporado en nuestros estudios algunas otras, tanto de clima templado como tropical (cuadro 1).

Bibliografía

- Bresson, C. C. *et al.* (2011). To what extent is altitudinal variation of functional traits driven by genetic adaptation in European oak and beech?, *Tree Physiology*. 31(11): 1164-1174.
- Castellanos-Acuña, D. *et al.* (2014). Zonificación altitudinal provisional de *Abies religiosa* en un área cercana a la reserva de la biósfera de la Mariposa Monarca, Michoacán, *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 20(2): 215-225.
- Cruzado-Vargas, A. L. *et al.* (2020). Crecimiento de plántulas de regeneración natural de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en vivero y variación genética entre procedencias, *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 26(1): 85-9.
- Dorman, M. *et al.* (2009). Local adaptation in four *Iris* species tested in a common garden experiment, *Biological Journal of the Linnean Society*. 98(2): 67-277.
- Flores, A. *et al.* (2018). Intraspecific variation in pines from the Trans-Mexican Volcanic Belt grown under two watering regimes: Implications for management of genetic resources, *Forest*. 9(2): 71, 1-16.
- Hamrick, J. L. (2004). Response of forest trees to global environmental changes, *Forest Ecology and Management*. 197(1-3): 323-335.
- Loya-Rebollar, E. *et al.* (2013). Clinal variation in *Pinus hartwegii* populations and its application for adaptation to climate change, *Silvae Genetica*. 62(3): 86-95.
- Ortiz-Bibian, M. A. *et al.* (2017). Genetic variation in *Abies religiosa* for quantitative traits and delineation of elevational and climatic zoning for maintaining monarch butterfly overwintering sites in Mexico, considering climatic change, *Silvae Genetica*. 66(1): 14-23.
- Ortiz-Bibian, M. A. *et al.* (2019). Variación entre poblaciones de *Abies religiosa* (h.b.k.) Schl. et Cham a lo largo de un gradiente altitudinal. I. Capacidad germinativa de la semilla, *Revista Fitotecnia Mexicana*. 42(3): 301-308.
- Premoli, A. C. *et al.* (2011). Tendiendo puentes entre la ecología evolutiva y la conservación del mundo vertical, *Journal of Basic & Applied Genetics*. 22(1): 1-8.
- Rehfeldt, G. E. (1988). Ecological genetics of *Pinus contorta* from the Rocky Mountains (USA): A synthesis, *Silvae Genetica*. 37(3-4): 131-135.
- Ruiz-Talonia, L. F. *et al.* (2014). Altitudinal genetic variation among native *Pinus patula* provenances: performance in two locations, seed zone delineation and adaptation to climate change, *Silvae Genetica*. 63(4): 139-149.

- Sáenz-Romero, C. *et al.* (2004). Altitudinal genetic variation among *P. oocarpa* populations on Michoacán, western Mexico. Preliminary results from a nursery test, *Forest Genetics*. 11(3-4): 343-349.
- Sáenz-Romero, C. *et al.* (2006). Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, Mexico: implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warming, *Forest Ecology and Management*. 229(1-3): 340-350.
- Sáenz-Romero, C. *et al.* (2011). Genetic variation among *Pinus patula* populations along an altitudinal gradient. Two environment nursery tests. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34(1): 19-25.
- Sáenz-Romero, C. *et al.* (2012). Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrobus* populations from Michoacán, México. Two location shadehouse test results, *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35(2): 111-120.
- Sáenz-Romero, C. *et al.* (2013). Genetic variation of drought-induced cavitation resistance among *Pinus hartwegii* populations from an altitudinal gradient, *Acta Physiologiae Plantarum*. 35(10): 2905-2913.
- Sáenz-Romero, C. *et al.* (2016). Migración asistida de las poblaciones forestales para la adaptación de árboles ante el cambio climático, *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 22(3): 303-323.
- Sáenz-Romero, C., B. L. Tapia-Olivares. (2008). Genetic variation in frost damage and seed zone delineation within an altitudinal transect of *Pinus devoniana* (*P. michoacana*) in Mexico, *Silvae Genetica*. 57(3): 165-170.
- Savolainen, O. *et al.* (2007). Gene flow and local adaptation in trees, *Annual Reviews*. 38: 595-619.
- Schmidting, R. C. (1994). Use of provenance tests to predict response to climate change: loblolly pine and Norway spruce, *Tree Physiology*. 14(7-9): 805-817.
- Sgró, C. M. *et al.* (2011). Building evolutionary resilience for conserving biodiversity under climate change, *Evolutionary Applications*. 4(2): 326-337.
- Soto-Correa, J. C. *et al.* (2012). Variación genética entre procedencias de *Lupinus elegans* Kunth, zonificación altitudinal y migración asistida, *Agrociencia*. 46(6): 593-608.
- Vitasse, Y. *et al.* (2013). Genetic vs. non-genetic responses of leaf morphology and growth to elevation in temperate tree species, *Functional Ecology*. 28: 243-252.
- Viveros-Viveros, H. *et al.* (2007). Growth and frost damage variation among *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae* and *P. hartwegii* tested in Michoacán, México, *Forest Ecology and Management*. 253: 81-88.

- Weih, M., P. S. Karlsson. (1999). The nitrogen economy of mountain birch seedlings: implications for winter survival, *Journal of Ecology*. 87: 211-219.
- White, T. L. *et al.* (2007). *Forest Genetics*. Oxfordshire, Reino Unido: CABI Publishing.

PARQUE NACIONAL COFRE DE PEROTE: IMPORTANCIA, RIESGOS Y AMENAZAS

*Odette I. Cadena Morales, Edison A. Díaz-Álvarez
y Rosa Amelia Pedraza Pérez*

¡Qué hermosas montañas las de México!
Aquellos conos de nieve perpetua es lo más hermoso del mundo;
esas cabezas de nieve majestuosas que se elevan en medio de la
brillante vegetación de los trópicos.

ALEJANDRO DE HUMBOLDT (1769-1859),
geógrafo, naturalista y explorador.

INTRODUCCIÓN

México es un país con alta diversidad de especies, razón por la cual pertenece al selecto grupo de países considerados como megadiversos. De acuerdo con su riqueza, a este grupo lo integran Brasil, Colombia, China, Indonesia, México, Venezuela, Ecuador, Perú, Australia, Madagascar, Congo y Malasia, que en conjunto suman cerca de 70% de las especies de plantas y animales del mundo (Conabio, 2019).

La extraordinaria riqueza de especies que se encuentra en México se debe a que en su territorio confluyen dos zonas biogeográficas muy importantes, que se caracterizan por ser grandes regiones que com-

parten patrones de similitud biológica: la Neártica y la Neotropical, que corresponden a las zonas templada y tropical del nuevo mundo, respectivamente. La primera está constituida por Canadá, parte de Estados Unidos y parte del norte de México. En este último, la zona Neártica está presente en las provincias biogeográficas de California, Baja California, Sonora, el Altiplano mexicano y Tamaulipas. La vegetación predominante incluye algunas variantes de bosques y matorrales templados como los bosques de oyamel, *Abies* sp. (Morrone, 2019).

Por su parte, la región Neotropical abarca desde el límite norte de la Patagonia pasando por los Andes, la cuenca del Amazonas, el Orinoco y el Caribe, hasta una parte de Mesoamérica. Para el caso particular de México, los grupos sobresalientes de la vegetación neotropical son los mezquites (*Prosopis* sp.), el palo mulato (*Bursera* sp.) y los cedros (*Cedrus* sp.), cuya distribución se amplía en todo el medio árido, subhúmedo y húmedo del centro, sur y sureste del país. La confluencia de estas dos zonas biogeográficas hace que en México se presente una gran variedad de ecosistemas terrestres y su inmensa biodiversidad asociada (Conanp, 2012).

El estado de Veracruz no es ajeno a esta gran riqueza ya que está considerado como uno de los tres más biodiversos a nivel nacional debido a su privilegiada posición geográfica, dado que se encuentra ubicado en la Planicie Costera del Golfo de México (Semarnat, 2018). Además, lo recorre un sistema montañoso que es influenciado por el mar del Golfo, de manera que su precipitación, su tipo de suelo, su temperatura y su orografía contribuyen a la presencia de esa gran biodiversidad. Sin embargo, esta gran riqueza se ha ido deteriorando a lo largo de las últimas décadas, principalmente por el cambio de uso de suelo para actividades como la agricultura y la ganadería, la presencia de compañías petroleras y el desarrollo de la industria, entre otros, causando una pérdida alarmante de biodiversidad, fenómeno que no es exclusivo de Veracruz, ya que en todos los estados del país se ha presentado una situación similar, por lo que desde hace décadas se hizo imperativo la preservación de áreas estratégicas con gran biodiversidad (Semarnat, 2002).

Derivado de lo anterior y por decreto presidencial fue que en 2000 se creó la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp), responsable del manejo de las Áreas Naturales Protegidas (ANP's) del país, destinadas al manejo y a la conservación de los recursos naturales que proveen servicios ambientales, dado que reúnen una gran variedad de microclimas. Algunas de estas áreas se establecieron en sitios en donde se presentan características ambientales que son importantes

para la conservación de diferentes especies de animales, microorganismos y plantas, entre otros (Conanp, 2012).

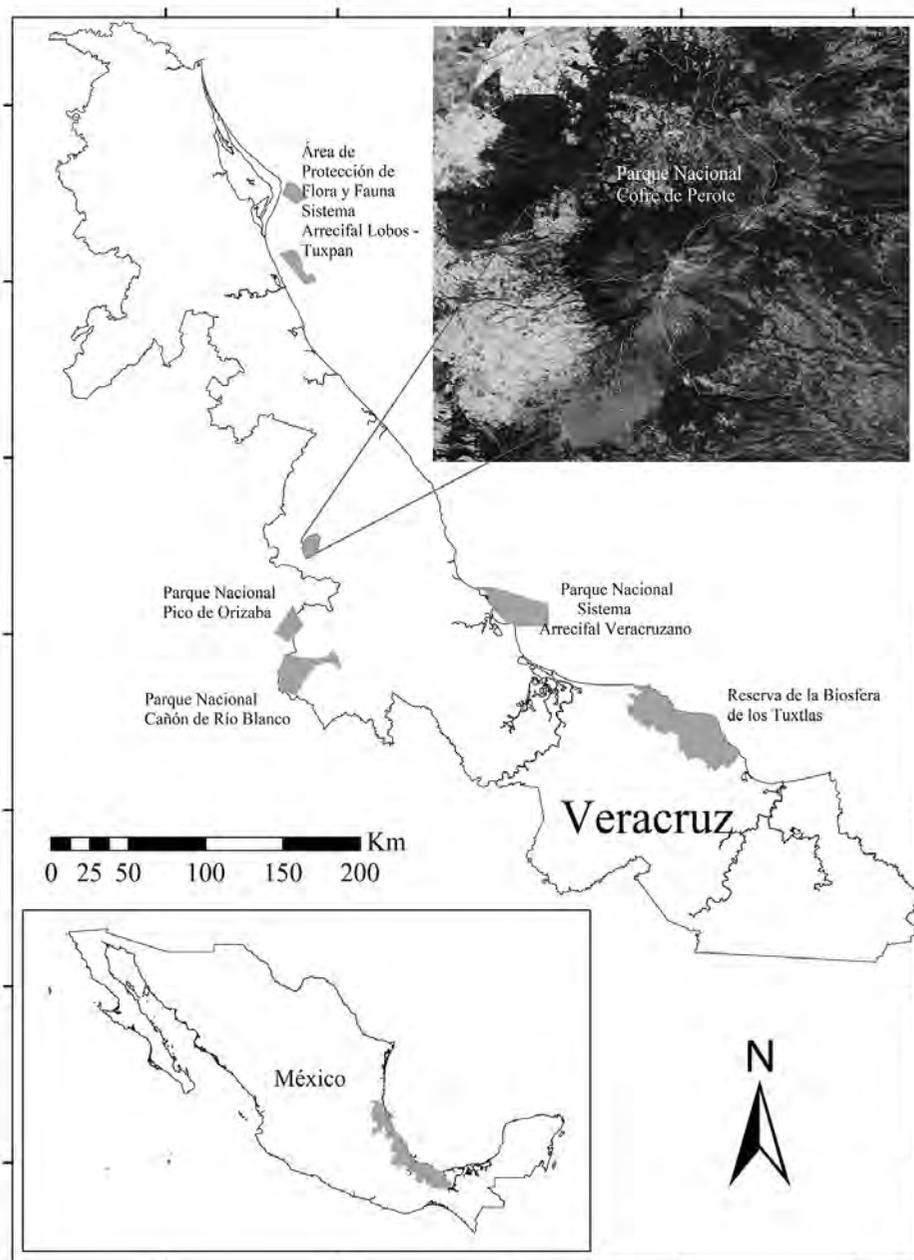


FIGURA 1. Veracruz, México (cuadro inferior izquierdo), Áreas Naturales Protegidas federales de Veracruz (principal), límites del PNCP y los límites municipales (cuadro superior derecho).

Los datos para la elaboración de la figura fueron obtenidos a partir de la información de la Conabio (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>) y la imagen satelital, de Google Earth pro (Versión 7.0 beta).

En la figura 1 se muestra que existen seis categorías de Áreas Naturales Protegidas que están clasificadas en la legislación mexicana de acuerdo con sus características: la extensión, el estado de conservación y la presencia de ecosistemas representativos por región. Son: Parques Nacionales (67), Reservas de la Biosfera (44), Áreas de Protección de Flora y Fauna (40), Santuarios (18), Áreas de Protección de Recursos Naturales (8) y Monumentos Naturales (5) (Conanp, 2012). De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Veracruz cuenta con tres de las seis mencionadas: cuatro Parques Nacionales, una Reserva de la Biosfera y un Área de Protección de Flora y Fauna, que representan 584 473 hectáreas, equivalentes a 8.15% del territorio del estado.

PARQUES NACIONALES

¿Qué son los Parques Nacionales y por qué es importante conocerlos? Los parques nacionales son áreas naturales protegidas que pueden estar compuestas por uno o varios ecosistemas, que ofrecen a sus visitantes su belleza escénica. Resguardan una porción representativa de biodiversidad, que a su vez tiene gran importancia para la educación, la investigación científica e incluso poseen valor histórico debido a los registros de ocupación humana antigua.

Es importante conocerlos porque la biodiversidad que resguardan representa la estabilidad de ecosistemas importantes que brindan servicios ambientales fundamentales para los seres humanos. Estas ANP's cuentan con la protección gubernamental más alta al estar incluidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en la cual se establece que solo algunas actividades están permitidas al interior de ellas (Semarnat, 2018; LGEEPA, 2019).

PARQUE NACIONAL COFRE DE PEROTE

El Parque Nacional Cofre de Perote (PNCP) se constituyó a partir de los 3 000 msnm hasta la cima, que alcanza los 4 230 m mediante el Decreto Presidencial publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 4 de mayo de 1937 (figura 2). Está localizado en el estado de Veracruz en la zona centro-oeste, al sur de la Sierra Madre Oriental en confluencia con el extremo oriente del Cinturón Volcánico Transmexicano, y es la octava montaña más alta de México (Conanp, 2019). Comprende los municipios de Perote, Ayahualulco, Ixhuacán



FIGURA 2. Parque Nacional Cofre de Perote, a 4 000 m dominado, por bosques de *Pinus hartwegii* Lind. (Fotografía de Odette Cadena).

de los Reyes y Xico, cubre una superficie de 11 530.7 hectáreas (Conanp, 2012). En el PNCP, de acuerdo con el *Diario Oficial de la Federación* de 2015, se encuentran 551 especies de flora y fauna silvestre, 59 de las cuales están protegidas por la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (caja 1).

Esta gran variedad de especies que encuentran refugio en el PNCP pertenecen a diferentes grupos, aunque las más representativas, aquellas que nos son más familiares debido a su cercanía con los humanos, son las de mamíferos, y entre ellas: Coyote (*Canis latrans*), Lince (*Lynx rufus*), Zorra gris, Zorra (*Urocyon cinereoargenteus*), Cacomixtle (*Bassariscus astutus*) y la Ardilla de Perote (*Spermophilus perotensis*). Además de estas especies de mamíferos, el PNCP resguarda a gran número de animales vertebrados de otros grupos, incluyendo a especies endémicas al parque y a México (tabla 1).

Caja 1. NOM-059-SEMARNAT-2010

De acuerdo con la Profepa (2010) esta norma “tiene por objeto identificar las especies o poblaciones de flora y fauna silvestres en riesgo en la República Mexicana”, en ella se categorizan y enlistan las especies según el resultado de la evaluación de riesgo de extinción. Esta norma incluye 2 678 especies (entre anfibios, aves, hongos, invertebrados, mamíferos, peces, plantas y reptiles), que son clasificadas en cuatro categorías de riesgo: Probablemente extinta en el medio silvestre, En peligro de extinción, Amenazadas, y Sujetas a protección especial.

¡AGUAS CON LA EXTRACCIÓN DE ESPECIES!

ya que: “Se considera delito cualquier actividad ilegal con fines de tráfico, captura, posesión, transporte, acopio, introducción al país, extracción del país, de especies que se encuentran en la NOM-059-SEMARNAT-2010” (Artículo 420, fracción IV del Código Penal Federal).

TABLA 1. Fauna del PNCP, número de especies totales por grupo de vertebrados, número de especies endémicas al parque o a México y número de especies incluidas en alguna categoría de la NOM-059.

<i>Grupo</i>	<i>Total</i>	<i>Endémicas</i>	<i>En la NOM-059</i>
Anfibios	14	8	3
Reptiles	25	12	16
Aves	89	5	7
Mamíferos	51	8	11

Los principales tipos de vegetación del Cofre de Perote son: bosque de coníferas, pastizales y vegetación inducida. Las especies representativas de flora en la zona son: Pino real (*Pinus montezumae* Lamb.), Pino

colorado, teocote (*Pinus teocote* Schiede ex Schltdl), Pino llorón (*Pinus patula* Schl. et Cham), Pino de navidad (*Pinus ayacahuite* Ehren), Pino de las alturas (*Pinus hartwegii* Lindl.), Pino piñonero, piñon (*Pinus cembroides* Zucc.), Pino ortiguillo (*Pinus pseudostrobus* Lindl.), Pino (*Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *oaxacana*), Chechem negro (*Baccharis conferta* Kunth.), Madroño (*Arbutus xalapensis* Kunth.), Cedro (*Juniperus monticola* Martínez.) y Aile (*Alnus jorullensis* Kunth.).

Los diferentes tipos de vegetación, y en particular los bosques de coníferas como los que se encuentran en el Cofre de Perote, brindan valiosos servicios ambientales que son fundamentales, tanto para las diferentes especies de animales como para los humanos.

SERVICIOS AMBIENTALES, ¿QUÉ SON? Y ¿CUÁLES BRINDA EL PNCP?

En el artículo 7° de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable México define los servicios ambientales “como los satisfactores que brindan los ecosistemas forestales de manera natural o por medio del manejo sustentable de los recursos forestales”. Es decir, que estos ecosistemas contribuyen a satisfacer las necesidades humanas básicas a partir de su existencia. Los servicios ambientales que provee el Cofre de Perote son diversos, siendo de gran importancia la captación, la filtración y el escurrimiento del agua, que es fundamental para abastecer los mantos freáticos de la zona del Valle de Perote, en donde es aprovechada para el consumo de la población y la irrigación de cultivos. Es de tal importancia que abastece a más de 700 000 habitantes (Conafor, 2002; citado en Narave Flores *et al.*, 2016). Además, la vegetación que alberga evita la erosión del suelo y contribuye con la captura de carbono, así como con la regulación climática (mitigación de los efectos del cambio climático). En este parque también se encuentran microhábitats idóneos que funcionan como refugios para diversas especies de fauna y flora, que en las regiones aledañas han disminuido o desaparecido debido a la caza y la extracción ilegal.

PROBLEMÁTICAS DEL PARQUE NACIONAL COFRE DE PEROTE

Actualmente, el Parque Nacional Cofre de Perote está expuesto a diferentes amenazas de origen antrópico, una de ellas es el cambio climático. En particular, el aumento de las temperaturas provoca el des-

plazamiento de las especies adaptadas a ciertos ambientes hacía la parte superior de la montaña y con el tiempo, al alcanzar el límite superior en donde no puedan seguir ascendiendo, inevitablemente desaparecerán. El aumento de la temperatura también contribuye a cambios en la fenología, como el retraso en la floración anual o la disminución en la producción de semillas de las especies arbóreas (Vázquez-Ramírez *et al.*, 2016), lo que propicia el ataque de plagas como los muérdagos y los escarabajos descortezadores, situación ya documentada en el país (Sánchez y Torres, 2007; Marchal-Valencia, 2009; Conafor, 2015).

La deforestación y el cambio de uso de suelo son otros de los problemas que afronta este parque nacional. La deforestación la realizan principalmente las comunidades que allí se asientan, pues utilizan los árboles no solo para satisfacer necesidades básicas sino también para obtener dinero extra, pues padecen escasez y falta de trabajo. Es tal la situación que algunas de estas comunidades se consideran de alto grado de marginación (Narave Flores *et al.*, 2016). En particular, utilizan leña como fuente de combustible, tanto para cocinar como para calentar sus hogares; para tal fin, una de las especies comúnmente utilizada es el Ilite (*Alnus jorullensis*), un árbol propio de bosques templados, de gran importancia para su regeneración, cuya explotación en el Cofre de Perote, de acuerdo con sus pobladores, ha conducido a una reducción significativa de su abundancia en los últimos años (López-Sánchez *et al.*, 2020). La madera también se utiliza para la construcción de casas o para la obtención de dinero en efectivo, para ello talan árboles que bajan a vender a las ciudades, práctica denominada “tala hormiga”, que consiste en la extracción de pequeñas cantidades de madera, lo que a largo plazo ocasiona una notable destrucción de los bosques, ya que, por ejemplo, el corte ilegal puede ser tan grande como de 23 799 m³ rollo total árbol, cantidad que es superior a lo permitido en la legislación y que en algunos casos supera el potencial productivo del sitio de extracción (Pedraza *et al.*, 2016).

Respecto del cambio de uso de suelo, los habitantes de esta zona desmontan la vegetación natural e introducen pastizales para la cría de ovinos y cabras; además, en algunos sectores de esta área es muy común el cultivo de papa, actividad que se ha intensificado en los últimos años en gran parte del Cofre de Perote (Gómez, 2014). Aunque no todo es malo, ya que, debido al adecuado manejo forestal en algunas zonas, como en la ladera oriental, se ha observado la recuperación de bosques secundarios; sin embargo, debido a la dinámica socioambiental de la región, los gestores de esta iniciativa recomiendan el monitoreo

constante para evitar de nuevo el deterioro; este tipo de manejo forestal podría contribuir a reducir las consecuencias de las actividades anteriormente descritas en otros sectores del PNCP (Gerez, 2016). Además de los cultivos y la ganadería, algunas zonas de esta área son utilizadas para la extracción de materiales para la construcción, actividad que tiene impactos ambientales severos que algunos consideran irreversibles (Narave Flores *et al.*, 2016).

Otro de los grandes problemas que aquejan al Cofre de Perote, y que afecta a los ecosistemas que lo componen, al igual que en muchos parques nacionales y áreas naturales protegidas de toda la república mexicana, es el turismo no regulado. Los visitantes dejan tras de sí grandes cantidades de residuos sólidos que no se degradan fácilmente, además de que en ocasiones además de extraer leña encienden fogatas en lugares no permitidos, que algunas veces se salen de control y producen incendios forestales (Pérez Ramírez *et al.*, 2009). Además, regularmente los turistas que visitan extraen plantas que llevan a sus hogares para decoración. Por otra parte, los visitantes que deambulan sin control por las áreas naturales tienden a abrir nuevos senderos, los cuales interrumpen la continuidad del paisaje contribuyendo a la pérdida de conectividad que muchas especies necesitan para mantener sus poblaciones saludables (Pérez Ramírez *et al.*, 2009). Por último, el gran número de visitantes que acude a las ANP durante algunas temporadas del año exacerba el impacto del turismo no regulado en sitios de gran interés socioambiental (Pérez Ramírez *et al.*, 2009).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Se decretó al Parque Nacional Cofre de Perote (PNCP) como Área Natural Protegida (ANP) con la finalidad de proteger los valiosos recursos naturales que posee. Sin embargo, está sometido a presiones extractivas que lo hacen muy vulnerable, en parte como resultado de la marginalidad en la que viven las comunidades de la zona. Aunado a esto, la falta de vigilancia y de programas de apoyo del gobierno federal ha contribuido a su deterioro. A largo plazo se enfrentará también a fuertes presiones como consecuencia del cambio climático. Los habitantes de esta área necesitan más oportunidades económicas y de educación para que sean actores importantes en su conservación. Una alternativa que se puede explorar es el pago por servicios ambientales en el que las comunidades reciben dinero a cambio del cuidado y la conservación de un área determinada. El manejo forestal ya ha mostrado ser una opción viable

no solo para la conservación sino, también, para la recuperación de los recursos naturales del parque. Otra alternativa es el ecoturismo, actividad en la cual los habitantes, que conocen muy bien el área, podrían prestar el servicio de guía para los numerosos visitantes, obteniendo de esta forma recursos económicos muy necesarios; esta actividad también puede contribuir al desarrollo de infraestructura para la región. Si bien el turismo ya es una actividad común en esta zona, se requiere de una mayor organización para que sea una actividad que contribuya a la conservación. La conservación de los recursos naturales no se debe considerar como una actividad exclusiva dentro de las Áreas Naturales Protegidas, ya que estas solo representan una pequeña porción del territorio mexicano, también debe considerarse para otras zonas no protegidas con grandes riquezas naturales. Finalmente, un manejo integrado de esta ANP requiere la participación de diferentes actores de la sociedad, incluyendo a los pobladores, a quienes toman decisiones, a la academia y al público en general para preservar esta joya de la naturaleza que brinda tantos servicios a la humanidad.

Bibliografía

- Comisión Natural de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). (2019). Felices 18 años conanp. Consultado el 27/10/2020. Disponible en <https://www.gob.mx/Conanp/es/articulos/felices-18-anos-conanp?idiom=es>
- Comisión Natural de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). (2012). Dirección General de Operación Regional. México. Consultado el 27/10/2020. Disponible en www.conanp.gob.mx/que_hacemos/programa_manejo.php
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (2019). Riqueza Natural de México. Consultado el 27/10/2020. Disponible en <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/riquezanat.html>
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2015). Servicios Ambientales. Consultado el 27/10/2020. Disponible en <https://www.gob.mx/conafor/documentos/servicios-ambientales-27810>
- Espinosa Organista, D. *et al.* (2008). El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural. En J. Sarukhán (coord.), *Capital Natural de México. Vol. 1. Conocimiento actual de la Biodiversidad*. México: Conabio, pp. 33-65.
- Gerez, P. (2016). Cambio de uso del suelo y factores promotores: caso de estudio en la ladera oriental del Cofre de Perote. En H. V. Narave Flores *et al.* (coords.), *El Cofre de Perote. Situación, perspectivas e importancia*. Xalapa: UV, ISBN: 978-607-8445-14-1.

- Gómez-Puente, A. F. (2014). Costo de transacción y cadena de producción forestal en la ladera oriental del volcán Cofre de Perote, Veracruz, *Revista pueblos y fronteras digital*. 9(18): 91-109.
- Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS). (2018). Última modificación publicada: Nueva Ley DOF 05-06-2018.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). (2015). Última reforma publicada DOF 09-01-2015.
- López-Sánchez, C. L. *et al.* (2020). Population structure of *Alnus jorullensis*, a species used as firewood by five rural communities in a natural protected area of Mexico, *Botanical Sciences*. 98(2): 238-247.
- Marchal-Valencia, D. (2009). El muérdago en la Ciudad de México, *Arbolama*. 2: 10-30.
- Morrone, Juan J. (2019). Regionalización biogeográfica y evolución biótica de México: encrucijada de la biodiversidad del Nuevo Mundo, *Revista mexicana de biodiversidad*. 90: e902980.
- Narave Flores, H. V. *et al.* (2016). Introducción. En H. V. Narave Flores *et al.* (coords.). *El Cofre de Perote. Situación, perspectivas e importancia*. Ed. Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz. ISBN: 978-607-8445-14-1.
- Negrete Ramírez, J. A., M. de los Á. Piñar Álvarez. (2016). Avances en el establecimiento de un corredor de turismo sustentable en la ladera oriental del Cofre de Perote: sinergias intersectoriales para la conservación desde el enfoque de cuenca. En H. V. Narave Flores *et al.* (coords.). *El Cofre de Perote. Situación, perspectivas e importancia*. Ed. Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz. ISBN: 978-607-8445-14-1.
- Pedraza, R. A. *et al.* (2016). La actividad forestal en la cuenca alta del río La Antigua. En H. V. Narave Flores *et al.* (coords.). *El Cofre de Perote. Situación, perspectivas e importancia*. Ed. Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz. ISBN: 978-607-8445-14-1.
- Pérez Ramírez, C. *et al.* (2009). Impacto ambiental del turismo en áreas naturales protegidas; procedimiento metodológico para el análisis en el Parque Estatal El Ocotal, México, *El periplo sustentable*. 16: 25-56.
- Sánchez Salas, J. A., L. M. Torres Espinosa. (2007). Biología y hábitos del descortezador *Dendroctonus mexicanus* Hopkins y estrategias de control en *Pinus teocote* en Nuevo León, *Ciencia forestal en México*. CIRNE, INIFAP, Campo Experimental Saltillo. Folleto Técnico Núm. 29, Coahuila, México, pp. 35.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2002). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2002. Consultado el 27/10/2020. Disponible en http://www.paot.org.mx/centro/informacion/semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/indice.htm

- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2018). Parques Nacionales de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/parques-nacionales-de-mexico>. Consultado el 27/10/2020. Disponible en <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/parques-nacionales-de-mexico>
- Semarnat/Conafor. (2001). *Programa Estratégico Forestal para México 2025*. Guadalajara, 189 p.
- Vázquez-Ramírez, J. *et al.* (2016). Fenología reproductiva de las especies alpinas del Cofre de Perote: una aproximación al uso de ejemplares de herbario como indicadores de cambio climático. En H. V. Narave Flores *et al.* (coords.). *El Cofre de Perote. Situación, perspectivas e importancia*. Xalapa: UV, ISBN: 978-607-8445-14-1.

TÉCNICAS
Y HERRAMIENTAS
DE LA INVESTIGACIÓN
FORESTAL

ÁRBOLES NATIVOS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA: ¿QUÉ SABEMOS? ¿QUÉ IGNORAMOS?

Rosa Amelia Pedraza Pérez y Claudia Alvarez Aquino

¿Por qué querer imponer una cubierta vegetal, proyección de nuestra imaginación, sobre un terreno para el que la Naturaleza tiene ya su propio proyecto?

PROF. JOURDAIN (mencionado por Miranda, 2016)

HISTORIA DEL USO DE LOS ÁRBOLES EN EL MEJORAMIENTO DEL AMBIENTE

El manejo de los elementos de la vegetación, con la finalidad de mejorar o rectificar funciones o servicios alterados en los ecosistemas (ejemplo: recuperación de cubierta forestal o retención de suelos), se conoce desde la antigüedad. En China se instalaban sistemas vivos de sauce (*Salix* sp.) para reparación de diques y márgenes de ríos. Obras semejantes se mencionan para celtas y romanos. En el Renacimiento se recomendaron los sauces para evitar la erosión (Miranda, 2016). En México, en la época

prehispánica, se utilizaba el ahuejote (*Salix bonplandiana*) para mantener las chinampas arraigadas en el fondo del lago; en tierra firme se manejaron algunos árboles frutales como el chicozapote (*Achras zapote*), la anona (*Anona glabra*), el ramón (*Brosimum alicastrum*), el tejocote (*Crataegus pubescens*), el aguacate (*Persea americana*), el capulín (*Prunus serotina*), la guayaba (*Psidium guajava*) y la ciruela (*Spondias mombin*) (Challenger, 1998). Durante la Colonia muchas especies fueron llevadas a otros continentes, como la nochebuena (*Euphorbia pulcherrima*), el cacao (*Theobroma cacao*) o el tabaco (*Nicotiana tabacum*). También se introdujo una gran cantidad de especies que facilitaron la modificación de agrosistemas y de hábitos alimenticios de la población, como el consumo de café, la caña de azúcar, el trigo, el arroz o el plátano. Con la introducción de cultivos desconocidos y de especies exóticas, como el pirul (*Schinus molle*), se modificó el paisaje y se complicó el manejo de los cultivos por la aparición de especies invasoras o malezas, que se confunden con especies cultivadas (Challenger, 1998). Después de la Independencia inició una época enfocada al conocimiento de los recursos del país, durante la cual fueron identificadas nuevas plantas alimenticias y medicinales y también se fundó la Sociedad Mexicana de Historia Natural en 1868 (Challenger, 1998). Durante el Imperio de Maximiliano se plantaron árboles y plantas de ornato en el hoy Paseo de la Reforma y en el Castillo de Chapultepec, ajardinado a la usanza europea, pero utilizando flora nativa (Gómez-Tepexicuapan, 2002). Los árboles característicos del Bosque de Chapultepec eran ahuehuetes (*Taxodium mucronatum*), hoy casi desaparecidos. “A esta especie hacían compañía numerosos fresnos (*Fraxinus* sp.), álamos (*Populus* sp.), sauces (*Salix bonplandiana*) y sauces llorones (*Salix babylonica*) que con su ramaje sombreaban y daban frescura al parque y a los céspedes donde lucían preciosas flores propias de la Cuenca de México” (Gómez-Tepexicuapan, 2002).

Al incrementarse el uso de las máquinas de vapor se requirieron enormes cantidades de combustible, lo que provocó la tala de bosques y selvas para obtener leña. Así mismo, compañías madereras europeas obtuvieron concesiones para explotar las maderas preciosas del sureste del país (caoba, cedro y ébano), deforestando selvas en Chiapas y en la península de Yucatán (Challenger, 1998). En el siglo XX el petróleo tuvo un auge que se reflejó en una mayor prosperidad, lo que permitió que se asignaran mayores recursos a la historia natural. En 1922 se fundó la Sociedad Forestal Mexicana, se abrió el Jardín Botánico y el Zoológico de Chapultepec; en 1929 se fundó el Instituto de Biología

de la UNAM, y en 1926 se aprobó la primera Ley Forestal con fines de conservación de los bosques (Challenger, 1998). En 1934, durante la presidencia de Lázaro Cárdenas, se crearon 36 reservas forestales; sin embargo los bosques siguieron experimentando daños por las técnicas inadecuadas de explotación (Challenger, 1998). En 1940, con Miguel Alemán, se dio un crecimiento económico y social, pero también de deterioro ambiental y explotación de los bosques, época que coincide con los estudios de vegetación de Faustino Miranda, Jerzy Rzedowsky y Efraím Hernández Xolocotzi, lo que permitió una mejor comprensión y conocimiento de los recursos naturales, el interés por la protección del ambiente y el control de la contaminación (Challenger, 1998). No obstante, entre 1940 y 1980 se talaron 9 millones de hectáreas de selva tropical húmeda, para abrir espacios a la ganadería, perdiéndose 52% de la superficie original y parte de la biodiversidad; 78% del carbono liberado a la atmósfera durante ese periodo fue causado por el desmonte (Masera *et al.*, 1992). En la siguiente década se mantuvo la tasa de deforestación, aunque se incrementó la reforestación, la regeneración natural en parcelas agropecuarias abandonadas y la creación de reservas ecológicas. En el último informe de la Evaluación de Recursos Forestales Mundiales (FRA) de 2020 se menciona para México una tasa de deforestación de 165 mil hectáreas por año y 159 mil hectáreas reforestadas, que a todas luces no resuelven la situación. Las reservas de carbón sobre y bajo la tierra, junto con la del suelo, son de 75 millones de toneladas por hectárea (FAO, 2020).

LOS PROGRAMAS DE REFORESTACIÓN, LAS PLANTACIONES Y LA RESTAURACIÓN

El daño ocasionado a los bosques llevó al gobierno a instrumentar programas de reforestación; el más conocido fue el realizado por Miguel Ángel de Quevedo, quien fundó en 1901 los Viveros de Coyoacán, en donde se propagaron especies nativas y exóticas para las calles y jardines de la Ciudad de México. Posteriormente, con Lázaro Cárdenas se inició un programa de reforestación para la protección de cuencas, ciudades e infraestructura urbana (Vázquez-Yáñez y Batis 1996). En Veracruz aún quedan La Pinera en el puerto, Los Molinos en Perote, río La Carbonera en Orizaba y El Gavilán en Coatzacoalcos. En estas acciones de tipo masivo se introdujeron *Casuarina*, *Eucaliptus* y *Grevillea*, especies exóticas originarias de Australia, pocas especies nativas como *Fraxinus* spp., *Liquidambar* y *Platanus* porque se conocían las técnicas

para su propagación (Carabias *et al.*, 2007). Los programas anuales de reforestación continuaron, pero hubo mayor interés de 1984 a 1992, cuando se llegaron a producir 78 millones de árboles, aunque solo se logró un prendimiento de 10% a 23%. Entre 1995 y 2000 se implementó el Programa Nacional de Reforestación (Pronare), que buscó mejorar los resultados dando apoyos para el establecimiento y el mantenimiento de los árboles plantados. En 2001 este programa se modificó y se le dio mayor recurso al Programa de Desarrollo de Plantaciones (Prodeplan) con el fin de impulsar las plantaciones productivas de rápido crecimiento (Conafor, 2002). La ventaja de las plantaciones sobre la regeneración natural es el control de la densidad de árboles por hectárea, lo que resulta en una mayor producción de madera, además de que se pueden seleccionar especies con características de forma, tamaño y calidad del producto deseado. En bosques templados talados es poca la diferencia entre plantaciones y reforestaciones; los forestales tienden a diferenciarlas por el objetivo que persiguen; las reforestaciones son con fines ambientales y las plantaciones con fines comerciales (Mather, 1993).

En la caja 1 se presentan diversos conceptos relacionados con la recuperación de la cubierta forestal. Actualmente, si el objetivo es recuperar los ecosistemas que han sido dañados y/o eliminados, se prefiere utilizar el término “restaurar”, y en ese caso se deben utilizar especies nativas. En los últimos 30 o 40 años la comunidad científica ha generado información que apoya el manejo de estas especies en la recuperación de la vegetación original, especialmente en el trópico, donde se concentra la diversidad de especies y el desconocimiento para su manejo.

CONTROVERSIA: ESPECIES NATIVAS VS. EXÓTICAS

Se favoreció el uso de especies exóticas porque sus semillas se encuentran disponibles en el mercado, la técnica de propagación ya ha sido probada y son especies adaptables a diferentes climas y suelos, además de que se establecen y crecen rápido. Sin embargo, no es lo más adecuado para recuperar los bosques, ya que no restablecen las condiciones originales del sitio y no tienen relaciones ecológicas con las especies autóctonas, por lo que pueden convertirse en invasoras o plagas, o bien introducir insectos y enfermedades, además de producir sustancias alelopáticas que impiden la germinación de otras especies o producir hojarasca de difícil descomposición que no mejora la fertilidad del suelo (Vázquez-Yáñez y Batis, 1996; Vanegas, 2016). Su uso prevaleció debido a la falta de información sobre el manejo de las especies nativas, pues al

Caja 1. Recuperación de la cubierta forestal

Reforestación: Práctica silvícola encaminada a la recuperación de la cubierta forestal o al mejoramiento ambiental en áreas afectadas por el hombre o por accidentes naturales. Se usan una o pocas especies, generalmente exóticas (Vázquez-Yáñez y Batis, 1996).

Plantaciones: Son una variante de la reforestación, tienen carácter comercial y de gran escala y buscan la producción de celulosa, madera, frutos o semillas. Generalmente se utilizan especies exóticas, de rápido crecimiento, que se establecen en monocultivos o en grupos de pocas especies (Lamb y Gilmour, 2003).

Restauración ecológica: Consiste en ayudar a la recuperación de un sistema que ha sido degradado, dañado o destruido (SER, 2004). Su finalidad es acelerar la recuperación de la estructura, la composición y las funciones que tenía originalmente. Aun cuando esto no es posible, restaurar permite recrear un ecosistema lo más cercano al original, recuperando parte de la biodiversidad y dando preferencia al uso de especies nativas (Vázquez-Yáñez y Batis, 1996). Algunas variantes son la rehabilitación, que busca el mismo objetivo pero usa pocas especies características de la vegetación original, para conseguir pronto una cubierta forestal, y la reclamación, que utiliza especies exóticas y prácticas enfocadas a la recuperación de las condiciones ambientales que evitan el establecimiento de árboles, como la erosión y la formación de cárcavas (Brown y Lugo, 1994). Las modalidades anteriores pertenecen al concepto de restauración activa. Recientemente se ha incluido el término restauración pasiva, esto es, el dejar que la regeneración actúe por sí misma a través de la sucesión. Un caso intermedio es el mejoramiento de bosques empobrecidos estableciendo especies para el enriquecimiento ecológico y/o económico (Soto Pinto *et al.*, 2011; Covarrubias *et al.*, 2018).

menos 2 500 especies de árboles del país tienen potencial forestal, pero pocas han sido estudiadas y no cuentan con información sobre su propagación y cultivo (Rzedowski, 1993; Vázquez-Yáñez *et al.*, 1999).

Las especies nativas están adaptadas a las condiciones de clima y suelo y forman parte de la flora del sitio, por lo que sus capacidades de dispersión y sus historias de vida van de acuerdo con las condiciones bióticas y abióticas facilitando el proceso de sucesión (Vanegas, 2016).

Además, son conocidas por las personas de la localidad y generalmente tienen más de un uso que les permite ser cuidadas y aprovechadas. Su desventaja es la poca información que se tiene para su propagación, su cuidado en campo y la disponibilidad de semillas, lo cual se debe resolver para cada especie y ecosistema (Vázquez-Yanes y Batis, 1996; Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). Esta desventaja se ha reducido con el estudio en campo, en vivero y en laboratorio, de muchas especies; para el caso del bosque de niebla de Veracruz se pueden mencionar varios trabajos (Pedraza, 2003; Pedraza y Williams-Linera, 2003, 2005; Alvarez-Aquino *et al.*, 2004; Ortega-Pieck *et al.*, 2011; Muñoz-Castro *et al.*, 2012; Williams-Linera *et al.*, 2011), lo mismo que para otros tipos de vegetación y regiones del país (Alvarez-Aquino y Williams-Linera, 2012; UACH y Conafor, citado por Vanegas 2016). También existen iniciativas como la de la Red de Viveros de la Biodiversidad, que afirma tener 200 especies de árboles en producción para fines de la restauración (revivemx.org). De 1992 a 1995 se incrementó el uso de especies nativas de una decena hasta 484 y 107 especies para el país y Veracruz, respectivamente. Aun cuando subsistían problemas de índole técnico, también se incrementó su uso en los programas oficiales de reforestación (Benítez *et al.*, 2004). Actualmente, para restaurar las condiciones originales de un ecosistema degradado es requisito emplear especies nativas en el proceso. Con el fin de hacer una mejor elección de las especies a usar de acuerdo al sitio, es importante conocer las ventajas y desventajas de ambos grupos.

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE ESPECIES

Para la restauración se prefieren especies nativas que tengan algunas de las siguientes características que sean: 1) de rápido crecimiento para competir y excluir malezas, así como tolerantes a diferentes condiciones limitantes, como suelos compactados y, o propensos a la sequía; 2) que produzcan abundante hojarasca para incrementar la materia orgánica; que sean fijadoras de nitrógeno para favorecer la fertilidad; 3) que produzcan frutos y semillas de manera precoz para atraer fauna silvestre; y 4) que tengan algún uso o interés económico para los productores del campo. En conjunto, las especies seleccionadas incrementan la biodiversidad, factor que se desea en toda restauración (Vázquez-Yanes y Batis, 1996; Lamb y Gilmour, 2003). Por lo general se prefiere el uso de especies pioneras porque tienen semillas abundantes y pequeñas de dispersión anemócora, preadaptadas al disturbio y buenas para las etapas tempranas e intermedias de la sucesión, evitando aquellas que



FIGURA 1. La emoción de trasplantar un pequeño árbol de cedro cuidado en el vivero para que se establezca adecuadamente. *Cedrella mexicana* en la selva baja del municipio de Paso de Ovejas, Veracruz. Foto: Claudia Alvarez

tengan tendencia a volverse invasoras e impidan el establecimiento de otras nativas (Vázquez-Yanes y Batis, 1996; Vanegas, 2016). El uso de especies raras y en peligro de extinción favorece su conservación; sin embargo, se recomienda su introducción una vez que se ha iniciado la recuperación de la cubierta forestal, ya que generalmente son especies características de las etapas tardías de sucesión (figura 1, Lamb y Gilmour, 2003). No obstante, las exóticas siguen siendo utilizadas por su adaptabilidad a condiciones alteradas: minas abandonadas, dunas desnudas o suelos altamente compactados donde las nativas no pueden competir.

INFORMACIÓN PARA EL USO Y DESARROLLO DE NUESTRAS ESPECIES

La selección de árboles en proyectos de restauración se ha facilitado por la publicación de listados de especies con potencial para este uso, dando información sobre su propagación y los requerimientos para un desempeño exitoso (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999; Benítez *et al.*, 2004; Alvarez-Aquino, 2013; UACH y Conafor, citado por Vanegas 2016). Los estudios experimentales de donde se ha probado el desempeño de

varias especies nativas en determinados ambientes y condiciones han beneficiado también una adecuada selección; sin embargo, todavía tenemos mucho conocimiento que generar debido a la alta diversidad que tienen nuestros bosques. Lo ideal sería conocer cada vez mejor los requerimientos de germinación y el establecimiento y el crecimiento de cada especie, es decir: la resistencia a factores limitantes (tolerancia a los suelos pobres, degradados y químicamente alterados), sus propiedades biológicas (la tolerancia a la sombra para ubicarlas en el proceso de sucesión ecológica y el modo de dispersión de semillas), su fenología (para conocer fechas de colecta de semillas), el almacenaje y beneficiado de las semillas, su porcentaje de germinación y supervivencia en etapas tempranas, el tipo de servicio que presta (nodrizaje, protección eólica e hídrica, reciclaje de nutrientes, fijación de nitrógeno, retención e infiltración del agua en el suelo y hábitat adecuado para fauna nativa), y los productos suplementarios que provee (madera, leña, carbón, forrajes, postes, vainas y frutos comestibles y/o medicinales). Por lo anterior, el reto en la restauración ecológica está en evaluar cada vez más especies



FIGURA 2. *Juglans pyriformis* del bosque de niebla, municipio de Tlalnahuayocan, Veracruz.
Foto: Rosa Amelia Pedraza.



FIGURA 3. Se deben privilegiar el interés y el conocimiento de la población local, pues mejor que nadie conoce los requerimientos y los usos de las especies nativas. Vivero de campesino en el municipio de Paso de Ovejas, Veracruz.

nativas y propagarlas, para resolver la poca disponibilidad que hay de ellas en los proyectos de restauración. Se necesita contar con viveros que propaguen especies arbóreas acordes con la biodiversidad de las áreas a reforestar. Otra medida importante es manejar los fragmentos de vegetación secundaria a favor de los procesos de restauración (figura 2. Williams-Linera *et al.*, 2011; Soto-Pinto *et al.*, 2015). Es importante resaltar que para mantener los beneficios de los servicios ecosistémicos se debe continuar con tres acciones prioritarias: conservar los fragmentos de bosque, darle un manejo al bosque secundario, y restaurar las zonas degradadas, siempre considerando que la calidad de estos servicios está relacionada con la diversidad existente en los ecosistemas (figura 3).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La necesidad de propagar especies arbóreas estableciéndolas en sitios donde se desea recuperar la cubierta forestal tiene una larga historia en la que se combina el interés por recuperar las condiciones de protección al ambiente, sustituir las especies que fueron extraídas, reemplazar los individuos de los bosques explotados por la industria y, últimamente, restaurar el ecosistema dañado por las actividades antropogénicas. La selección de especies ha fluctuado entre unas

pocas de interés comercial, pudiendo ser nativas o introducidas. Estas últimas fueron prevaleciendo por la facilidad de conseguir semillas y por el conocimiento ya desarrollado para su manejo en plantaciones de rápido crecimiento; sin embargo, la dimensión que ha alcanzado la destrucción de los ecosistemas y el interés por recuperar las condiciones originales de estos exigen tener las posibilidades de manejar el mayor número de especies nativas posibles para propagarlas en vivero y poderlas utilizar en los proyectos de restauración. En los últimos 30 años se ha avanzado en este objetivo, pero queda mucho por estudiar y resolver dada la magnitud del daño y el tamaño de la biodiversidad que tiene nuestro país.

Bibliografía

- Alvarez-Aquino, C. *et al.* (2004). Experimental native tree seedling establishment for the restoration of a mexican cloud forest, *Restoration Ecology*. 12(3): 412-418.
- Alvarez-Aquino, C. *et al.* (2012). Seedling survival and growth of tree species: site condition and seasonality in tropical dry forest restoration, *Botanical Sciences*. 90(3): 341-352.
- Alvarez-Aquino, C. (comp.). (2013). *Especies con potencial para reforestar la microcuenca del rio Naolinco, Veracruz*. Xalapa: UV.
- Benítez, G. *et al.* (2004). Árboles multiusos nativos de Veracruz para reforestación, restauración y plantaciones. Xalapa: Instituto de Ecología A.C.-Sigolfo-Conafor.
- Brown, S., A. E. Lugo. (1994). Rehabilitation of tropical lands: a key to sustaining development, *Restoration Ecology*. 2: 97-111.
- Carabias, J. *et al.* (2007). Las políticas públicas de la restauración ambiental en México: limitantes, avances, rezagos y retos, *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 80: 85-100.
- Challenger, A. (1998). *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro*. México: Conabio-UNAM-Agrupación Sierra Madre, S. C.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2002). *Programa estratégico forestal para México 2025*. Ciudad de México: Consejo Nacional Forestal.
- Covarrubias, M. *et al.* (2018). Bosques oligárquicos de *Oecopetalum mexicanum* enriquecidos con especies nativas de la Sierra de Misantla, *Madera y Bosques*. 24(3): 1-12, México.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020:

- Informe principal y anexos. Roma, Italia. Consultado el 27/10/2020. Disponible en <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/es/>
- Gómez Tepexicuapan, A. (2002). Los jardines de Chapultepec en el siglo XIX, *Arqueología Mexicana*. 57: 48-53.
- Lamb, D., D. Gilmour. (2003). *Rehabilitation and restoration of degraded forests*. Gland, Suiza and Cambridge: IUCN.
- Masera, O. *et al.* (1992). *Carbon emissions from deforestation in Mexico: Current situation and long-term scenarios*. California: Environmental Protection Agency y Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.
- Mather, A. (ed.). (1993). *Afforestation: policies, planning and progress*. Londres: Belhaven Press, pp. 223.
- Miranda, M. R. (2016). Revisión panorámica del uso del pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en restauración de taludes como técnica de bioingeniería del suelo. Tesis de Maestría. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería.
- Muñiz-Castro, M. G. *et al.* (2012). Dispersal mode, shade tolerance, and phyto-geographical affinity of tree species during the secondary succession in tropical montane cloud forest, *Plant Ecology*. 213(2): 339-353.
- Ortega-Pieck, A. *et al.* (2011). Early seedling establishment of two tropical montane cloud forest tree species: The role of native and exotic grasses, *Forest Ecology and Management*. 261(7): 1336-1343.
- Pedraza, R. A. (2003). Germinación en condiciones de vivero y campo del nogal (*Juglans pyriformis* Liebm.), *Amaranto*. 16(3): 2-11.
- Pedraza, R. A., G. Williams-Linera. (2003). Evaluation of four native tree species for rehabilitation of deforested areas in a Mexican cloud forest, *New Forests*. 26: 83-99.
- Pedraza, R. A., G. Williams-Linera. (2005). Microhabitat conditions for germination and establishment of two native temperate tree species in a Mexican montane cloud forest, *Agrociencia*. 39: 457-467.
- Rzedowski, J. (1993). *La vegetación de México*. México: Editorial Trillas.
- Society for Ecological Restoration International (SER). Science & Policy Working Group. (2004). *The SER International Primer on Ecological Restoration*. Society for Ecological Restoration International. Consultado el 18/11/2020. Disponible en www.ser.org
- Soto Pinto, L. *et al.* (2011). *El achual mejorado un prototipo agroforestal*. Chiapas: EcoSur-RedISA.
- Vanegas López, M. (2016). Manual de mejores prácticas de restauración de ecosistemas degradados, utilizando para reforestación solo especies nativas en zonas prioritarias. Informe final dentro del proyecto GEF 00089333 "Aumentar las capacidades de México para manejar especies exóticas"

- invasoras a través de la implementación de la Estrategia Nacional de Especies Invasoras". México: Conafor-Conabio-GEF-PNUD. México.
- Vázquez Yanes, C., A. I. Batis. (1996). Adopción de árboles nativos valiosos para la restauración ecológica y la reforestación, *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 58: 75-84.
- Vázquez Yanes, C. *et al.* (1999). Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica. Reporte Técnico del Proyecto J084. México: Conabio-Instituto de Ecología, UNAM. Consultado el 01/12/2020. Disponible en http://ixmati.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/inicio.pdf
- Williams-Linera, G. *et al.* (2011). Early successional sites and the recovery of vegetation structure and tree species of the tropical dry forest in Veracruz, Mexico, *New Forest*, 42: 131-148.

PINUS JALISCANA: DESCUBRIENDO EL MISTERIO DE SU PROPAGACIÓN VEGETATIVA

Armando Aparicio-Rentería

INTRODUCCIÓN

La propagación vegetativa, también conocida como propagación asexual o clonal, es una forma de reproducción de las plantas que puede ocurrir de manera natural o artificial. En algunas especies este tipo de reproducción ocurre en forma natural a través de sus órganos vegetativos, como los bulbos en las cebollas, los ajos y las azucenas, los tubérculos en las papas y los retoños en los rosales. Por otro lado, la propagación vegetativa artificial en plantas es posible con el uso de fragmentos de tejidos provenientes de los tallos, brotes, raíces y hojas. Este tipo de propagación es posible por el enraizamiento de estacas, el injertado, los acodos y el cultivo *in vitro*, que generalmente se realizan en viveros, invernaderos, plantaciones y laboratorios (Henrique *et al.*, 2006). La reproducción asexual o clonal no proviene del intercambio genético entre dos individuos parentales. A la planta de la cual obtenemos el material vegetativo (brote, estaca, púa o explante) se le llama orteto; así mismo, a cada planta individual producida a partir de un orteto se le conoce como rameto, y al conjunto de todos los rametos se les llama clon (Zobel y Talbert, 1988).

Las plantas producidas asexualmente no son producto del cruzamiento (recombinación genética) entre dos individuos, como en la reproducción sexual, en la cual es necesario la formación de flores o estructuras reproductivas para que ocurra la producción de gametos masculinos (polen) y femeninos (óvulos) a través de un proceso de división celular conocido como meiosis, además de que se requiere que ocurra la polinización (cruzamiento) para la obtención de semillas. Por lo tanto, las plantas obtenidas de manera vegetativa son genéticamente idénticas a la planta que les dio origen, pues la regeneración de órganos (raíces, hojas y tallos) es posible a través de la división celular conocida como mitosis (Higashi *et al.*, 2000). Durante este proceso, las células contienen el material genético y la capacidad suficiente para regenerar un organismo completo llamado totipotencia, y esta característica se manifiesta con mayor eficiencia cuando las plantas a propagar se encuentran en una fase de desarrollo juvenil, como se ha observado en las especies de coníferas (Silva, 1985; Hartmann y Kester, 2002; Mitchell *et al.*, 2004).

La propagación vegetativa ha permitido la producción de varias especies herbáceas y leñosas de uso ornamental o forestal (Barbat, 2006). Las principales técnicas que se han utilizado en la producción de especies forestales son el enraizado de estacas y el injertado, por lo que resalta su uso en investigación y en el área del mejoramiento forestal dirigidos al establecimiento de plantaciones comerciales, como son los huertos semilleros asexuales, que son plantaciones de clones obtenidos de árboles seleccionados que se aíslan mediante una franja compuesta de una especie diferente para reducir la polinización de árboles externos de la misma especie y que se manejan intensivamente para producir abundantes cosechas de semilla.

ENRAIZADO DE ESTACAS

El material normalmente utilizado como estaca es una parte de tejido que puede ser del tallo, de la raíz o de un brote o rebrote con crecimiento terminal o lateral, con una longitud variable de 5 hasta 30 cm, el cual puede o no tener hojas dependiendo de las características de la especie con que se trabaje, pero sí debe observarse la presencia de yemas vegetativas. Las estacas una vez cosechadas y listas para enraizar son tratadas con algún fungicida para evitar la contaminación de hongos patógenos; en algunos casos se les aplican reguladores de crecimiento vegetal, y son cultivadas bajo condiciones semicontroladas de inverna-

dero con temperatura, sombra y humedad específicas para propiciar la regeneración de raíces, hojas y tallos en las estacas (Ruter, 2008).

El uso de estacas para el cultivo de especies permite que todas las características genéticas observadas en la planta utilizada se conserven en los clones producidos, logrando así un importante avance en las características seleccionadas de crecimiento, como mayor volumen en la producción de madera, abundante producción de semilla, mejor rectitud del fuste y buena tolerancia a factores bióticos y abióticos adversos (Zobel y Talbert, 1988). A través de esta técnica de propagación es posible una alta producción de rametos a partir de una sola planta (orteto), evitándose problemas de poco éxito en la unión entre tejidos derivados de la “púa” (brote de una rama del árbol que se quiere reproducir) y el “patrón” (planta utilizada para injertar la púa). Cuando se realizan injertos en especies forestales se evitan los altos costos requeridos para el cultivo *in vitro* en laboratorios de alta tecnología. Además, el cuidado y el mantenimiento de los rametos obtenidos por estacas son mucho más fáciles, prácticos y económicos que los obtenidos por injertos y cultivo *in vitro* (Gutiérrez *et al.*, 1994).

Comúnmente, el enraizado de estacas es utilizado para la producción de especies de fácil enraizamiento, como *Populus*, *Platanus*, *Salix* y *Eucalyptus*. Sin embargo, la propagación en especies de coníferas por medio de estacas puede ser difícil por la edad o el estado de madurez de la planta a propagar, ya que la capacidad de enraizamiento tiende a disminuir con el aumento de la edad (Mitchell *et al.*, 2004). La edad es el principal factor limitante y representa un problema serio para la multiplicación vegetativa cuando las plantas (ortetos) alcanzan su fase de desarrollo adulto (Fishel *et al.*, 2003). Una alternativa es podar las plantas para “reducir” su desarrollo fisiológico y de esta manera convertirlos en setos para obtener una producción y una cosecha constante de estacas con características juveniles (Hamann, 1998; Anderson *et al.*, 1999).

A continuación se presenta un estudio de caso centrado en una investigación sobre la propagación vegetativa por estacas de *Pinus jaliscana* Pérez de la Rosa, el cual es un pino endémico que se encuentra entre los 19° y 20° de latitud Norte en las áreas montañosas tropicales y subtropicales del oeste de Jalisco, México. La especie se encuentra creciendo en las poblaciones de El Tuito, La Bulera, Las Tarimas, Las Milpillas, Los Lobos, La Concha, El Sauz, Las Trojes y Monte Grande entre los 800 y los 1 650 msnm. De la especie se conoce muy poco sobre su ecología, las propiedades de su madera y las necesidades de conservación para zonas tropicales y subtropicales (Dvorak *et al.*, 1998). Actualmente es

una especie catalogada en peligro de extinción por la legislación mexicana en la NOM-059-SEMARNAT-2010. Sus poblaciones son muy reducidas y se han identificado factores que repercuten negativamente en su conservación, como la deforestación, la fragmentación de bosques, así como la pérdida de conectividad e integridad de los mismos (Paredes-Lara y Mendoza-Briceño, 2018).

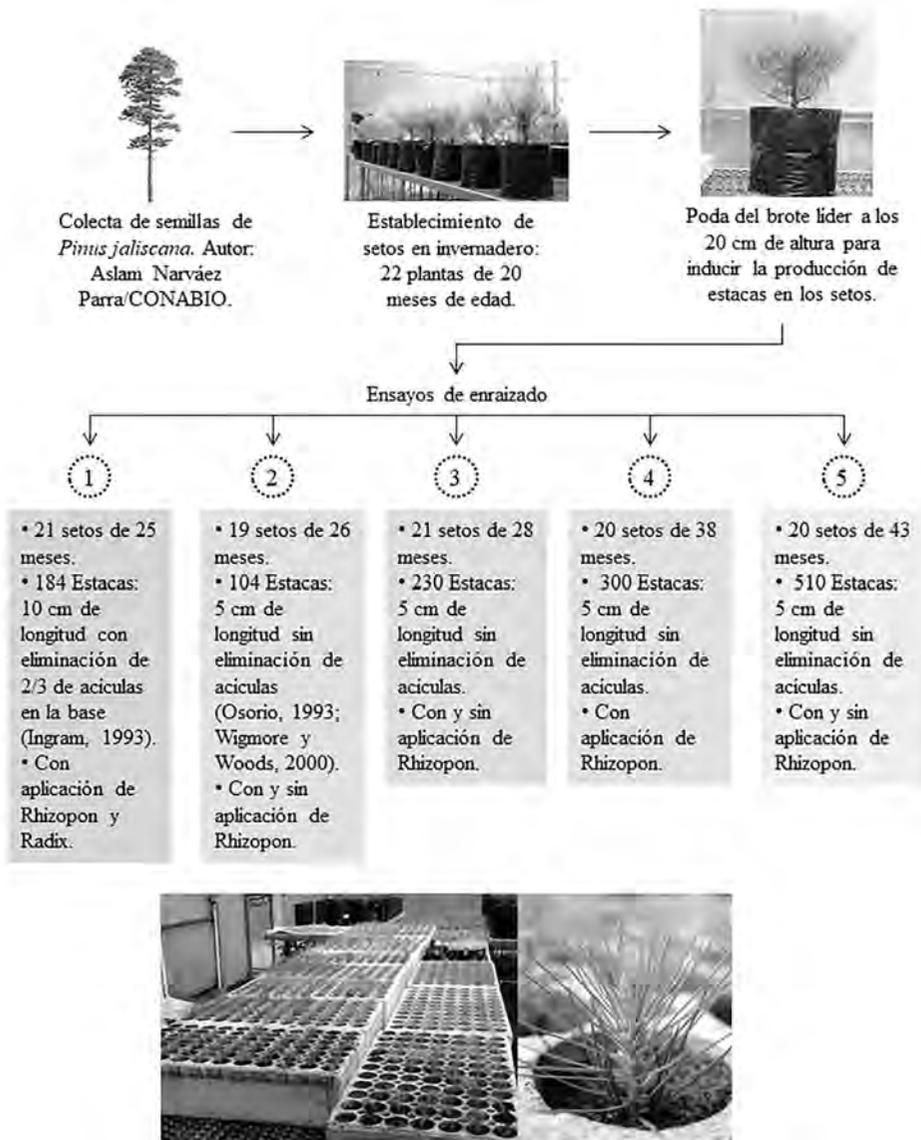


FIGURA 1. Enraizamiento con estacas de *Pinus jaliscana* en invernadero.

CAPACIDAD DE ENRAIZADO EN *PINUS JALISCANA*

Como se mencionó anteriormente, el enraizado de especies forestales puede realizarse con diversos fines. En este sentido, es de gran relevancia aplicar esta técnica de propagación en especies cuyas poblaciones naturales se encuentran bajo una fuerte presión por diferentes actividades humanas (extracción de madera, cambio de uso de suelo), pues se ha considerado útil el empleo de individuos logrados *ex situ* en acciones de restauración, restablecimiento o reintroducción de especies (Acosta-Ramos *et al.*, 2010).

La capacidad de propagación vegetativa en esta especie fue puesta a prueba mediante una serie de ensayos (figura 1) que consistieron en la aplicación de reguladores de crecimiento para promover el enraizamiento: Radix 10 000 (ácido indol-3-butírico al 1%) y Rhizopon AA #3 (ácido indol-3-butírico al 0.8%) en estacas provenientes de setos con diferentes edades obtenidos de semillas colectadas en cinco poblaciones del estado de Jalisco, México: El Sauz, Las Trojes, La Concha, Los Lobos y Monte Grande (Aparicio-Rentería, 2007).

A partir de esta serie de experimentos, los mejores resultados de enraizado se obtuvieron en la segunda y la tercera prueba (tabla 1) cuando se utilizaron estacas de 5 cm de longitud sin eliminar parte de sus hojas (acículas), y cuando los setos tenían una edad de 2 años y 2 meses a 2 años 4 meses (figura 2).

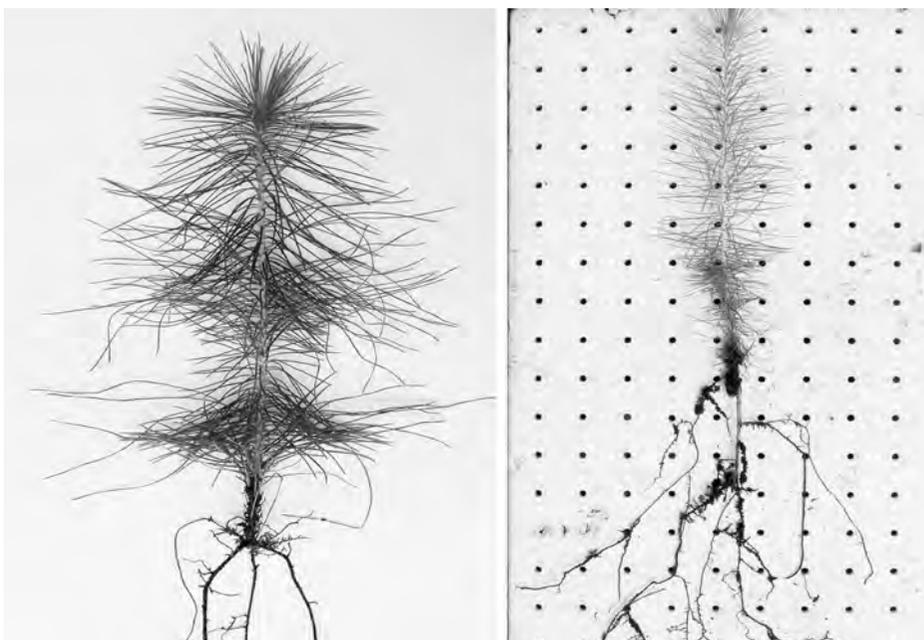


FIGURA 2. Estacas enraizadas de *Pinus jaliscana*.

En ambos ensayos, independientemente de los reguladores de crecimiento, se obtuvieron porcentajes muy similares de enraizamiento, por lo que se hace evidente que a esta edad de los setos no es necesario el uso de reguladores de crecimiento.

Los bajos resultados de enraizamiento obtenidos en la primera prueba fueron debidos al tamaño de las estacas con la eliminación de dos tercios de sus acículas al ras del tallo, así como a una producción de brotes delgados y curvos en los setos como respuesta a la primera poda. Al eliminar gran parte de sus acículas se redujo la actividad fotosintética de las estacas y disminuyó la producción de carbohidratos, lo que provocó los bajos resultados de enraizado (Leakey, 2004).

Respecto a la propagación asexual con el uso de estacas, el aumento de la edad del material parental (setos) reduce la capacidad de enraizamiento (Girouard, 1973; Mitchell *et al.*, 2004). Esta tendencia se observó en las pruebas 4 y 5, en las cuales se obtuvieron porcentajes bajos de enraizado (37.5% a 41%) cuando los setos tenían una edad mayor a los tres años (tabla 1).

TABLA 1. Enraizado en estacas de *Pinus jaliscana* bajo diferentes tratamientos.

<i>Prueba</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Estacas (número)</i>	<i>Promedio de enraizado (%)</i>
1	Rhizopon	92	20
	Radix	92	11
2	Rhizopon	52	93
	Sin enraizador	52	95.6
3	Rhizopon	115	92
	Sin enraizador	115	88
4	Rhizopon	150	37.5
5	Rhizopon	255	39
	Sin enraizador	255	41

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El cultivo de setos sanos y vigorosos obtenidos mediante podas frecuentes a una altura constante de 20 cm, con la aplicación de fungicidas y fertilizantes, optimiza la producción de estacas con características juveniles.

Los resultados de este estudio de caso brindan una gran oportunidad para la producción masiva de *Pinus jaliscana*, por una parte para aprovechar el gran potencial que tiene esta especie para uso comercial, y por la otra, para implementar alternativas de conservación, restauración y mitigación por la extracción masiva y el cambio de uso de suelo a los que han estado sometidas las poblaciones de esta importante especie forestal maderable.

Bibliografía

- Acosta-Ramos, Z. *et al.* (2010). Propagación exitosa de 15 especies vegetales cubanas endémicas y amenazadas en el Jardín Botánico de Pinar del Río, *Ecovida*. 2(2): 13-18.
- Anderson, A. B. *et al.* (1999). Shoot production and rooting ability of cuttings from juvenile greenhouse loblolly pine hedges, Transactions of the Illinois State Academy of Science. *State Academy of Science*. 92(1-2): 1-14.
- Aparicio-Rentería, A. (2007). Multiplicación de *Pinus jaliscana* Pérez de la Rosa por enraizamiento de estacas. Tesis de doctorado en Recursos Genéticos Forestales. Xalapa: Instituto de Genética Forestal-UV, pp. 86.
- Barbat, T. (2006). La multiplicación de las plantas, *Extra*. 2: 33-43.
- Dvorak, W. S. *et al.* (1998). The ecology and conservation of *Pinus jaliscana*, *Forest Genetic Resources*. 26: 13-19.
- Fishel, D. W. *et al.* (2003). Positional influence on rooting of shoots forced from the main bole of swamp white oak and northern red oak, *Canadian Journal of Forest Research*. 33(4): 705-711.
- Girouard, R. M. (1973). Propagation of Spruce by stem cuttings, *New Zealand Forest Journal of Science*. 4: 40-149.
- Gutiérrez, C. B. *et al.* (1994). Propagación vegetativa y silvicultura clonal en eucalipto, *Ciencia e Investigación Forestal*. 8(1): 139-175.
- Hamann, A. (1998). Adventitious root formation in cuttings of loblolly pine (*Pinus taeda* L.): developmental sequence and effects of maturation, *Trees Structure and Function*. 12: 175-180.
- Hartmann, H. T. *et al.* (2002). *Plant propagation, principles and practices*. 7a ed. Nueva Jersey: Prentice-Hall, Upper Saddle River, pp. 880. ISBN 0-13679235-9.
- Henrique, A. *et al.* (2006). Effect of plant growth regulators in the rooting of *Pinus* cuttings. *Brazilian Archives of Biology and Technology, Brazilian Archives of Biology and Technology*. 49(2): 189-196.

- Higashi, E. N. *et al.* (2000). Propagação vegetativa de *Eucalyptus*: princípios básicos e a sua evolução no Brasil. Brasil: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. *Circular Técnica* 192, p. 11.
- Ingram, D. L. (1993). Landscape plant propagation workbook: Unit II. Propagation by cuttings. Florida: Florida Cooperative Extension Service. University of Florida. *Circular* 724, p. 5.
- Leakey, R. R. B. (2004). Physiology of vegetative reproduction. En J. Burley *et al.* (eds.). *Encyclopedia of forest sciences*. Londres: Academic Press, pp. 1655-1668. ISBN: 978-0-12-145160-8.
- Mitchell, R. G. *et al.* (2004). A review on the effects of donor maturation on rooting and field performance of conifer cuttings, *Southern African Forestry Journal*. 201: 53-63.
- Osorio, L. F. (1993). Propagación y comportamiento en el campo de estacas enraizadas de *Pinus oocarpa*, *Pinus maximinoi* y *Pinus tecunumanii*. Informe de Investigación núm. 150. Cali: Smurfit Carton de Colombia, p. 6.
- Paredes-Lara, M. D. R., M. A. Mendoza-Briseño. (2018). Efecto de la silvicultura comercial sobre *Pinus jaliscana*, especie considerada en riesgo de extinción, *Madera y Bosques*. 24(2): 1-10.
- Ruter, J. M. (2008). Cloning plants by rooting stem cuttings. En A. Beyl, N. Trigano (eds), *Plant propagation concepts and laboratory exercises*. Chapter 17, Nueva York: CRC Press, pp. 177-188. ISBN 13: 978-1-4200-6508-4.
- Silva, A. A. (1985). Propagação vegetativa em *Pinus* spp., *Silvicultura*. 2: 141.
- Wigmore, B. G., J. H. Woods. (2000). *Cultural procedures for propagation of rooted cuttings of Sitka Spruce, Western Hemlock, and Douglas-fir in British Columbia*. Victoria, B.C.: Res. Br., B. C. Min. For., p. 46.
- Zobel, B., J. Talbert. (1988). *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales*. México: Ed. Limusa, p. 545. ISBN 0-471-09682-2.

ALGUNAS APLICACIONES DE LA METODOLOGÍA ESTADÍSTICA EN LA INVESTIGACIÓN FORESTAL

*Cecilia Cruz López
y Virginia Rebolledo Camacho*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad todas las disciplinas científicas reconocen la utilidad de los métodos estadísticos en la investigación, por ejemplo, las ciencias forestales. Por tal motivo, los investigadores en esta área reconocen la importancia de tener una cultura estadística amplia que vaya más allá de la simple recolección y el análisis de datos. Al respecto, Chávez *et al.* (2017) destacan que “las herramientas estadísticas les permiten diseñar viveros forestales, validar planes de forestación, el mejoramiento genético de árboles, evaluar tierras forestales y elaborar programas de conservación de flora y fauna minimizando los impactos sobre los ecosistemas forestales”. Por ello, en este artículo se presentan algunas consideraciones sobre la conceptualización de la metodología estadística, haciendo énfasis en las nuevas tendencias de los métodos estadísticos aplicados a las ciencias forestales.

LA METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

Conceptualización

La trascendencia y el reconocimiento de la estadística como una potente herramienta de investigación están en entender, primero, qué es la metodología estadística. Para conceptualizarla, Cruz y Ojeda (2016) indican que lo primero que se debe comprender es que implica la aplicación de una serie de principios, técnicas y procedimientos en tres fases: la primera trata de la recolección de datos que por lo general se realiza solo en un subconjunto de la población que se desea estudiar, ya que por cuestiones logísticas o económicas no es posible tomar datos en todo el colectivo de estudio, así que es necesario tomar solo una parte y estudiarlo; a ese subconjunto se le denomina muestra. Por esta razón, es importante que el investigador conozca los distintos métodos con los que se pueden reunir los datos; estos procedimientos son conocidos como técnicas de muestreo y se planifican a través de un diseño basado en las preguntas de investigación que se desean contestar, de manera que conocerlos puede resultar bastante útil para obtener los datos de una manera eficiente y al menor costo (Scheaffer *et al.*, 2007). Dentro de las ciencias forestales existen métodos de muestreo diferentes y específicos que se aplican en el estudio de los bosques, por ejemplo, muestreo forestal, muestreo de residuos leñosos, medición a escala genética, medición al nivel de especies, medición al nivel de comunidades, entre otros (Schreuder *et al.*, 2006; Moreno, 2001).

La segunda fase es el análisis de los datos. Es la más importante dentro de la metodología estadística y a la que se le pone mayor énfasis. Ojeda y Velasco (2010) establecen que con el análisis de datos se debe extraer la mayor información que presentan y que, a su vez, se logren responder las preguntas planteadas al inicio de la investigación.

La tercera fase de la metodología estadística tiene que ver con los principios y procedimientos para organizar, presentar e interpretar los resultados de los análisis elaborados en la fase dos. El reto en esta etapa es poder elaborar un reporte que presente la información obtenida con los datos recolectados y que, además, responda a las preguntas de investigación planteadas al inicio del estudio (Cruz, 2018).

Estas tres fases son las que integran la conceptualización de la metodología estadística, y deben ser identificadas por aquellos profesionales que se quieren dedicar a la investigación, dentro del proceso mismo de la generación de conocimiento (figura 1).

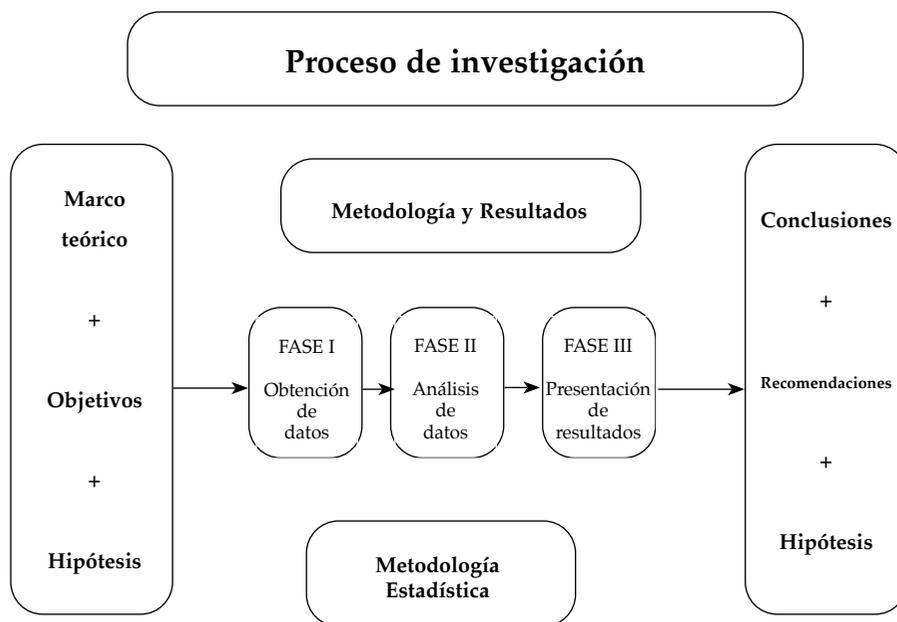


FIGURA 1. Participación de la metodología estadística en el proceso de investigación.

NUEVAS TENDENCIAS DE LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Conforme ha avanzado el conocimiento científico ha evolucionado la estadística en el mundo, por lo que es importante notar el valor que con el paso del tiempo ha cobrado esta disciplina. Para su uso, el mayor interés en sus inicios fue del Estado, pues los gobiernos la utilizaban para llevar a cabo los censos de población y obtener otras estadísticas importantes (Hernández, 2005). Posteriormente fue incorporada a la academia, a la industria, a la economía en general y en todo lo que tiene que ver con el desarrollo social y económico de los países. En la actualidad se le reconoce como una ciencia separada de la matemática, incluso se ha dejado de ver como una rama de esta y poco a poco ha ido adquiriendo un rol autónomo preponderante, al grado de que algunos han calificado a la que se denomina ahora como la era de la información y el conocimiento como la era de la estadística, porque diariamente hay una generación masiva de datos con los cuales se necesita construir conocimiento (Cruz, 2018). Sin embargo, con los métodos estadísticos convencionales no es posible, debido a que hoy en día se dispone de diferentes tipos de datos, no solo los numéricos, sino también imágenes, textos, videos, entre otros, que tienen formatos desiguales, por lo que se necesita la ciencia de datos para poder analizarlos (Riquelme *et al.*, 2006).

Una definición de ciencia de datos indica que “es un campo interdisciplinar que se encarga de la extracción del conocimiento de los datos” (Serrano *et al.*, 2017). La estadística también se encarga de extraer conocimiento de los datos, pero el término que llama la atención en esta definición es el de campo interdisciplinar, que se incluye porque la ciencia de datos está conformada por diversas disciplinas que se apoyan entre sí para poder extraer conocimiento de datos masivos; estas ciencias son las computacionales, las matemáticas, la estadística y el conocimiento del área. Por conocimiento de área se entenderá a todas las ciencias, por ejemplo, la biología, la economía, la química, la sociología, la psicología, la física, etc. La colaboración interdisciplinar, entre las diferentes ciencias, es un pilar importante en la construcción de conocimiento y requiere de una interacción directa entre ellas (figura 2).

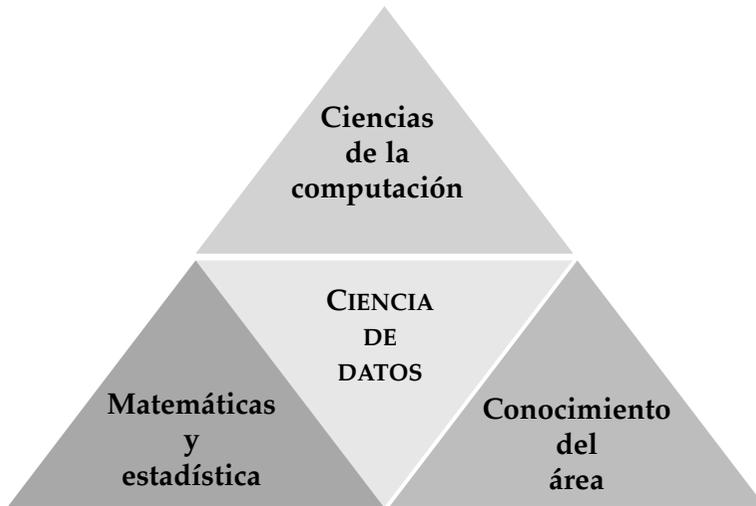


FIGURA 2. Ciencia de datos y las disciplinas que la conforman.

Antes de mencionar cuáles son los requerimientos que se necesitan dominar si se desea incursionar en el mundo de la ciencia de datos, se presentan algunas definiciones importantes.

Definición 1. Minería de datos

La minería de datos es un procedimiento que permite descubrir patrones o tendencias al examinar un conjunto masivo de datos (Pérez y Santín, 2007).

Muchos métodos estadísticos son usados dentro de la minería de datos para poder manipular grandes cantidades de ellos; los principales son: técnicas de asociación, de predicción y de clasificación, como en los casos de los árboles de decisión y las redes neuronales o algoritmos genéticos (García *et al.*, 2018). Por ejemplo, mediante el uso de redes neuronales se pueden detectar a tiempo incendios forestales y así mitigar rápidamente el daño ambiental que puedan causar (Angayarkkani y Radhakrishnan, 2010). Para ello, se utilizan datos provenientes de imágenes de incendios para poder entrenar la red con el fin de que detecte su presencia, de tal manera que un sistema inteligente ayudará a mantener en vigilancia a los bosques y tomar acciones necesarias en caso de detectar algún incendio.

Existe una cantidad mayor de aplicaciones de la minería de datos en la disciplina forestal, pero solo se menciona un ejemplo para ilustrar sus aplicaciones y el potencial de uso en este ámbito

Definición 2. *Big data*

Soluciones computacionales que permiten manipular grandes cantidades de datos para implementar modelos predictivos (Gualtieri *et al.*, 2013).

Big data cumple con tres características que son llamadas las tres v: volumen, velocidad y variedad. Volumen porque segundo a segundo se están generando grandes cantidades de datos. Velocidad porque se pueden tener datos en tiempo real y con ellos obtener información instantánea, incluso más rápido de lo que puede ser registrada. Variedad porque los datos no se almacenan como se hace comúnmente en una base de datos de Excel con filas y columnas, sino que son mensajes de texto, fechas de compras, imágenes satelitales, sensores, señales de GPS, entre otros. A este tipo de datos que se generan segundo a segundo se les llama semiestructurados o no estructurados, y son de difícil manejo debido a que su naturaleza no proviene de un entorno tradicional (datos recogidos con una encuesta), sino que la amplia variedad de fuentes de datos, como correos electrónicos, redes sociales, fotografías, etc., es lo que los hace de difícil manejo (McAfee, 2012; Hassan *et al.*, 2018).

Para incursionar en la ciencia de datos se necesita del dominio de la minería de datos y el *big data*. Por eso, en la actualidad no existe un ser humano llamado científico de datos (Ramos, 2016). Existen estadísticos,

ingenieros computacionales e investigadores de diferentes áreas, que trabajando de manera interdisciplinaria pueden llegar a solucionar problemas de ciencia de datos.

MÉTODOS ESTADÍSTICOS Y CIENCIA DE DATOS EN LA INVESTIGACIÓN FORESTAL

Los métodos estadísticos han sido usados en las ciencias forestales desde hace muchas décadas con el fin de que a través de ellos se puedan tomar decisiones asertivas que permitan tener una mayor eficiencia del uso y manejo, así como la conservación de los recursos forestales, con lo que se favorece el desarrollo de esta disciplina dentro del ámbito de la investigación (Chávez *et al.*, 2017).

Uno de los métodos estadísticos más utilizados para la investigación en la ciencia forestal es la modelación estadística. Por ejemplo, Alonso *et al.* (2004) crearon un modelo que simulaba el crecimiento de un bosque. Para ello se contaba con datos de los principales factores implicados en el crecimiento de los árboles, como son las condiciones climáticas y algunas propiedades del suelo y de la estructura de la cubierta arbórea.

Definición 3. Modelación estadística

Puede entenderse como una fórmula matemática con la que se pretende entender mejor un fenómeno en el que se postula una relación causa y efecto (Ojeda, 2004).

Los resultados mostraron que es importante la humedad proveniente del suelo, porque favorece la función que realizan diversos tipos de hojas (como mover el vapor de agua hacia la atmósfera), además de que promueve el balance de carbono del bosque. Otra aplicación fue realizada por Pompa-García *et al.* (2009) para mejorar la precisión en inventarios forestales de madera comercializable de *Pinus durangensis*, que es la especie de mayor distribución en el suroeste de Chihuahua. Para ajustar el modelo estadístico se contó con datos pertenecientes al diámetro con corteza a la altura del pecho, la altura relativa y algunas características, como la altura total del árbol y el diámetro normal con corteza. Con los resultados se mostró que el modelo es efectivo para predecir el diámetro a cualquier altura del tronco.

Además de la modelación estadística, existen otros métodos estadísticos que se aplican para la solución de problemas forestales, por

ejemplo, la técnica multivariante de componentes principales, que sirve para la construcción de índices y para reducir la dimensionalidad de los datos, es decir, eliminar variables que no aportan información al fenómeno estudiado y seleccionar aquellas variables que brindan información importante. Por ejemplo, Pérez-Verdín (2006) utilizó los componentes principales para identificar índices con variables sociales y económicas en los municipios del estado de Durango, que tuviesen una relación con la situación de recursos forestales maderables (reducción de volumen de corta anual, conservación de especies o favorecer servicios ambientales). Llegó a la conclusión de que los municipios que dependen de los recursos forestales maderables se encuentran más rezagados económicamente en comparación con aquellos que no dependen de ellos. Sin embargo, las ciencias forestales también están empleando la ciencia de datos en sus investigaciones recientes. En la actualidad existen mayor demanda y diversidad en los objetivos de investigación de estas ciencias, que irán incrementándose para lograr una productividad forestal más efectiva acorde a las necesidades mundiales dentro del marco del manejo de recursos naturales y de la sustentabilidad. Este requerimiento demanda información de mayor calidad y con una gran cantidad de datos provenientes de distintas fuentes, que no se pueden analizar con las técnicas estadísticas tradicionales, sino que se requiere hacer uso del *big data*, primero, para poder procesarlos y almacenarlos y después de la minería de datos para poder analizarlos efectivamente y poder tomar decisiones óptimas (Vega-García, 2017). Un ejemplo de aplicación de estas técnicas de *big data* y minería de datos fue realizado por Moclan (2016) para estimar el impacto ambiental de la deforestación en países tropicales. Utilizó datos provenientes del análisis de imágenes satelitales en Perú y Tailandia, con las cuales se construyeron distintos algoritmos que muestran una adecuada funcionalidad para analizar la deforestación y la regeneración de las masas forestales.

CONCLUSIÓN

Los métodos estadísticos son una potente herramienta para la investigación forestal. Para poder utilizarlos adecuadamente el investigador debe tener una cultura estadística mínima que le permita abordar el problema de manera adecuada e ir evolucionando hacia las nuevas tendencias de análisis de datos. No se busca que sean expertos en la utilización de estos, basta con que tengan de manera clara cuál es la con-

ceptualización de la metodología estadística y apoyarse en estadísticos y científicos computacionales para que su trabajo interdisciplinario les permita incursionar en el mundo de la ciencia de datos.

Bibliografía

- Alonso, C. A. *et al.* (2004). gotilwa+: un modelo de crecimiento forestal basado en procesos ecofisiológicos, *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 8: 21-28.
- Angayarkkani, K., N. Radhakrishnan. (2010). An intelligent system for effective forest fire detection using spatial data, *International Journal of Computer Science and Information Security*. 7(1): 202-208.
- Chávez, D. *et al.* (2017). La contribución de la Estadística en la formación del profesional agropecuario, agroindustrial y forestal. REDVET. *Revista Electrónica de Veterinaria*. 18(5): 1-9. Consultado el 25/08/2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=636/63651419001>
- Cruz, C. (2018). Diagnóstico de la educación estadística universitaria en México. Un enfoque hacia la innovación en cursos introductorios. Tesis de doctorado. Xalapa: Instituto de Investigación Educativa-UV.
- Cruz, C., M. M. Ojeda. (2016). Uso de las metas de aprendizaje en los cursos introductorios de estadística en la Universidad Veracruzana, *Revista Heurística*. 18: 1-13.
- Formica, J. V., W. Regelson (1995). Review of the Biology of quercetin and related bioflavonoids, *Food and chemical toxicology*. 33(12): 1061-1080.
- García, J. *et al.* (2018). *Ciencia de datos. Técnicas analíticas y aprendizaje estadístico*. Bogotá: Publicaciones Altaria, S.L., pp. 462. ISBN 978-84-947319-6-9.
- Gualtieri, M. *et al.* (2013). *The Forrester Wave™: Big Data Predictive Analytics Solutions, Q1 2013*, Forrester research. Cambridge.
- Hassan, F. *et al.* (2018). *Anonimización de datos no estructurados a través del reconocimiento de entidades nominadas*. Actas de la XV Reunión Española sobre Criptología y Seguridad de la Información-RECSI, pp. 102-106.
- Hernández, S. (2005). Historia de la estadística, *La Ciencia y el Hombre*. 18. Consultado el 20/08/2020. Disponible en <https://www.uv.mx/ciencia-hombre/revistae/vol18num2/articulos/historia>
- McAfee, A. E. Brynjolfsson. (2012). Big data: the management revolution, *Harvard bussiness review*. 90: 60-68.
- Moclán, C. (2016). Teledetección espacial: de los métodos clásicos al "Big Data". Tesis doctoral. Universidad de Valladolid.
- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad*. Zaragoza, España: M&T-Manuales y Tesis SEA, pp. 86. ISBN: 84-922495-2-8.

- Ojeda, M. M. (2004). La modelación estadística. Foro de matemáticas del sureste. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Ojeda, M. M., F. Velasco. (2010). Aplicaciones de la estadística en el área biomédica. En J. F. García, C. N. Bouza (eds.), *Investigación aplicada a la salud. Una mirada desde la Investigación de Operaciones*. México: Ultradigital Press. ISBN: 968-5518-27-0.
- Pérez, C., D. Santfín. (2007). *Minería de datos. Técnicas y herramientas*. Madrid: Paraninfo, pp. 793. ISBN. 978-84-9732-492-2.
- Pérez-Verdín, G. (2006). Los recursos forestales maderables y el desarrollo social y económico en el estado de Durango, *Madera y Bosques*. 12(1): 3-15.
- Pompa-García, M. et al. (2009). Modelación del volumen fustal de *Pinus durangensis* en Guachochi, Chihuahua, México. *Madera y bosques*. 15(1): 61-73.
- Ramos, F. (2016). El científico de datos es un unicornio [artículo en un blog]. Comunidad IEBS. Consultado el 24/08/2020. Disponible en <https://comunidad.iebschool.com/beoneoff/2016/11/21/8/>
- Riquelme, J. C. et al. (2006). Minería de datos: conceptos y tendencias, *Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 10(29): 11-18.
- Scheaffer, R. L. et al. (2007). *Elementos de muestreo*. 7a ed., Madrid: Paraninfo, pp. 455. ISBN: 0-534-41805-8.
- Schreuder, H. T. et al. (2006). *Técnicas estadísticas para muestreo y monitoreo de recursos naturales*. Chapingo: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Serrano, E. et al. (2017). Aprendizaje experiencial en ciencia de datos: satisfacción de los estudiantes para tres modelos de enseñanza y aprendizaje. En Congreso Internacional sobre aprendizaje, innovación y competitividad, pp. 69-73. Consultado el 25/08/2020. Disponible en http://oa.upm.es/50298/1/inve_mem_2017_272824.pdf
- Vega-García, C., R. García. (2017). Big data y ordenación de montes: ¿Qué ha cambiado en realidad?, *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 43: 31-40.
- Wall, M. E. (1993). Camptothecin and taxol. En Daniel Lednicer (ed.) *Chronicles of Dug Discovery*. Volume 3. Washington: American Chemical Society, pp. 327-348.

METABOLITOS SECUNDARIOS: UN FASCINANTE VIAJE A TRAVÉS DEL LENGUAJE QUÍMICO DE LAS PLANTAS Y SUS APLICACIONES

Olivia Márquez-Fernández

INTRODUCCIÓN

Las plantas son organismos muy complejos y fascinantes que habitan nuestro planeta, captan la energía solar produciendo alimento y oxígeno para las demás formas de vida, además de que fabrican una enorme diversidad de sustancias, muchas de ellas útiles en el tratamiento de afecciones y dolencias humanas. Muchos de estos compuestos funcionan en el reino vegetal como un sistema de mensajería entre su misma especie y con otros seres vivos, interactuando estrechamente de diversas formas; esta comunicación química ha sido utilizada a lo largo de la historia de la humanidad para nuestro beneficio.

El conjunto de reacciones bioquímicas, fundamentales para la sobrevivencia de todos los tipos de células, se denomina metabolismo primario, además, las plantas, bacterias y hongos fabrican sustancias llamadas metabolitos secundarios (Goodsell, 2009). En el siglo XIX se

acuñó este término para algunos compuestos de las plantas que no tenían un papel esencial en sus procesos de crecimiento, desarrollo o reproducción (Bennett y Wallsgrove, 1994).

Con el mejoramiento en los métodos de resolución molecular, genética molecular y cultivo *in vitro* se reconoció que los metabolitos secundarios participan en la comunicación, la respuesta al estrés y la adaptación de las plantas, entre otras funciones (Hadacek, 2002). Asimismo, la respuesta defensiva del reino vegetal está mediada por metabolitos secundarios con un extenso repertorio en armamento molecular, no comparable con algún otro tipo de organismo, por lo que se le considera único (Kutchan, 2001).

APLICACIONES MEDICINALES

El uso de las plantas como alivio de muchas enfermedades se documenta desde el inicio de las primeras civilizaciones humanas, aprovechando sus propiedades analgésicas, antioxidantes, antineoplásicas, antimicrobianas, nematocidas, hipotensoras e hipoglucémicas, por mencionar algunas, y es sin duda el principal motivo para el estudio de los productos naturales. Algunos ejemplos documentados son el uso de *Cannabis indica* (hashish) en China alrededor del 190 a.C., para el alivio del dolor e inflamaciones (Wall, 1993). La belladona (*Atropa belladonna*) fue utilizada en el antiguo Egipto (siglo V a.C.) para inducir el sueño, en Grecia como afrodisíaco y en las ofrendas romanas a Atenea, diosa de la guerra, para inhibir el miedo en los soldados; en Siria se usó para “alejar los pensamientos tristes”, y en tierras celtas, así como en las centroeuropeas, para honrar a la diosa de la guerra (Croteau *et al.*, 2000). Alrededor del año 60 d.C. Dioscórides menciona el uso de la mandrágora (*Mandragora* sp.), recomendada por Plinio como anestésico en la práctica médica (Croteau *et al.*, 2000). Como otras plantas, la belladona y la mandrágora fueron prohibidas en el medioevo debido a su relación con los practicantes de alquimia, como Paracelso y las mujeres curanderas o “brujas”; ambas especies de plantas contienen el alcaloide hiosciamina, usado hoy en día como broncodilatador para mejorar la circulación y como analgésico, aunque en dosis mayores es psicoactiva y alucinógena (Wink, 1998). Hipócrates de Grecia describió los efectos analgésico, antiinflamatorio y antipirético del sauce blanco (siglo V a.C.) cuyo principio activo es la salicina (Wink, 1998); actualmente se utilizan los derivados de la salicina, como el ácido acetilsalicílico, comercializado por la Compañía Bayer con el nombre de Aspirina (Waizel-Bucay,

2010). Algunos pueblos de Europa antigua, como los celtas (siglo V a.C.), veneraban el árbol del tejo (*Taxus* spp., *baccata* o *brevifolia*) utilizándolo en sus rituales; en la península Ibérica (cántabros y astures) y en la Galia lo utilizaban como veneno cuando eran capturados por sus enemigos (Wall, 1993). Dicho árbol, además de toxinas, contiene también paclitaxol en su corteza, con propiedad antineoplásica que hoy en día constituye la quimioterapia de primera elección contra el cáncer de ovario (Wani *et al.*, 1971; Wink, 1998).

MÚLTIPLES FORMAS QUÍMICAS EN TRES RUTAS

A pesar de la gran diversidad de los metabolitos secundarios, estos se pueden agrupar, por su síntesis y estructura, en tres grandes grupos: terpenos, compuestos nitrogenados y fenoles.

Los terpenos son moléculas de naturaleza lipídica, por tanto, insolubles en agua. Es el tipo de compuestos más generalizado en las plantas y la gran mayoría tiene una actividad biológica interesante. Se conocen poco más de 45 000 moléculas diferentes de terpenos; aquí se engloban los aceites esenciales útiles, como aromas y fragancias, pineno, limoneno y mentol, moléculas muy pequeñas (10 y 15 carbonos), siendo abundantes en las coníferas y en las familias Lamiacea, Apiacea, Mirtacea, Rutacea y Asteracea (Domínguez, 1988). También se les han encontrado propiedades antiulcerosas, antimicrobianas y anticancerígenas, o insecticidas como los piretroides (Pichersky y Gang, 2000). Los diterpenos (sustancias de 20 carbonos) obtenidos de plantas leñosas, los glicósidos cardíacos y saponinas (30 carbonos) presentan actividades biológicas potentes sobre insectos y mamíferos. El árbol del hule (*Hevea brasiliensis*) secreta en su exudado un látex gomoso que es un polímero de 15 000 unidades de carbonos de tipo terpenoide (Ormeño y Fernández, 2012).

Los compuestos con al menos un átomo de nitrógeno son estructuralmente diversos y la mayoría se derivan de los aminoácidos, incluyendo los alcaloides, los glicósidos cianogénicos, los glucosinolatos y algunos aminoácidos no proteicos, la mayoría con potente acción sobre otras especies incluyendo la humana. Se tienen registros muy antiguos (cinco milenios) del uso de plantas involucradas en pociones, venenos y narcóticos, como la “sarpagandha” o raíz de serpentaria (*Rauwolfia serpentina*), utilizada en la India desde 1000 a.C. contra afecciones de la piel, mordeduras de serpientes y picaduras de insectos, siendo su principal propiedad sedante e hipotensora por el contenido del alcaloide reser-

pina (Wink, 1998). Otro registro histórico es la ejecución del filósofo Sócrates (en 399 a.C.) con extracto de cicuta (*Conium maculatum*), que contiene altas concentraciones del alcaloide tóxico coniina. En Egipto, la reina Cleopatra (70 a.C.) pudo haber utilizado extractos de beleño (*Hyoscyamus* sp.), cuyo principio activo es el alcaloide atropina, para dilatar sus pupilas y parecer más atractiva a sus rivales políticos masculinos (Wink, 1998). Los efectos sedantes y analgésicos de la goma de opio o amapola (*Papaver somniferum*) se conocen desde 1400 a.C. siendo hasta 1806 cuando se identificó a la morfina, componente principal del exudado de esta planta (Croteau *et al.*, 2000); desde entonces se han aislado más de 12 000 alcaloides, la mayoría con fuertes efectos sobre el sistema nervioso central y con otras aplicaciones farmacológicas (Domínguez, 1988).

Recientemente los investigadores se han preguntado por qué una planta invierte energía y nitrógeno para sintetizar tal cantidad de alcaloides, y las evidencias sugieren un papel ecológico para muchos de estos compuestos (figura 1, Kutchan, 2001; Firn y Jones, 2003).

Los compuestos fenólicos y derivados son moléculas aromáticas solubles en disolventes de tipo hidrocarburo, y algunos unidos a azúcares son hidrosolubles, incluyendo a los ácidos cinámicos, cumarinas, xantonas, antroquinonas, flavonoides y taninos (Harborne, 1989). Muchos de estos metabolitos dan color a frutos y flores y tienen aplicaciones farma-



FIGURA 1. *Catharanthus rosea* o "vinca-pervinca". Las plantas del género *Catharanthus* (Vinca, familia Apocynaceae) son medicinales y producen alrededor de 150 alcaloides con propiedades anticancerígenas, antihipertensivas y antidiabéticas (Hisiger y Jolicoeur, 2007).



FIGURA 2. Un insecto Hymenoptera: Vespidae sobre una especie de planta Asteracea, familia rica en flavonoides coloridos.

cológicas, como antioxidantes, vasodilatadores, antiinflamatorios, anti-coagulantes, antihipertensivos, bacteriostáticos e insecticidas (Formica y Regelson, 1995). Este grupo de compuestos también funciona como defensa contra herbívoros y patógenos, atrayentes de polinizadores y dispersores de frutos, protección contra la radiación solar o para combatir a otras especies (figura 2, Weston y Mathesius, 2013).

¿POR QUÉ LAS PLANTAS?

De una manera más acentuada, el reino vegetal experimenta competencia y depredación de sus vecinos, por lo que para defenderse de los

animales el proceso evolutivo provocó el desarrollo de mecanismos de defensa que pueden ser mecánicos (como las espinas) y, de manera sigilosa, la producción de metabolitos secundarios. No obstante, estas sustancias naturales también son los medios de comunicación de las plantas con los demás seres vivos en su hábitat (Bouwmeester, 2003).

Los compuestos químicos con función de mensajeros se denominan semioquímicos (Dicke y Sabelis, 1988) y, pueden ser: 1) feromonas, que median interacciones entre organismos de la misma especie; 2) alomonas, que actúan entre especies distintas; 3) kairomonas, favorables para el organismo receptor; y 4) sinomonas, que inducen una respuesta fisiológica favorable para ambos organismos. Es importante resaltar que dependiendo del contexto un mismo compuesto químico puede funcionar de varias formas; por otro lado, la función de estas sustancias en la comunicación depende de propiedades fisicoquímicas de las moléculas, como la solubilidad, la volatilidad y el tiempo de vida. Varios estudios muestran que la comunicación química es un atributo fundamental para comprender el significado biológico de la vida (Dicke y Sabelis, 1988).

ÚTILES COMO DEFENSAS

Los metabolitos secundarios colaboran en la sobrevivencia de las plantas como individuos y como especie, y el lenguaje químico es el vínculo entre organismos a varios niveles tróficos y en el equilibrio en los ecosistemas. Existen numerosos ejemplos que lo ilustran, como el del escarabajo descortezador (*Ips paraconfusus*), cuyos machos producen ipsenol e ipsdienol para atraer a las hembras, a partir de un monoterpeno de *Pinus ponderosa* (Byers, 1981). Las orugas de la polilla tigre (*Arctia caja*) destinadas a ser hembras consumen y almacenan suficientes alcaloides vegetales para fabricar feromonas atrayentes de los machos usados en su etapa adulta (Blackburn, 2003). El daño causado por insectos a las plantas estimula la síntesis y la liberación de compuestos volátiles que sirven como atrayentes para depredadores de los herbívoros atacantes (Pare y Tumlinson, 1999). Como ya se mencionó, los compuestos coloridos de las flores (flavonoides, antocianinas y carotenos) tienen la función ecológica de atraer polinizadores, mejorando la fertilización y la dispersión de las semillas, lo que asegura la persistencia de la planta en un hábitat o su incursión en nuevos territorios (Mol *et al.*, 1998; Pichersky y Gang, 2000). Otros ejemplos son algunos compuestos del género *Brassica*, como la coliflor, el brócoli, las coles de Bruselas, la col y el nabo, que repelen ciertos

tipos de gusanos y nematodos (Stoewsand, 1995). Varios aminoácidos no proteicos de plantas tienen función de defensa, depositándose en el suelo circundante para desplazar a las plantas vecinas. Otros funcionan como insecticidas, como el caso de la canavanina, de la *Canavalia ensiformis*, y de especies como la alfalfa, la soya, el garbanzo, la lenteja y el frijol común, que muestran toxicidad a algunos herbívoros, nematodos y gusanos (Harborne *et al.*, 2003).

USO DE SEMIOQUÍMICOS EN PRÁCTICAS AGROFORESTALES

Los compuestos alelopáticos pueden tener efectos de inhibición o estimulación de la germinación y el crecimiento de especies de plantas vecinas; dichos metabolitos pueden ser liberados de las plantas al ambiente por exudación de las raíces, lixiviación, volatilización o descomposición de los residuos de las plantas en el suelo (Pieterse *et al.*, 2009; Narwal y Haouala, 2013). El estudio de las interacciones químicas entre las especies de un ecosistema agrícola o forestal puede ayudar a la producción de alimentos y servicios sustentables, ya que la mayoría de los metabolitos tienen la ventaja de actuar a concentraciones bajas, tener menor toxicidad a los ecosistemas y ser biodegradables. Un ejemplo de alelopatía es la planta cepillo de botella (*Callistemon citrinus*), que fabrica un compuesto que provoca blanqueamiento de las hojas por daño a las clorofilas, y fue el modelo para la obtención del herbicida Callisto® de Syngenta (Cornes, 2005).



FIGURA 3. Izquierda: *Tithonia* sp. (“gigantón” o “falso girasol”). Derecha: *Tagetes* sp. (“cempasúchil” o “cempaxóchitl”) son plantas de la familia Asteracea, que pueden atraer insectos y herbívoros polinizadores y repelen algunos tipos de plagas nocivas.

Las sustancias alelopáticas presentes en especies cultivadas pueden reducir la necesidad de utilizar plaguicidas sintéticos para combatir malezas y otras plagas (bacterias, hongos, nematodos e insectos). Entre las especies cultivadas que presentan estas características se pueden citar a las Brassicaceas, las Poaceas (sorgo, avena, cebada, arroz o maíz), las especies de las familias Labiatae como la albahaca, la salvia, el romero y la menta, además de las asteráceas como gigantón (*Tithonia* sp.), y cempasúchil (*Tagetes* sp.; figura 3). De igual forma, muchas especies no comestibles o arvenses, como el Neem (*Azadirachta indica*), pueden producir metabolitos secundarios útiles en el control de diferentes plagas (Farooq *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La historia evolutiva de las plantas, organismos benéficos y sus atacantes ha sido una carrera armamentista que dotó al reino vegetal de un sistema de señales de comunicación y defensa sofisticado que, de manera similar al sistema inmune de los animales, reconoce patógenos y responde activando mecanismos específicos dirigidos contra el atacante. La humanidad se ha beneficiado de estas moléculas para el alivio de muchos padecimientos; sin embargo, los avances en comunicación química han proporcionado nuevas y emocionantes ideas sobre su papel como mensajeros, su significado y su utilidad a nivel ecológico; dicho conocimiento nos puede ser útil para el control de plagas en sistemas de cultivo sustentables, así como para disminuir la alteración al frágil equilibrio de los hábitats.

Bibliografía

- Bennett, R. N., R. M. Wallsgrove. (1994). Secondary metabolites in plant defense mechanisms, *New Phytologist*. 127(4): 617-633.
- Blackburn, L. (2003). Making pheromones from poisons, *The Journal of Experimental Biology*. 6 Vol. 206(11): 1770.
- Bouwmeester, H. J. *et al.* (2003). Secondary metabolite signalling in host-parasitic plant interactions, *Current opinion in plant biology*. 6(4): 358-364.
- Byers, J. A. (1981). Pheromone biosynthesis in the bark beetle, *Ips paraconfusus*, during feeding or exposure to vapours of host plant precursors, *Insect Biochemistry*. 11(5): 563-569.
- Cornes, D. (2005). Callisto: a very successful maize herbicide inspired by allelochemistry. *Proceedings of the Fourth World Congress on Allelopathy*. 2(7): 2636.

- Croteau, R. *et al.* (2000). Natural products (secondary metabolites), *Biochemistry and molecular biology of plants*. 24: 1250-1319.
- Dicke, M., M. W. Sabelis. (1988). Infochemical terminology: based on cost-benefit analysis rather than origin of compounds?, *Functional ecology*. 2(2): 131-139.
- Domínguez, X. A. (1988). *Métodos de investigación fitoquímica*. México: Limusa, pp. 281.
- Farooq, M. *et al.* (2011). The role of allelopathy in agricultural pest management, *Pest management science*. 67(5): 493-506.
- Goodsell, D. S. (2009). *The machinery of life*. Second edition. Nueva York: Copernicus Books, Springer Science & Business Media, p. 167. ISBN 978-0-387-84925-6.
- Hadacek, F. (2002). Secondary metabolites as plant traits: current assessment and future perspectives, *Critical Reviews in Plant Sciences*. 21(4): 273-322.
- Harborne, J. B. (1989). *Methods in plant biochemistry*. Plant phenolics. Londres: Academic Press Ltd., pp. 552. ISBN: 0124610110.
- Harborne, J. B. *et al.* (2003). Toxic and Pharmacological Effects at the Organ Level. En *Alkaloids Toxicity*. Consultado el 15/5/2020. Disponible en <https://www.uni-heidelberg.de/institute/fak14/ipmb/phazb/pubwink/2003/17.2003.pdf>
- Hisiger, S., M. Jolicoeur (2007). Analysis of *Catharanthus roseus* alkaloids by hplc, *Phytochemistry Reviews*. 6(2-3): 207-234.
- Firn, R. D., C. G. Jones. (2003). Natural products-a simple model to explain chemical diversity, *Natural product reports*. 20(4): 382-391.
- Kutchan, T. M. (2001). Ecological arsenal and developmental dispatcher. The paradigm of secondary metabolism, *Plant Physiology*. 125(1): 58-60.
- Lednicer, D. (ed.). (1993). *Chronicles of Drug Discovery*. Washington: American Chemical Society. 3: 327-348.
- Mol, J. *et al.* (1998). How genes paint flowers and seeds, *Trends in Plant Science*. 3(6): 212-217.
- Narwal, S. S., R. Haouala. 2013. *Role of allelopathy in weed management for sustainable agriculture*, Allelopathy. Berlin, Heidelberg: Springer Scientific Publishers, pp. 217-249. ISBN 978-3-642-30594-8.
- Ormeño, E., C. Fernández. (2012). Los terpenos de las plantas, *Investigación y Ciencia*. 428(1): 62-69.
- Pare, P. W, J. H. Tumlinson. (1999). Plant volatiles as a defense against insect herbivores, *Plant Physiology*. 121(2): 325-331.
- Pichersky, E., D. R. Gang. (2000). Genetics and biochemistry of secondary metabolites in plants: an evolutionary perspective, *Trends in plant science*. 5(10): 439-445.

- Pieterse, C. M. *et al.* (2009). Networking by small-molecule hormones in plant immunity, *Nature chemical biology*. 5(5): 308-316.
- Stoewsand, G. S. (1995). Bioactive organosulfur phytochemicals in *Brassica oleracea* vegetables-a review, *Food and chemical toxicology*. 33(6): 537-543.
- Waizel-Bucay, J. (2010). Plantas y compuestos importantes para la medicina: los sauces, los salicilatos y la aspirina. Los salicilatos y la aspirina. (*Salix* spp., aspirin), *Revista de Fitoterapia*. 10(2): 133-145.
- Wani, M. C. *et al.* (1971). Plant antitumor agents. vi. Isolation and structure of taxol, a novel antileukemic and antitumor agent from *Taxus brevifolia*, *Journal of the American Chemical Society*. 93(9): 2325-2327.
- Weston, L. A., U. Mathesius. (2013). Flavonoids: their structure, biosynthesis and role in the rhizosphere, including allelopathy, *Journal of chemical ecology*. 39(2): 283-297.
- Wink, M. (1998). A short history of alkaloids. En M. F. Roberts, M. Wink. (eds.), *Alkaloids*. Boston: Springer, pp. 11-44. ISBN: 978-1-4419-3263-1.

AMBIENTES
ANTROPIZADOS:
LAS CIUDADES
Y LA NATURALEZA

ZONAS METROPOLITANAS DE MÉXICO Y LA IMPORTANCIA DE SUS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS

*Beatriz Bolívar-Cimé, Fernando Zavaleta-Hernández
y Rafael Flores-Peredo*

En México, 71% del territorio está formado por bosques, selvas y matorrales; 49% de esta vegetación es primaria (no modificada por actividades humanas o fenómenos naturales recientes) y 22% restante corresponde a vegetación secundaria (proveniente de la regeneración natural o de la restauración de la vegetación transformada) (INEGI, 2014). Sin embargo, en el territorio mexicano también se han observado otros cambios que influyen en la conservación de su vegetación. Por ejemplo, entre 1980 y 2000 se dio un acelerado crecimiento urbano y de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda de 2010, 77.3% de la población del país se encontraba en áreas urbanas (Garza, 2010).

Este crecimiento urbano ejerce una fuerte presión sobre la vegetación natural (primaria o secundaria) que se encuentra en su periferia, ya sea para permanecer o convertirse en parte de la mancha urbana; sin embargo, este efecto es menor que el planteado por la agricultura y la ganadería (Cuevas *et al.*, 2010). La presión no solo se aplica regional-

mente, sino que va más allá de sus límites políticos debido a la gran demanda de recursos (alimento, agua, materias primas) que las zonas metropolitanas ejercen (Challenger *et al.*, 2009). Por ello, en este capítulo abordamos el papel de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) en las zonas metropolitanas de México, como una estrategia para conservar la vegetación, así como los bienes y servicios que brindan a los habitantes de estos centros urbanos.

¿QUÉ TANTO SE TRASLAPAN LAS ZONAS METROPOLITANAS Y LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS?

Para empezar, tenemos que explicar qué son las zonas metropolitanas (ZM) en México. En 2015 se actualizaron los criterios que las definen, previamente establecidos en 2004 por la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol), el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y el Consejo Nacional de Población (Conapo) (Semarnat, 2019). Es así que se define a una zona metropolitana como el “conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica” (Sedatu-Conapo-INEGI, 2018).

Respecto de la evolución metropolitana en México, entre 1960 y 1990 el número de zonas metropolitanas se triplicó de 12 a 37 (figura 1), mientras que el porcentaje de la población que vivía en estas zonas aumentó de 25.6% a 38.8% (Negrete-Salas y Salazar-Sánchez, 1986; Sedesol-Conapo-INEGI, 2007). Casi 30 años después, en el periodo comprendido entre 1990 y 2018, el número de zonas metropolitanas y la población que residía en ellas prácticamente se duplicaron, pues de 37 ZM registradas en 1990, en 2018 se reportaron 74; en el mismo año, 74.2% de la población nacional habitaba en ZM (Sedesol-Conapo-INEGI, 2004, 2007, 2012; Sedatu-Conapo-INEGI, 2018; Conapo-Sedatu, 2019). Es importante señalar que a partir del año 2000 más de 50% de la población de México vivía en las 55 ZM del país (Sedesol-Conapo-INEGI, 2004). Aunque entre 2000 y 2010 se mantuvo sin grandes incrementos el número de ZM, así como el porcentaje de la población nacional que radicaba en ellas, en los últimos años (2010-2018) se registró de nuevo un crecimiento acelerado en ambos aspectos (Sedesol-Conapo-INEGI, 2012; Conapo-Sedatu, 2019).

Si bien el incremento de las zonas metropolitanas se relaciona con el desarrollo económico, ya que funcionan como centros de actividad económica y prestación de servicios a nivel regional (Sedesol-Conapo-INEGI, 2004), este crecimiento también se ha relacionado con algunos aspectos negativos, como pobreza urbana, segregación socioespacial y deterioro ambiental (Padilla-Galicia, 2016).

En las últimas décadas se ha reconocido la necesidad de mantener ciertos servicios ecosistémicos (véase siguiente sección) en las zonas metropolitanas para mantener su resiliencia ante eventos naturales o provocados por la acción humana inherente (Calderón-Contreras, 2016). En este sentido, la presencia de Áreas Naturales Protegidas (ANP) al interior o en contacto con las zonas metropolitanas ha ganado mucha relevancia en todo el mundo (Calderón-Contreras, 2016). De acuerdo con Lwasa y colaboradores (2014), son dos los aspectos fundamentales con los que contribuye la presencia de ANP en ZM: *a*) los servicios ecosistémicos que proporcionan, y *b*) su potencial para incrementar la seguridad alimentaria.

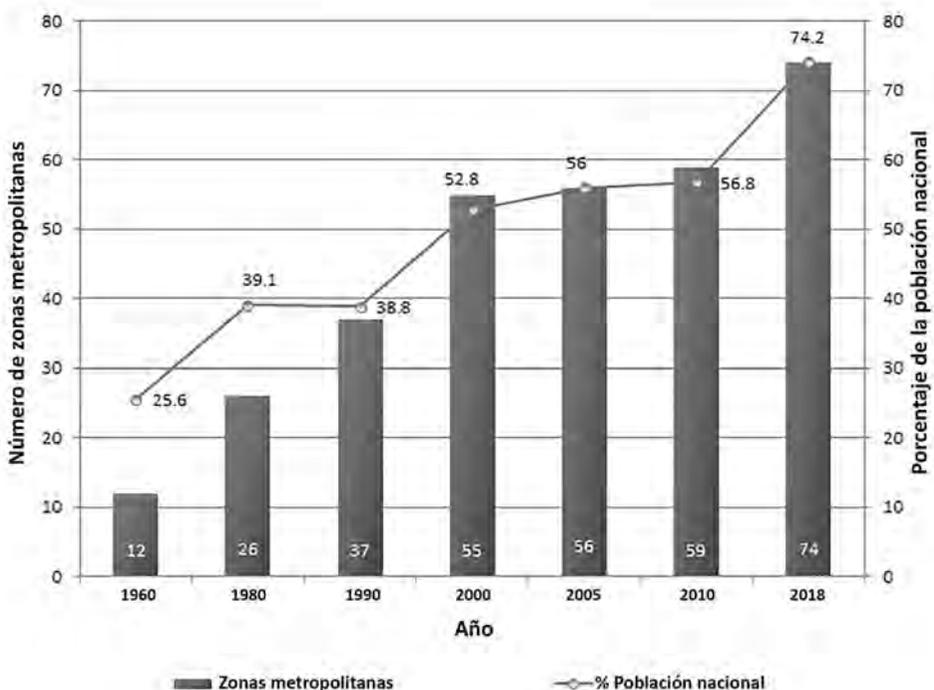


FIGURA 1. Evolución de las zonas metropolitanas mexicanas y su población en México en el periodo comprendido entre 1960-2018.

En México la protección de áreas naturales cercanas a los asentamientos humanos no es tan reciente como muchos creen. Se sabe que alrededor de 1428 Nezahualcóyotl ordenó que se cercara el Bosque de Chapultepec, por lo que a la llegada de los españoles tenía cerca de 75 años de funcionar como área protegida (De la Maza Elvira, 1999). Considerando la historia reciente del país, fue a finales del siglo XIX cuando se inició la historia de la administración de las Áreas Naturales Protegidas (González-Ocampo *et al.*, 2014). La primera ANP decretada en México fue la del Desierto de los Leones, en 1917, para proteger 14 manantiales y proveer de agua a la Ciudad de México (Vargas-Márquez, 1997). Durante el gobierno de Lázaro Cárdenas (1934-1940) se estableció el Sistema Nacional de Reservas Forestales y Parques Nacionales, creándose 36 reservas forestales y 39 parques nacionales (Castañeda-Rincón 2006; González-Ocampo *et al.*, 2014). Es importante mencionar que entre los criterios que se consideraban para la selección de áreas que funcionarían como parques nacionales, además de su atractivo paisajístico y su potencial recreativo, estaba su importancia ambiental para las ciudades próximas (Castañeda-Rincón, 2006). Si bien durante la gestión de Cárdenas se llevó a cabo una gran transformación de los ecosistemas del país para fomentar su producción a través de la Reforma Agraria, también fue en ese periodo cuando se decretó una gran parte de las ANP que conocemos hoy en día (Semarnat-Conanp, 2007).

Actualmente, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) administra 182 ANP federales organizadas bajo seis categorías (Tabla 1), distribuidas en nueve direcciones regionales (Conanp, 2020). La superficie del país que se encuentra protegida bajo este esquema corresponde al 11.14% (Conanp, 2020b). Hay que señalar que además de las ANP federales existen también otras modalidades, como las de administraciones estatales, municipales, comunitarias, ejidales y privadas (Conanp, 2020b).

Al sobreponer las 74 ZM con las ANP federales y estatales de México se puede observar que las ZM del país se traslapan con 94 ANP federales y 162 ANP estatales (figura 2, Conabio, 2020; Conanp 2020c). Hay que resaltar que existen 15 ZM que no entran directamente en contacto con alguna ANP federal o estatal. En cuanto a las 59 ZM restantes, en 13 de ellas las ANP representan menos de 1% de su superficie. Para 34 ZM las ANP cubren de 1% a 22% de su territorio. Existen 10 ZM donde las ANP representan entre 25% y 50% de su superficie, estas son: Puerto Vallarta (25.9%), Monterrey (26%), Tepic (28.3%), Chetumal (31.7%), Mérida (34.9%), Orizaba (42.6%), Tehuacán (42.9%), Toluca (43.8%), Cuernavaca

(46%) y Matamoros (49.4%). Finalmente, solo en dos zonas metropolitanas las ANP abarcan más de 50% de su extensión: Tianguistenco (58.3%) y Ensenada (66.3%).

TABLA 1. Número de Áreas Naturales Protegidas federales por tipo de categoría.

<i>Categoría</i>	<i>Número de ANP</i>
Parques Nacionales	67
Reservas de la Biósfera	44
Áreas de Protección de Flora y Fauna	40
Santuarios	18
Áreas de Protección de Recursos Naturales	8
Monumentos Naturales	5
Total	182

En cuanto a los tipos de vegetación que protegen estas ANP en las ZM, las mejor representadas son bosque de encino, selva caducifolia, matorral xerófilo, bosque de coníferas, bosque de pino, manglar, así como vegetación inducida (Conanp, 2020). Sin embargo, es escasa y dispersa la información sobre la condición en la que se encuentra esta vegetación, por lo que resulta necesario llevar a cabo estudios que no solo consideren la superficie que ocupan las ANP en las ZM, sino también su estado de conservación.

¿CUÁLES SON LOS BENEFICIOS DE MANTENER ANP EN LAS ZONAS METROPOLITANAS?

Como se mencionó en el apartado anterior, las ANP que entran en contacto con las ZM conservan en muchas ocasiones vegetación en su interior, por lo que pueden llegar a ser lugares atractivos para los habitantes de estas zonas urbanas como sitios de recreación, esparcimiento y ejercitación (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). De hecho, existen diversos estudios que han evaluado qué tanto son utilizadas las ANP por los habitantes de las ciudades, las actividades que realizan y la percepción que tienen sobre la presencia de espacios naturales en ambientes urbanos (Qureshi *et al.*, 2010). Gracias a ello sabemos que estos espacios tienen un impacto positivo en la salud, tanto física como mental, de los ciudadanos, además ayudan a promover lazos sociales, por ejemplo, en grupos de turistas, scouts, avistadores de aves, practicantes de deportes al aire libre, entre otros (Kuo *et al.*, 1998; Breuste *et al.*, 2013).

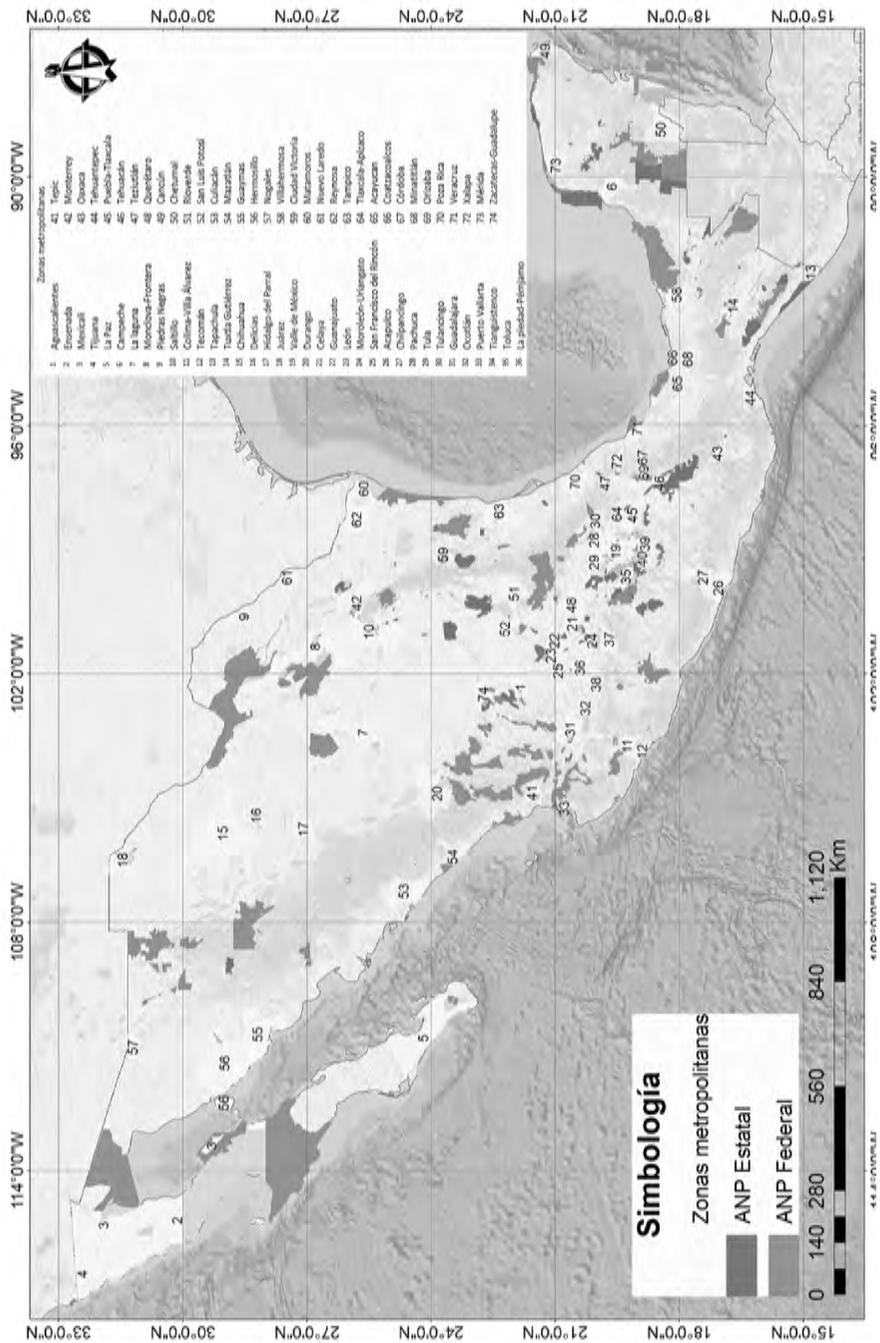


FIGURA 2. Zonas metropolitanas de México delimitadas para el 2018 y ANP federales y estatales decretadas al 2020.

Además de los servicios socioculturales, las ANP pueden proveer a las ZM de otro tipo de servicios ecosistémicos (todos los beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad) (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Por ejemplo, pueden funcionar como áreas para la obtención de alimento, agua y para conservar la fauna y flora local (servicio de abastecimiento). También, la vegetación que conservan se relaciona con funciones como la regulación térmica o microclimática, la filtración y el suministro de aire y agua, la reducción de ruido (servicio de regulación), y de forma integral pueden apoyar a mantener los flujos de materia y energía que permiten el ciclo de nutrientes y fotosíntesis, entre otros (servicio de apoyo) (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Breuste *et al.*, 2013).

Se ha resaltado la importancia que tienen las ANP en ZM como espacios para la conservación de la biodiversidad, ya que esta se ha relacionado con la capacidad del ecosistema de proveer bienes y servicios o de resistir perturbaciones (Tilman *et al.*, 2014). Por lo anterior, la planeación y la administración de ANP presentes en zonas urbanas no deben involucrar únicamente a las autoridades ambientales sino, también, a las encargadas de la planeación y el desarrollo urbano.

CONCLUSIONES

El crecimiento de la población en México ha traído consigo el desarrollo de grandes zonas metropolitanas, que en su proceso de expansión no solo ocupan áreas previamente modificadas por las actividades humanas, sino que también entran en contacto o terminan envolviendo ANP existentes. Por lo anterior, es importante que se lleve a cabo una adecuada planeación urbana que considere la conservación de las ANP en ZM por los beneficios que se han mencionado en esta investigación, pero también por otros aspectos relevantes que se abordan en “Áreas verdes urbanas en la investigación con fauna silvestre” y “Biomonitoreo: el caso de la interacción entre plantas y contaminación atmosféricas”.

Bibliografía

- Breuste, J. *et al.* (2013). Urban ecosystem services on the local level: urban green spaces as providers, *Ekologia (Bratislava)*. 32(3): 290-304.
- Calderón-Contreras, R. (2016). El rol de las Áreas Naturales Periurbanas para la Resiliencia al Cambio Climático de las Metrópolis: el Caso de la

- Ciudad de México, *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*. 25: 69-79. Consultado el 18/11/2020. Disponible en <https://redibec.org/ojs/index.php/revibec/article/download/138/42>
- Castañeda-Rincón, J. (2006). Las áreas naturales protegidas de México; de su origen precoz a su consolidación tardía. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 10. Consultado el 18/11/2020. Disponible en <https://revistes.ub.edu/index.php/ScriptaNova/article/view/1221>
- Challenger, A. *et al.* (2009). Factores de cambio y estado de la biodiversidad. En *Capital natural de México*. 2: (37-73), México: Conabio.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (2020). Portal de Geoinformación 2020. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Comisión Nacional de Áreas Protegidas (Conanp). (2020). Áreas Protegidas en México. Consultado el 01/12/2020. Disponible en <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/areasprot>
- Comisión Nacional de Áreas Protegidas (Conanp). (2020b). Áreas Naturales Protegidas Decretadas. Consultado el 23/11/2020. Disponible en http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/datos_ANP.htm
- Comisión Nacional de Áreas Protegidas (Conanp). (2020c). Información Espacial. Consultado el 23/11/2020. Disponible en http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm
- Consejo Nacional de Población-Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Conapo-Sedatu). (2019). *Sistema Urbanos Nacional 2018*. México.
- Cuevas, M. L. *et al.* (2010). Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. En Helena Cotler Ávalos (coord.). *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. México: Semarnat, INE y Fundación G. Río Arronte.
- De la Maza Elvira, R. (1999). Una historia de las áreas naturales protegidas en México, *Gaceta Ecológica*. 51: 15-68.
- Garza, G. (2010). La transformación urbana de México, 1970-2020. En G. Garza, M. Schteingart (coords.), *Los Grandes Problemas de México: Desarrollo Urbano y Regional*. México: El Colegio de México.
- González-Ocampo, H. A. *et al.* (2014). *Las áreas naturales protegidas de México, Investigación y Ciencia*. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes. 2(60): 7-15.
- INEGI. (2014). *Mapa de uso y suelo de la vegetación, Serie VI*.
- Kuo, F. E. *et al.* (1998). Transforming inner city landscapes: trees, sense of safety, and preferences, *Journal of Environment and Behavior*. 30(1): 28-59.

- Lwasa, S. *et al.* (2014). Urban and peri-urban agriculture and forestry: Transcending poverty alleviation to climate change mitigation y adaptation, *Urban Climate*. 7: 92-106.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington: Island Press.
- Negrete-Salas, M. A., H. Salazar-Sánchez (1986). Zonas metropolitanas en México, 1980, *Estudios Demográficos y Urbanos*. 1(1): 97-125.
- Padilla-Galicia, S. (2016). *Metrópolis México, Formación/consolidación*. México: UAM-Azcapotzalco.
- Qureshi, S. *et al.* (2010). Green space functionality along an urban gradient in Karachi, Pakistan: a socio-ecological study, *Human Ecology*. 38(2): 283-294.
- Sedatu-Conapo-INEGI. (2018). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015. Consultado el 18/11/2020. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/470657/Infograf_a_Delimitacion_zm.pdf
- Sedesol-Conapo-INEGI. (2004). Delimitación de las zonas metropolitanas de México, 2000. Consultado: 18/11/2020. Disponible en http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2000
- Sedesol-Conapo-INEGI. (2007). Delimitación de las zonas metropolitanas de México, 2005. Consultado el 18/11/2020. Disponible en http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2005
- Sedesol-Conapo-INEGI. (2012). Delimitación de las zonas metropolitanas de México, 2010. Consultado el 18/11/2020. Disponible en http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2010
- Semarnat. (2019). Dirección General de Estadística e Información Ambiental. Consultado el 18/11/2020. Disponible en http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/wfservlet?IBIF_ex=d1_r_siscds01_01&ibic_user=dgeia_mce&ibic_pass=dgeia_mce
- Semarnat-Conanp. (2007). *Programa nacional de áreas naturales protegidas 2007-2012*. México: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- Tilman, D. *et al.* (2014). Biodiversity and Ecosystem Functioning, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 45: 471-493.
- Vargas-Márquez, F. (1997). *Parques Nacionales de México: Aspectos físicos, sociales, legales, administrativos, recreativos, biológicos, culturales, situación actual y propuestas en torno a los parques nacionales de México*. México: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

ISLAS VERDES EN UN MAR DE CONCRETO: SU IMPORTANCIA EN LA CONSERVACIÓN, MANEJO E INVESTIGACIÓN DE FAUNA SILVESTRE

*Rafael Flores-Peredo,
María Fernanda Salazar-Chamorro,
Isac Mella-Méndez y Beatriz Bolívar-Cimé*

LA URBANIZACIÓN EN UN CONTEXTO GENERAL

La urbanización es un fenómeno global originado por el rápido crecimiento poblacional humano centralizado en diversas ciudades. En las últimas décadas la dinámica de este fenómeno se ha acelerado, ya que tan solo de 1900 a 1990 la población que vivía en ciudades se incrementó 37% y en 2014 aumentó a 54%, prediciendo que para 2050 esta cifra oscilará en 66% (UNDESA, 2014; Vargas-Hernández *et al.*, 2018). En particular, la región neotropical de Latinoamérica es considerada como la zona más urbanizada del mundo, ya que alrededor de 50 ciudades poseen cada una más de un millón de habitantes, y cuatro ciudades poseen de forma individual más de 10 millones (UNDESA, 2014).



FIGURA 1. Camellón, áreas verdes urbanas y área verde privada en municipios como Xalapa, Coatepec y Banderilla, Veracruz, México.

Desde un enfoque ecológico, la urbanización altera, reduce y fragmenta el paisaje y los espacios naturales, por lo que con frecuencia estas áreas se ven remplazadas por un nuevo ecosistema urbano dominado por áreas construidas, “áreas grises” (Kowarik, 2011; Beninde *et al.*, 2015). No obstante, dentro de este mar de concreto sobreviven a menudo algunas áreas verdes urbanas (AVU) compuestas no solo por parques urbanos, sino también por camellones arbolados en las calles y avenidas, en panteones, jardines privados y terrenos en desuso, entre otros (figura 1, Taylor y Hochuli, 2017). Estas “islas” son esenciales no solo por su belleza escénica, sino también por los servicios ecosistémicos que brindan, como la regulación del microclima, la captación de agua, la reducción del ruido y la captación de carbono, así como hábitats de especies silvestres nativas (Ambrey y Fleming, 2014).

Los beneficios que brindan las AVU han motivado que muchos gobiernos inviertan recursos extra en pro de su conservación y su ampliación, puesto que se han asociado como un factor que puede disminuir problemas de la población, tales como estrés, depresión, enfermedades cardíacas y respiratorias (figura 2, Kondo *et al.*, 2018).

Por lo tanto, algunos países como Australia y Estados Unidos se han esforzado para lograr que en promedio a cada habitante le correspondan 80 y 32 m² de AVU, respectivamente, mientras que en otras ciudades menos favorecidas, como Singapur y Hong Kong, únicamente les corres-



FIGURA 2. Actividades recreativas para disminuir el estrés realizadas en el lago del área verde urbana, Parque Natura en Xalapa, Veracruz, México.

ponden 7.5 y 3 m² a cada persona, respectivamente. Considerando que el Neotrópico es una región importante en biodiversidad, muchas ciudades latinoamericanas cuentan con grandes cantidades de AVU. Como ejemplo, Quito cuenta con 1500 m² de AVU por habitante, y Brasilia con 985 m² por habitante. En México, ciudades como Monterrey y Guadalajara cuentan con 749 y 423 m² por habitante, respectivamente (Siemens, 2010).

Uno de los principales retos que enfrentan las AVU, principalmente las de Latinoamérica, es el de la preservación de las especies de vida silvestre que habitan en ellas, ante un crecimiento urbano desmedido y sin una correcta planeación (Macgregor-Fors y Ortega-Álvarez, 2013). Además, también están expuestas a eventos que las pueden degradar, alterar y contaminar, siendo los más comunes la introducción de especies exóticas invasoras, el cambio de uso de suelo por infraestructura humana, la contaminación química, la falta de mantenimiento forestal y el nulo ordenamiento territorial (Sorensen *et al.*, 1998; PAOT, 2010). Derivado de lo expuesto anteriormente, surge la necesidad de impulsar investigaciones que documenten la riqueza biológica y los factores urbanos que pueden estar influyendo en la distribución y la afectación de las especies silvestres, permitiendo una mejor planeación de las ciudades.

LAS AVU COMO LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN

Debido a que las AVU están compuestas a menudo por un mosaico heterogéneo de elementos naturales, seminaturales y antropogénicos, se convierten en excelentes laboratorios naturales que brindan la oportunidad para evaluar ciertas dinámicas poblacionales y probar hipótesis acerca de cómo variables urbanas pueden afectar a los organismos de manera positiva o negativa, considerando que en las ciudades algunas

especies prosperan, mientras que otras pueden declinar o extinguirse (figura 3, Concepción *et al.*, 2015). Asimismo, las AVU pueden emular las condiciones de temperatura y concentración de CO₂ futuras, prediciendo la distribución y posible adaptación conductual y fisiológica de las especies a los diferentes escenarios. Por mencionar algunos ejemplos de lo anterior, algunos estudios en AVU se han enfocado en documentar la relación entre la riqueza de especies faunísticas, principalmente aves, con la heterogeneidad espacial (Seress y Liker, 2015), mientras que otros explican la relación de la riqueza y el ensamblaje de especies a través de un gradiente de urbanización (Amaya-Espinel *et al.*, 2019).

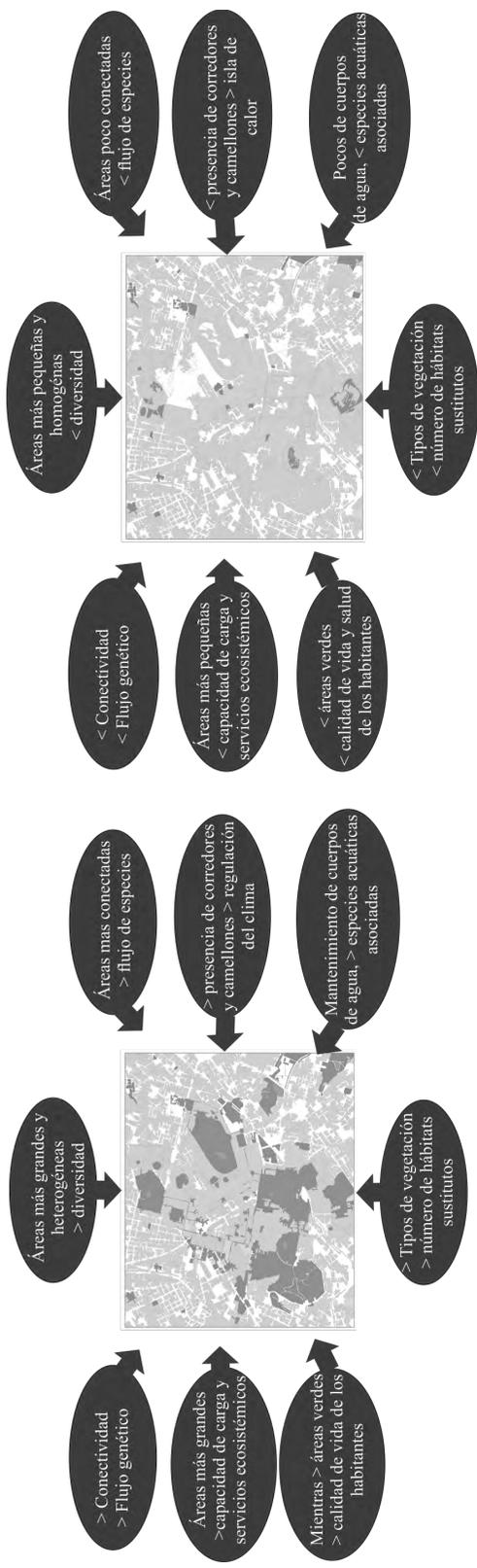
Por otro lado, también se ha valorado el efecto de la contaminación atmosférica sobre el crecimiento de especies vegetales (Fujiwara *et al.*, 2011), el efecto del ruido urbano sobre la forma de comunicación de aves y anfibios (Shannon *et al.*, 2015), la relación entre contaminación lumínica de las ciudades sobre los patrones de actividad de especies nocturnas como murciélagos (Schirmer *et al.*, 2019) y el impacto de especies domésticas, como perros y gatos, sobre especies silvestres nativas (Mella-Méndez *et al.*, 2019). En conjunto, estos estudios han permitido en muchos casos mejorar la planificación urbana y favorecer la permanencia de especies silvestres y sus nichos ecológicos.

Otro objetivo muy común de los estudios en AVU es identificar las características intrínsecas que modulan su biodiversidad y que permiten destacar la importancia del manejo y la conservación de estos sitios,



FIGURA 3. Trogón enligado (*Trogon caligatus*) avistado en el área verde urbana, Parque El Haya en la ciudad de Xalapa, Veracruz, México.

MANEJO INTEGRAL DE ÁREAS VERDES URBANAS



Modalidad Archipiélago

Modalidad Parches Aislados

**ONG'S; GOBIERNO; INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN E INVESTIGACIÓN;
SOCIEDAD CIVIL; INSTITUCIONES DE VIGILANCIA**

FIGURA 4. Tipos de modalidad comunes en el manejo de AVU y características diferenciativas de cada una de ellas para ser consideradas en el manejo integral.

siendo algunas de estas: *a*) el tamaño del área, *b*) la heterogeneidad del hábitat (tipos de vegetación, estructura y edad de la vegetación), y *c*) su distancia hacia otros fragmentos (Aranzana, 2015). Por consenso, existe mayor beneficio de un AVU de gran tamaño conectada que varias pequeñas aisladas, ya que las grandes pueden albergar todas las especies presentes en las pequeñas, más algunas con requerimientos específicos que solo se encuentran en las grandes; además, las grandes favorecen su desplazamiento (figura 4). De forma similar, áreas más heterogéneas pueden proporcionar una mayor gama de recursos como refugio y alimento, además de mayor cantidad de nichos que aquellas más homogéneas. Adicionalmente, el uso de plantas nativas para actividades de reforestación dentro de las AVU es muy recomendable para favorecer la fauna local (McKinney, 2002). En Canberra, Australia, por ejemplo, la riqueza de aves fue mayor en los suburbios con más arbolado nativo que en aquellos con menor cantidad de estos (Ikin *et al.*, 2013). Además, la edad del arbolado es un punto crucial, ya que los individuos adultos tienen más capacidad de brindar recursos como refugio y alimento a diversas especies animales y favorecer la complejidad del hábitat mediante la regeneración natural a través de sus semillas (Strohbach *et al.*, 2009). También los árboles adultos favorecen los corredores funcionales para el desplazamiento de individuos de tallas mediana y grande; además tienen mayor incidencia en la regulación de la temperatura y la humedad en las islas de calor urbanas (McKinney, 2006).

IMPORTANCIA DE LAS AVU PARA LA FAUNA SILVESTRE

La fauna silvestre que está presente en ambientes urbanos tiene que adaptarse a las condiciones antrópicas para su sobrevivencia, ya que a menudo la oferta de alimento y refugio en sitios seguros y sin depredadores es limitada. Ante esta situación, las AVU tienen la capacidad de actuar como hábitats importantes para la vida silvestre. Por ejemplo, funcionan como sitios de percha y anidación para aves migratorias y residentes, como refugio para insectos, corredores y sitios de forrajeo para mamíferos medianos y grandes, así como de hábitat para anfibios y reptiles que usan los cuerpos de agua en periodos reproductivos (figura 5, McKinney, 2002).

Aunque las AVU pueden servir como refugio de diversos organismos, generalmente las especies generalistas y oportunistas son las más beneficiadas, ya que pueden adaptarse con mayor facilidad a las con-

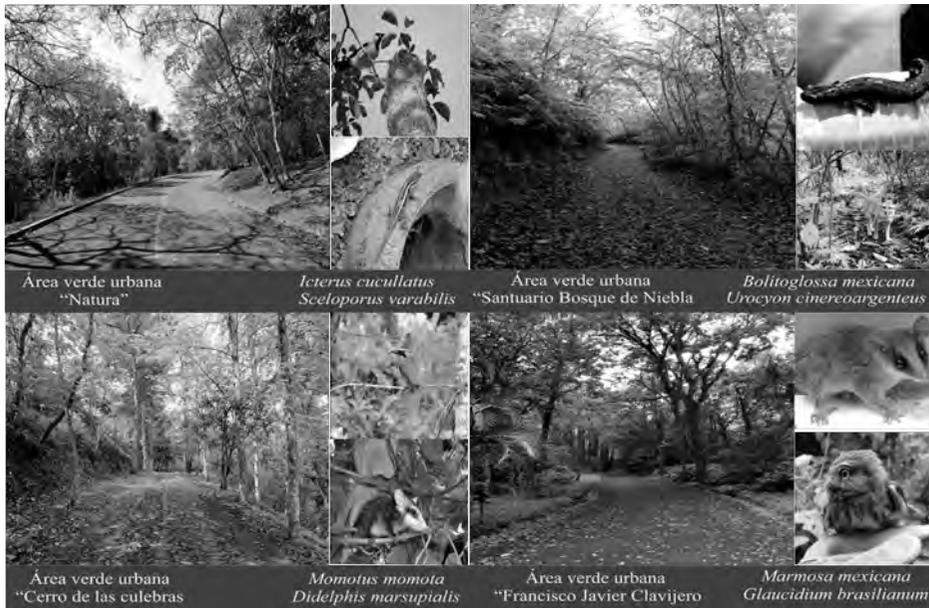


FIGURA 5. Biodiversidad presente en áreas verdes urbanas de la ciudad de Xalapa, Veracruz, México.

diciones antropizadas. En este sentido, las aves constituyen a menudo el grupo de vertebrados con mayor riqueza de especies en las AVU, ya que muchas son generalistas y tolerantes a la perturbación (Shochat *et al.*, 2010). Por ejemplo, las AVU de Buenos Aires, Argentina, resguardan 22% de la riqueza total de aves silvestres; lo mismo en parques urbanos de Venezuela, donde se llegan a registrar hasta 94 especies de aves (Faggi y Perepelizin, 2006; Caula *et al.*, 2010). En México se han documentado 105 especies en el parque estatal Lázaro Cárdenas, de Puebla, 124 especies en el parque ecológico de la Chontalpa, Tabasco y hasta 242 especies en el Parque Ecológico Macuiltépetl en Xalapa, Veracruz (Inzunza y Rodríguez, 2010; Sánchez-Soto, 2012; Flores-Rodríguez, 2014).

A pesar de que los invertebrados son muy abundantes en ambientes urbanos y tienen gran importancia en la polinización (abejas, mariposas) y en la dispersión de semillas (hormigas, escarabajos), su abundancia ha disminuido considerablemente en el mundo en los últimos años (Sánchez-Bayo y Wyckhuys, 2019). Una estrategia para enfrentar esta situación es la introducción de especies ornamentales dentro de las AVU o inclusive la construcción de techos verdes. Sin embargo, esto puede generar dos panoramas diferentes, como el que los insectos polinizadores nativos utilicen plantas no nativas para satisfacer sus

demandas energéticas o, por el contrario, que aumenten las plagas de insectos invasores a través de plantas de vivero, siendo más importante considerar a fondo las especies a utilizar (Jones y Leather, 2012). Para el caso de mamíferos silvestres, cada vez es más común observar especies de familias como la Cricetidae (ratas), Didelphidae (tlacuaches), Mustelidae (comadreas), Canidae (zorros y coyotes), Procyonidae (mapaches y cacomixtles) y Mephitidae (zorrillos) en las AVU, mismas que pueden alimentarse de roedores, insectos, aves, reptiles, frutos y semillas, así como de restos de comida en basureros, aves de granja y cultivos (Bateman y Fleming, 2012).

Tan solo en ciudades como Xalapa, en Veracruz, las áreas verdes urbanas y periurbanas llegan a resguardar hasta 27 especies de mamíferos silvestres, incluyendo especies raras de observar como el Tlacuazin *Marmosa mexicana* (González-Romero y López-González, 1993; Rosas-Ronzón, 2017). De igual forma, las AVU cuentan con fuentes de agua, como embalses, lagos o ríos, en los cuales se resguardan diversas especies de anfibios, así como tortugas dulceacuícolas (Gosa y Arias, 2009). Por ello, el estudio científico de fauna silvestre en las AVU es crucial para avanzar hacia una conciencia ecológica integral, misma que permita la protección y la valoración de las especies, ya que la planeación de las ciudades no se debe limitar al bienestar de la población humana, sino también al beneficio de animales silvestres asociados a ellas.

HACIA UN MANEJO INTEGRAL DE LAS AVU

El manejo integral de las AVU debe considerar la participación activa de diferentes agentes: *a*) instituciones de gobierno tanto municipales como estatales y federales; *b*) Organizaciones no Gubernamentales como grupos ecologistas, asociaciones de vecinos, silvicultores urbanos, deportistas, activistas en pro de la conservación de la naturaleza; *c*) sociedad civil; *d*) instituciones de educación e investigación; y *e*) instituciones de vigilancia (policía, protección civil, oficinas de parques y jardines). En conjunto, estos agentes deben pugnar por el establecimiento de líneas estratégicas clave cuyo objetivo sea el mejoramiento de la calidad de vida de las ciudades bajo una ética ambiental, enfocándose en la participación y la educación ambiental de los habitantes de zonas urbanas, la difusión de los servicios que ofrecen las áreas verdes públicas, la concientización de la importancia de los árboles nativos y/o vegetación en camellones, avenidas y calles, la difusión de los beneficios de los huertos urbanos, corredores y cinturones verdes

en la ciudad, el manejo de las cuencas hidrográficas para proveer agua limpia, el decreto de áreas verdes con gran riqueza de especies como áreas naturales protegidas o santuarios de vida silvestre, la difusión de la importancia del arbolado en la mitigación de islas de calor, la importancia de las fuentes de financiamiento público o privado para el desarrollo de las AVU, la visión de las AVU como laboratorios vivos y el intercambio de saberes.

Si bien casi todas las grandes ciudades de América Latina cuentan con programas de manejo de AVU, el intercambio de información en este campo debe ser considerado prioritario, ya que las experiencias de manejo de estas áreas en otras partes del mundo, así como la información acerca de qué funciona y qué no, pueden ayudar a los planificadores urbanos a evitar costosos experimentos y facilitar un buen uso de los escasos recursos económicos y técnicos destinados para estas áreas. En general, todas las ciudades comparten situaciones y problemas urbanos comunes donde las soluciones respectivas pueden ser similares. Por ello, el manejo y el desarrollo de AVU deben entenderse como partes integrales de un todo más amplio y complejo al verse involucrados diversos entornos: el social, el económico, el político, el biofísico, el natural, el espiritual y el cultural (Sorensen *et al.*, 1998). Sin duda, las AVU son sitios que permiten la generación de conocimiento, mismo que es un elemento clave en las estrategias de planeación y desarrollo de una ciudad o metrópoli.

Bibliografía

- Amaya-Espinel, J. D. *et al.* (2019). The influence of building density on Neotropical bird communities found in small urban parks, *Landscape and Urban Planning*. 190: 103578.
- Ambrey, C., C. Fleming. (2014). Public greenspace and life satisfaction in urban Australia, *Urban Studies*. 51(6): 1290-1321.
- Aranzana, F. de J. (2015). Gestión de zonas verdes urbanas y periurbanas para la conservación de la biodiversidad, *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 39: 313-322.
- Bateman, P. W., P. A. Fleming. (2012). Big city life: carnivores in urban environments, *Journal of Zoology*. 287(1): 1-23.
- Beninde, J. *et al.* (2015). Biodiversity in cities needs space: A meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation, *Ecology Letters*. 18: 581-592.

- Caula, S. A. *et al.* (2010). Aves urbanas: un estudio comparativo en dos parques tropicales con diferente grado de intervención humana (Valencia, Venezuela), *Faraute de Ciencias y Tecnología*. 5(2): 23-36.
- Colding, J. *et al.* (2003). *The Stockholm Urban Assessment (Sweden SU)*. Millenium Ecosystem Assessment. Sub-Global Summary Report. Estocolmo: Beijer Institute of Ecological Economics.
- Concepción, E. D. *et al.* (2015). Impacts of urbanization on biodiversity: The role of species mobility, degree of specialization and spatial scale, *Oikos*. 124: 1571-1582.
- Cornelis, J., M. Hermy. (2004). Biodiversity relationships in urban and suburban parks in Flanders, *Landscape and Urban Planning*. 69(4): 385-401.
- De Juana Aranzana, F. (2016). Gestión de zonas verdes urbanas y periurbanas para la conservación de la biodiversidad: el caso de Vitoria-Gasteiz, *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 39: 313-322.
- Economist Intelligence Unit. (2010). *Índice de ciudades verdes de América Latina*. Munich: Siemens Press.
- Faggi, A., V. Perepelizin. (2006). Riqueza de aves a lo largo de un gradiente de urbanización en la ciudad de Buenos Aires, *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales Nueva serie*. 8(2): 289-297.
- Flores-Rodríguez, J. F. J. (2014). El parque estatal General Lázaro Cárdenas del Río Flor del bosque desde el desarrollo sustentable "Análisis y Recomendaciones". Tesis de Maestría en Ordenamiento del Territorio. Facultad de Arquitectura-Universidad Autónoma de Puebla, México.
- Fujiwara, F. *et al.* (2011). Metals associated with airborne particulate matter in road dust and tree bark collected in a megacity (Buenos Aires, Argentina), *Ecological Indicators*. 11(2): 240-247.
- González-Romero, A., C. A. López-González. (1993). Reconocimiento preliminar de la mastofauna asociada a las zonas suburbanas de Xalapa y Coatepec. En I. R. López-Moreno (ed.), *Ecología urbana aplicada a la ciudad de Xalapa*. Xalapa: Instituto de Ecología-Programme on man and the biosphere (MAB UNESCO), pp. 223-243.
- Gordon, M., R. T. Forman. (1983). Landscape modification and changing ecological characteristics. En H. A. Money y M. Godron (eds.), *Disturbance and ecosystems*. Nueva York: Springer-Verlag, pp. 12-28.
- Gosa, A., A. Arias. (2009). Estado de las poblaciones de anfibios en un parque urbano de Pamplona, *Munibe Ciencias Naturales-Natur Zientziak*. 57: 169-183.
- Ikin, K. *et al.* (2013). The influence of native versus exotic streetscape vegetation on the spatial distribution of birds in suburbs and reserves, *Diversity and Distributions*. 19: 294-306.

- Inzunza, E. R., S. H. A. Rodríguez. (2010). La avifauna urbana del Parque Ecológico Macuiltépetl en Xalapa, Veracruz, México, *Ornitología Neotropical*. 21(1): 87-103.
- Jones, E. L., S. R. Leather. (2012). Invertebrates in urban areas: A review, *European Journal of Entomology*. 109(4): 463-478.
- Koeser, A. *et al.* (2013). Factors influencing long-term street tree survival in Milwaukee, WI, EUA, *Urban Forestry and Urban Greening*. 12(4): 562-568.
- Kondo, M. C. *et al.* (2018). Urban Green Space and Its Impact on Human Health, *International journal of environmental research and public health*. 15(3): 445.
- Kowarik, I. (2011). Novel urban ecosystems, biodiversity, and conservation, *Environmental Pollution*. 159(8-9): 1974-1983.
- MacGregor-Fors, I., R. Ortega-Álvarez. (2011). Fading from the forest: bird community shifts related to urban park site-specific and landscape traits, *Urban Forestry and Urban Greening*. 10(3): 239-246.
- MacGregor-Fors, I., R. Ortega-Álvarez (eds.). (2013). *Ecología urbana: experiencias en América Latina*. México: Inecol.
- Mckinney, M. L. (2002). Urbanization, Biodiversity, and Conservation, *BioScience*. 52(10): 883-890.
- Mckinney, M. L. (2006). Urbanization as a major cause of biotic homogenization, *Biological Conservation*. 127(3): 247-260.
- Mckinney, M. L. (2008). Effects of urbanization on species richness: A review of plants and animals, *Urban Ecosystems*. 11: 161-176.
- Mella-Méndez, I. *et al.* (2019). Effect of free-ranging dogs and cats on medium-sized wild mammal assemblages in urban protected areas of a Mexican city, *Wildlife Research*. 46(8): 669-678.
- Pautasso, M. (2007). Scale dependence of the correlation between human population presence and vertebrate and plant species richness, *Ecology Letters*. 10(1): 16-24.
- Procuraduría ambiental y de ordenamiento territorial (PAOT). (2010). *Presente y futuro de las áreas verdes y del arbolado de la ciudad de México*. México.
- Rosas-Ronzón, M. C. (2017). Preferencia de cebos y uso vertical de vegetación secundaria por *Marmosa mexicana* en un parque periurbano de Xalapa, Veracruz, México. Tesis de pregrado. México: Universidad Veracruzana, Xalapa.
- Sánchez-Bayo, F., K. A. G. Wyckhuys. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers, *Biological Conservation*. 232: 8-27.
- Sánchez-Soto, S. (2012). Lista actualizada de las aves del Parque Ecológico de la Chontalpa, Tabasco, México, *Huitzil*. 13(2): 173-180.
- Savard, J. P. *et al.* (2000). Biodiversity concepts and urban ecosystems, *Landscape and Urban Planning*. 48: 131-142.

- Schirmer, A. E. *et al.* (2019). Mapping behaviorally relevant light pollution levels to improve urban habitat planning, *Scientific Reports*. 9: 11925.
- Seress, G., A. Liker. (2015). Habitat urbanization and its effects on birds, *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*. 61(4): 373-408.
- Siemens. (2010). *Índice de ciudades verdes de América Latina*. Comunicaciones corporativas y asuntos gubernamentales. Munich.
- Shannon, G. *et al.* (2015). A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife, *Biological Reviews*. 91(4): 982-1005.
- Shochat, E. *et al.* (2010). Birds in urban ecosystems: population dynamics, community structure, Biodiversity, and conservation. En Aitkenhead-Peterson, A. Volder (eds.). *Urban Ecosystem Ecology*. Madison: ASA-CSSA-SSSA, pp. 75-86.
- Singh, V. S. *et al.* (2010). Urban forests and open green spaces: Lessons for Jaipur, Rajasthan, India. Consultado el 01/12/2020. Disponible en <http://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/handle/10535/5458>
- Sorensen, M. *et al.* (1998). *Manejo de las áreas verdes urbanas*. Documento de buenas prácticas. División de Medio Ambiente, Banco Interamericano de Desarrollo. Washington.
- Strohbach, M. *et al.* (2009). Birds and the city: urban biodiversity, land use, and socioeconomics, *Ecology and Society*. 14(2): 31.
- Taylor, L., D. F. Hochuli. (2017). Defining greenspace: Multiple uses across multiple disciplines, *Landscape and Urban Planning*. 158: 25-38.
- Tratalos, J. *et al.* (2007). Urban form, biodiversity potential and ecosystem services, *Landscape and Urban Planning*. 83(4): 308-317.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA). (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. Nueva York.
- Vargas-Hernández, J. G. *et al.* (2018). Urban Green Spaces as a Component of an Ecosystem. En: S. Dhim, J. Marques (ed.), *Handbook of Engaged Sustainability*. Springer: Springer books, ISBN: 978-3-319-71312-0, July.

BIOMONITOREO: INTERACCIÓN ENTRE PLANTAS Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Edison A. Díaz-Álvarez

LA CRISIS AMBIENTAL: CAUSAS Y CONSECUENCIAS

El acelerado crecimiento de la población mundial desde mediados del siglo pasado ha traído consigo el aumento en el consumo y, en consecuencia, el deterioro de los recursos naturales a una escala nunca antes vista. Ha sido de tal magnitud el impacto que la humanidad ha tenido sobre el planeta que se considera dar por terminado el Holoceno (periodo que inició después de la última edad de hielo) e iniciar un nuevo periodo geológico denominado Antropoceno (Crutzen y Stoermer, 2000). El Antropoceno ha traído el aumento desmedido en la emisión de un coctel de gases contaminantes a la atmósfera, fenómeno que no ha disminuido a pesar de los muchos acuerdos internacionales establecidos para tal fin. Dichas emisiones tienen consecuencias negativas, tanto para el ambiente, como para la salud de las personas (Sala *et al.*, 2000; Kampa y Castanas, 2008).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), cerca de 7 millones de personas mueren cada año alrededor del mundo debido a la mala calidad del aire producto de la contaminación atmosférica (OMS, 2014; ONU,

2016). Adicionalmente, la contaminación atmosférica produce pérdidas millonarias de al menos 250 mil millones de dólares cada año, debido a la atención médica y al ausentismo en los trabajos como consecuencia de las enfermedades asociadas con la mala calidad del aire (Banco Mundial, 2016). Debido a esto, la atención gubernamental sobre la calidad del aire ha aumentado, particularmente en países con economías emergentes como México, cuyo desarrollo económico ha venido acompañado del incremento de la industria, la agricultura y del uso de automóviles. Esto es particularmente notorio en los crecientes centros urbanos de todo el país, en donde las emisiones de los diferentes contaminantes deterioran notablemente la calidad del aire (figura 1), lo que ya causa unas 20 000 muertes prematuras cada año, de las cuales 9 000 suceden en la zona metropolitana del Valle de México (Stevens *et al.*, 2008; Maher *et al.*, 2016).

Los efectos negativos de la contaminación atmosférica también se pueden observar en los ecosistemas, no solo en el sitio de emisión, sino en zonas remotas a donde las corrientes de aire transportan los contaminantes atmosféricos. Al llegar a los diferentes ecosistemas causan pérdida de especies y deterioro de los recursos naturales de consumo humano básico como el agua (Sala *et al.*, 2000; Persson *et al.*, 2010;



FIGURA 1. Vista panorámica de la Ciudad de México cubierta por una espesa niebla producto de la contaminación atmosférica denominada esmog fotoquímico. Este fenómeno no es exclusivo de la capital del país pues se presenta en muchos centros urbanos a lo largo y ancho de México.

Simkin *et al.*, 2016). Por ello, es importante conocer la magnitud de las emisiones contaminantes y los lugares a los que puede llegar, teniendo en mente, para el caso de México, la amenaza que este fenómeno representa para su gran biodiversidad.

NORMATIVIDAD EN MATERIA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE

La legislación mexicana, mediante la norma oficial NOM-156-SEMAR-NAT-2012, regula los sistemas de monitoreo de la calidad del aire de todo el país. En ella se establece que las ciudades con más de medio millón de habitantes, así como las zonas metropolitanas y las conurbaciones, deben contar con monitoreo de la calidad del aire (DOF, 2012). Sin embargo, esto no se cumple a cabalidad debido a que en algunos casos no se cuenta con la instrumentación necesaria para la medición, y en otros casos las estaciones de monitoreo están fuera de servicio porque ya cumplieron su vida útil (INECC, 2019).

Esta norma establece los sitios en donde se debe llevar a cabo el monitoreo dependiendo, por ejemplo, de las actividades industriales. También establece los contaminantes atmosféricos sujetos a monitoreo y su concentración máxima en el aire. Dichas sustancias, denominadas “contaminantes criterio” por sus implicaciones en la salud pública, incluyen bióxido de azufre y de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono, partículas suspendidas totales y partículas suspendidas menores a 10 y a 2.5 micrómetros, así como al plomo (SO₂, NO₂, CO, O₃, PST, PM₁₀ y PM_{2.5}, PB; DOF, 2012).

MONITOREO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Para monitorear la calidad del aire de manera “sistematizada” se utilizan instrumentos especiales, generalmente estaciones de monitoreo automatizadas que pueden medir diferentes parámetros en forma simultánea y continua con gran precisión durante todo el día y todo el año. Debido al limitado alcance espacial de medición que tienen, en grandes ciudades es necesaria la instalación de una red de monitoreo, la cual conste de al menos dos estaciones. Sin embargo, dependiendo del tamaño del centro urbano y de las actividades que allí se lleven a cabo, la red deberá tener más de dos estaciones y todas las necesarias para cubrir dicha área.

La instalación, operación y mantenimiento de una red de monitoreo de la calidad del aire que cumpla lo establecido en la normatividad

requiere de una gran inversión económica y logística, la cual puede exceder la capacidad financiera de los gobiernos locales; esta puede ser una de las razones que explique por qué algunos centros urbanos no cuentan con redes de monitoreo de la calidad del aire a pesar de estar normado (Díaz-Álvarez *et al.*, 2018). Por ello, una de las alternativas es el uso de colectores pasivos de contaminación, que pueden ser desplegados fácilmente en grandes áreas y que permiten una medición cercana a la que se obtiene con equipos más sofisticados. Si bien los colectores pasivos pueden ser muy precisos, están sujetos a limitaciones temporales, ya que no pueden ser desplegados por más de un mes, que es el tiempo de vida útil de los filtros especiales que colectan los contaminantes. Adicionalmente, es necesario desplegar un colector por cada contaminante, aumentando significativamente la inversión para el monitoreo (Díaz-Álvarez *et al.*, 2018).

Una alternativa ya probada para monitorear la contaminación atmosférica es el uso de organismos que crecen naturalmente en los diferentes ambientes, los llamados biomonitores (Markert y Wünschmann, 2010; Díaz-Álvarez *et al.*, 2018). La obtención de información sobre contaminación atmosférica a partir de biomonitores se puede llevar a cabo en una sola colecta, por ejemplo, durante los inventarios forestales nacionales o durante campañas exploratorias de campo (Díaz-Álvarez *et al.*, 2018). Estos organismos, particularmente plantas, permiten la integración de los procesos ambientales (físicos y químicos) del sitio en donde crecen debido a la estrecha interacción que tienen con el ambiente, por ejemplo, permiten la integración de los cambios en la disponibilidad de agua y las variaciones de temperatura durante un tiempo determinado (Taiz y Zeiger, 2002). Lo mismo ocurre con los nutrientes que utilizan para su desarrollo, por ejemplo, el dióxido de carbono (CO₂) tiene huellas químicas particulares que permiten discernir entre las emisiones de fuentes naturales y las de origen antrópico, lo mismo ocurre con los contaminantes nitrogenados como el NO₂ de diferentes fuentes y por ello se puede conocer el origen de los nutrientes que las plantas utilizan en determinado sitio para sus procesos fisiológicos (Widory y Javoy, 2003; Cobley y Pataki, 2019; Díaz-Álvarez *et al.*, 2019a).

¿QUÉ ES EL BIOMONITOREO?

Durante la historia de la detección de contaminación con organismos se han utilizado dos términos para definirlos, algunas veces indistintamente: bioindicador y biomonitor. Sin embargo, tienen diferencias

definidas. El primero se refiere a las respuestas cualitativas de los organismos a una perturbación ambiental; por ejemplo, el cambio de color de las hojas puede indicar la presencia de un contaminante como el ozono; también, la presencia o la ausencia de cierta especie en un lugar puede ser indicativo de contaminación (Markert *et al.*, 2003; Markert y Wünschmann, 2010). Por otra parte, biomonitor es aquel organismo que brinda información cuantitativa sobre los cambios en las concentraciones de un contaminante como el nitrógeno; por ejemplo, la orquídea *Laelia speciosa* aumenta el contenido foliar de nitrógeno en respuesta a dosis crecientes de este contaminante (Markert *et al.*, 2003; Markert y Wünschmann, 2010; Díaz-Álvarez *et al.*, 2015). Los bioindicadores son una alerta temprana de la presencia de contaminantes, mientras que los biomonitores permiten establecer la relación entre el fenómeno y la respuesta del organismo.

Los organismos más utilizados para biomonitoreo son las plantas, que a su vez deben cumplir ciertos parámetros, incluyendo: *i*) tener una amplia distribución geográfica, *ii*) ser abundantes, *iii*) estar fisiológicamente activas durante todo el año para que registren los cambios ambientales y, *iv*) mostrar una relación clara a la variable de interés, por ejemplo, cambios en el contenido de cierto contaminante en sus tejidos, como el plomo (Conti y Cecchetti, 2001; Gorelova y Frontasyeva, 2017; Díaz-Álvarez *et al.*, 2018). Las plantas utilizadas para biomonitoreo pertenecen a diversos grupos funcionales, incluyendo los musgos, las herbáceas como pastos, bromelias, orquídeas, otras epífitas vasculares, los árboles y arbustos (Gorelova y Frontasyeva, 2017; Díaz-Álvarez *et al.*, 2018). El uso de un solo biomonitor brinda información valiosa sobre la contaminación atmosférica; sin embargo, es ideal utilizarlos en combinaciones de dos o más especies para tener una visión amplia en la que se integre el fenómeno de la contaminación, debido a que cada organismo responde de forma particular a diferentes condiciones como resultado de sus características particulares e inherentes a la especie y grupo funcional (Markert y Wünschmann, 2010; Gorelova y Frontasyeva, 2017; Díaz-Álvarez y de la Barrera, 2018).

DEPÓSITO ATMOSFÉRICO Y BIOMONITOREO: LA INTERACCIÓN PLANTA-ATMÓSFERA

Los gases contaminantes emitidos a la atmósfera están sujetos a diferentes transformaciones. Por una parte, pueden reaccionar en presencia de la luz solar, por otra, asociarse con los compuestos ya presentes en

la atmósfera, como el oxígeno, el vapor de agua, los óxidos de azufre o de nitrógeno, entre otros, produciendo compuestos contaminantes secundarios (Jenkin y Clemitchaw, 2000). Uno de estos contaminantes es el material particulado en suspensión, que es una mezcla de partículas sólidas o gotas líquidas en el aire que al igual que el ozono es nocivo para la salud. Estos contaminantes se depositan eventualmente en la superficie del planeta en donde interactúan, ya sea con elementos naturales como las plantas, los océanos, los ríos y los lagos, o con estructuras humanas como los edificios, las carreteras, las plazas, entre otras; a este fenómeno se denomina “depósito atmosférico” y se clasifica en dos tipos: el depósito seco, que ocurre cuando por acción directa de la gravedad, sin intervención directa del agua, los contaminantes alcanzan la superficie del planeta, fenómeno que se observa en algunas ciudades cuyas plantas tienen una capa de “polvo” sobre sus hojas. Por otra parte, el depósito húmedo, que ocurre cuando los contaminantes en suspensión se mezclan con la lluvia, la nieve o la niebla y son arrastrados hacia la superficie del planeta, generando en algunos casos lluvia ácida (Díaz-Álvarez *et al.*, 2018).

Las plantas interactúan con el depósito atmosférico incorporando los contaminantes a sus tejidos mediante tres mecanismos principales:

1. *Intercambio gaseoso.* Ocurre durante el intercambio gaseoso entre el interior de la hoja y el ambiente externo, cuando el CO₂ es absorbido y el oxígeno es liberado. Este proceso se lleva a cabo por medio de los estomas, unas células especializadas de las hojas que se abren o cierran dependiendo de las condiciones ambientales, como cambios en la temperatura y la humedad, además son responsables de la transpiración de las plantas (caja 1; Taiz y Zeiger, 2002). Durante el intercambio gaseoso, el CO₂ no es el único gas que ingresa a las hojas. En lugares con algún tipo de contaminación atmosférica, en donde otros gases como SO₂, NO₂, CO, O₃ son comunes, también pueden ingresar para formar parte de los tejidos de las plantas y pueden ser detectados fácilmente mediante análisis químicos para determinar su origen y la concentración en el ambiente (Díaz-Álvarez *et al.*, 2018).
2. *Absorción por raíces.* Las plantas que utilizan el suelo como sustrato de anclaje se valen de las raíces para la adquisición de agua y nutrientes, aunque también hay plantas que se anclan a otros sustratos como rocas, estructuras humanas (edificaciones) y otras plantas; muchas de ellas están asociadas con microor-

ganismos que contribuyen con la absorción y asimilación de nutrientes (Taiz y Zeiger, 2002). En condiciones naturales, el ciclo de nutrientes puede considerarse en “equilibrio”; las plantas absorben lo que necesitan del suelo para su desarrollo. Sin embargo, los contaminantes que se depositan en el suelo y pasan a ser parte de este pueden ser absorbidos por las raíces y causar alteraciones químicas que conllevan a un desequilibrio de nutrientes causando efectos adversos en las plantas y en los ecosistemas, lo que también puede ser observado por medio de análisis químicos a las plantas y al suelo (Díaz-Álvarez *et al.*, 2018).

Caja 1. Plantas atmosféricas

Las plantas que adquieren sus nutrientes exclusivamente de la atmósfera ya que no tienen contacto con el suelo son llamadas plantas atmosféricas; estas son las favoritas para biomonitoreo debido a que permiten hacer una relación directa entre la composición química de sus tejidos con la fuente y la magnitud de un contaminante atmosférico dado. Un ejemplo son las bromelias epífitas, las cuales mediante los tricomas capturan humedad y nutrientes incluyendo contaminantes del aire. Los tricomas son “pelos” muy pequeños, unicelulares o multicelulares que emergen de la superficie de la hoja y le confieren el característico color grisáceo de algunas especies, tal es el caso de *Tillandsia recurvata* (que se muestra creciendo sobre la corteza de un árbol).



3. Absorción de humedad a través de las hojas. Es muy común en los musgos. Estas plantas no vasculares carecen de cutícula, que es una capa de cera que cubre las hojas de las plantas terrestres para evitar la desecación. Esta capa brinda protección en contra de la radiación ultravioleta y de los patógenos. La cutícula no permite el ingreso directo de agua a las células de las plantas, por ello dependen de las raíces. Al carecer de cutícula, los musgos dependen completamente de la humedad del lugar en donde crecen, asimilando los nutrientes directamente del agua que les llega. De este modo, los contaminantes disueltos pueden ingresar fácilmente a sus tejidos, allí se acumulan y mediante análisis químicos se conocen la fuente y magnitud de la contaminación. Estas plantas son típicas de lugares húmedos y de baja luminosidad, incluyendo las estructuras que se encuentran en las ciudades, por ello han sido ampliamente utilizadas para biomonitoreo (figura 2, Cárdenas y Delgadillo, 2009; Liu *et al.*, 2012).



FIGURA 2. Musgos creciendo sobre corteza de árbol en un parque urbano de la Ciudad de México. La sombra del dosel le brinda las condiciones adecuadas para su crecimiento.

BIOMONITOREO EN MÉXICO

El biomonitorio de la contaminación atmosférica en México se ha concentrado en el Valle de México, en donde se establece uno de los centros poblados más grande del mundo, y también en donde las grandes emisiones de contaminantes atmosféricos han rebasado los límites establecidos por la legislación (Decina *et al.*, 2019). Por ello, desde la década de los setenta los científicos han estudiado el efecto de la contaminación de la Ciudad de México sobre las plantas, además han evaluado la idoneidad de diferentes especies como biomonitores de la contaminación atmosférica (De Bauer, 1972). Las plantas más utilizadas han sido los musgos, los pinos y las bromelias, debido a su abundancia y a que tienen una respuesta muy clara ante los diferentes contaminantes atmosféricos. Los contaminantes más evaluados han sido el nitrógeno, el ozono y el azufre, aunque también se han evaluado metales pesados (tabla 1). Entre los musgos utilizados se encuentran: *Braunia secunda*, *Thuidium delicatulum* y *Leptodontium pungens*. Estas especies han mostrado respuestas muy claras, tanto fisiológicas como morfológicas, al depósito de nitrógeno atmosférico (Díaz-Álvarez *et al.*, 2019b, 2020). Otro biomonitor es *Tillandsia recurvata* muy usada debido a la relación directa entre la concentración de óxidos de nitrógeno del aire y el contenido de nitrógeno de sus tejidos; además, su composición isotópica muestra el origen de la contaminación prevalente de donde crece (Zambrano *et al.*, 2009; Díaz-Álvarez y de la Barrera, 2018). Adicionalmente, esta bromelia ha permitido determinar las fuentes de carbono gaseoso que utiliza para su desarrollo, como el dióxido y el monóxido de carbono en el Valle de México, permitiendo entender la distribución espacial de las emisiones de estos contaminantes en dicha región (Zambrano *et al.*, 2009; Díaz-Álvarez y de la Barrera, 2020).

TABLA 1. Estudios de biomonitorio de la contaminación atmosférica en México. PST (partículas suspendidas totales).

Especie	Planta	Parámetro	Referencia
<i>Braunia</i> sp.	Musgo	Nitrógeno	Díaz-Álvarez <i>et al.</i> , 2016
<i>Braunia</i> sp.	Musgo	Nitrógeno	Díaz-Álvarez & De la Barrera, 2018

concluye Tabla 1

<i>Especie</i>	<i>Planta</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Referencia</i>
<i>Braunia secunda</i>	Musgo	Nitrógeno	Díaz-Álvarez <i>et al.</i> , 2019b, 2020
<i>Leptodontium pungens</i>	Musgo	Nitrógeno	Díaz-Álvarez <i>et al.</i> , 2019b
<i>Thuidium delicatulum</i>	Musgo	Nitrógeno	Díaz-Álvarez <i>et al.</i> , 2020
<i>Tillandsia recurvata</i>	Bromelia	Nitrógeno	Díaz-Álvarez & De la Barrera, 2018
<i>Tillandsia recurvata</i>	Bromelia	Nitrógeno	Díaz-Álvarez <i>et al.</i> , 2020
<i>Tillandsia usneoides</i>	Bromelia	Nitrógeno	Díaz-Álvarez <i>et al.</i> , 2020
<i>Tillandsia recurvata</i>	Bromelia	Carbono Nitrógeno	Zambrano <i>et al.</i> , 2009
<i>Laelia speciosa</i>	Orquídea	Nitrógeno	Díaz-Álvarez <i>et al.</i> , 2015, 2016,
<i>Abies religiosa</i>	Árbol	Azufre Nitrógeno	Peña-Mendoza <i>et al.</i> , 2016
<i>Pinus hartwegii</i>	Árbol	Varios cont.	Fenn <i>et al.</i> , 1999; Alarcon <i>et al.</i> , 1993
<i>Pinus halepensis</i>	Árbol	PST	Astorga Bustillos <i>et al.</i> , 2011
<i>Prunus serotina</i>	Árbol	Ozono	Skelly <i>et al.</i> , 1997

En el laboratorio de Ecofisiología y cambio global del Instituto de Investigación Forestal nos interesa la interacción que se presenta entre las plantas y la atmósfera. Por ello llevamos a cabo investigación que nos

permite entender los efectos de la contaminación atmosférica sobre diferentes especies de plantas. Por una parte, utilizamos el biomonitoreo de diferentes contaminantes atmosféricos para determinar la distribución espacial de la contaminación en áreas sin sistemas de monitoreo de la calidad del aire, por otra, desarrollamos modelos para determinar la cantidad y el tipo de contaminantes que las plantas absorben en sitios antropizados. Tal es el caso de las diferentes bromelias y árboles que se encuentran en las ciudades. Esto nos ayuda a determinar el papel que juegan las diferentes especies de plantas en la mitigación de la contaminación atmosférica en los centros urbanos.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Utilizar organismos que naturalmente crecen en diferentes ambientes para biomonitoreo permite conocer el estado de las emisiones de varios contaminantes atmosféricos en lugares en donde no es posible el despliegue de una red automatizada de monitoreo de la calidad del aire. Esta metodología se vuelve aún más eficaz cuando se integra el uso de diferentes tipos de plantas que permiten integrar información significativa sobre contaminación que brinde un panorama más amplio de dicho fenómeno. Si bien ya tenemos una idea sobre las especies que son útiles para biomonitoreo, este número se debe ampliar para incluir especies de diferentes ecosistemas y grupos funcionales representativos del tipo de vegetación al que pertenecen.

El biomonitoreo de la contaminación atmosférica en México se ha llevado a cabo en el centro del país; sin embargo, el desarrollo económico de las diferentes regiones ha traído consigo crecimientos poblacionales significativos y con ello el aumento de las emisiones de contaminantes, suponiendo una amenaza no solo para la salud humana sino también para la biodiversidad. Esta situación se convierte en una valiosa oportunidad para el desarrollo e implementación de estudios de biomonitoreo que además permitan entender la vulnerabilidad de los diferentes ecosistemas expuestos a este fenómeno antropogénico. El uso de biomonitores puede contribuir a determinar las fuentes y magnitudes de los diferentes contaminantes atmosféricos en los lugares en donde se incumple la norma NOM-156-SEMARNAT-2012 sobre monitoreo de la calidad del aire y, así determinar los sitios en donde es más urgente tomar acciones de reducción, mitigación o remediación. En este caso, el uso de biomonitores también puede ayudar al diseño de políticas públicas enfocadas en conocer la distribución espacial de las emisiones

y su lugar de depósito en diferentes áreas del territorio, dando prioridad a los ecosistemas más vulnerables, como aquellos sometidos a una reducción significativa de su área original; también, a los ecosistemas que brindan servicios ecosistémicos fundamentales para la población humana, como la captación de CO₂, la producción de oxígeno o la captación e infiltración de agua.

Bibliografía

- Alarcón, C. *et al.* (1993). Patrón de crecimiento radial en árboles de *Pinus hartwegii* afectados por contaminación atmosférica en el suroeste del Valle de México, *Agrociencia. Serie Recursos Naturales Renovables*. 3: 67-80.
- Astorga Bustillos, F. R. *et al.* (2011). *Pinus halepensis* Mill. como indicador de contaminación atmosférica en una zona industrial urbana, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 2(7): 79-86.
- Banco Mundial. (2016). La contaminación atmosférica le cuesta USD 225 mil millones a la economía mundial. Comunicado de prensa. Septiembre 08, 2016. Consultado el 16/01/2020. Disponible en <http://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2016/09/08/air-pollution-deaths-cost-global-economy-225-billion>
- Cárdenas, S. A., M. C. Delgadillo. (2009). *Musgos del Valle de México: Cuadernos 40*. México: Instituto de Biología-UNAM, pp. 9-12.
- Cobley, L. A. E., D. E. Pataki. (2019). Vehicle emissions and fertilizer impact the leaf chemistry of urban trees in Salt Lake Valley, UT, *Environmental Pollution*. 254: 112984.
- Conti, M. E., G. Cecchetti. (2001) Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment-a review, *Environmental Pollution*. 114(3): 471-492.
- Crutzen, P. J., E. F. Stoermer. (2000). The "Anthropocene". *Global Change NewsLetter*. 41: 17-18.
- De Bauer, L. I. (1972). Uso de plantas indicadoras de aeropolutos en la Ciudad de México, *Agrociencia*. 9(D): 139-141.
- Decina, S. M. *et al.* (2019). Hotspots of nitrogen deposition in the world's urban areas: a global data synthesis, *Frontiers in Ecology and the Environment*. 18(2): 92-100.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Consultado el 01/10/2020. Disponible en <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/nom-156-semarnat-2012.pdf>

- Díaz-Álvarez, E. A. *et al.* (2015). Responses to simulated nitrogen deposition by the neotropical epiphytic orchid *Laelia speciosa*. *PeerJ*. 3: e1021.
- Díaz-Álvarez, E. A. *et al.* (2016). A $\delta^{15}\text{N}$ assessment of nitrogen deposition for the endangered epiphytic orchid *Laelia speciosa* from a city and an oak forest in Mexico, *Journal of Plant Research*. 129(5): 863-872.
- Díaz-Álvarez, E. A. *et al.* (2018). Biomonitoring of atmospheric nitrogen deposition: potential uses and limitations, *Conservation Physiology*. 6(1): coy011.
- Díaz-Álvarez, E. A., E. de la Barrera. (2018). Characterization of nitrogen deposition in a megalopolis by means of atmospheric biomonitoring, *Scientific Reports*. 8: 13569.
- Díaz-Álvarez, E. A., E. de la Barrera. (2020). Isotopic biomonitoring of anthropogenic carbon emissions in a megalópolis, *PeerJ*. 8: e9283.
- Díaz-Álvarez, E. A. *et al.* 2019a. Elemental and isotopic assessment for Colombian orchids from a montane cloud forest: a baseline for global environmental change, *Acta Physiologiae Plantarum*. 41(6): 99.
- Díaz-Álvarez, E. A. *et al.* 2019b. Bryophyte enzymatic responses to atmospheric nitrogen deposition: A field validation for potential biomonitoring, *The Bryologist*. 122(3): 396-403.
- Díaz-Álvarez, E. A. *et al.* (2020). Morphophysiological screening of potential organisms for biomonitoring nitrogen deposition, *Ecological Indicators*. 108: 105729.
- Fenn Mark, E., L. *et al.* (1999). Nitrogen and sulfur deposition and forest nutrient status in the valley of Mexico, *Water, Air, and Soil Pollution*. 113: 155-174.
- Gorelova, S. V., M. V. Frontasyeva. (2017). The Use of Higher Plants in Biomonitoring and Environmental Bioremediation, *Phytoremediation*. 103-155.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2019). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2018*. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos, México.
- Jenkin, M. E., K. C. Clemitshaw. (2000). Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer, *Atmospheric Environment*. 34(16): 2499-2527.
- Kampa, M., E. Castanas. (2008). Human health effects of air pollution, *Environmental Pollution*. 151(2): 362-367.
- Liu, X. Y. *et al.* (2012). Pitfalls and new mechanisms in moss isotope biomonitoring of atmospheric nitrogen deposition, *Environmental Science Technology*. 46(22): 12557-12566.

- Maher, B. A. *et al.* (2016). Magnetite pollution nanoparticles in the human brain, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 113(39): 10797-10801.
- Markert, B. A. *et al.* (2003). Definitions, strategies and principles for bioindication/biomonitoring of the environment. En B. A. Markert *et al.* (eds.), *Bioindicators & Biomonitoring, Principles, Concepts and Applications*. Oxford: Elsevier, pp. 3-40.
- Markert, B., S. Wünschmann. (2010). *Bioindicators and Biomonitoring: Use of Organisms to Observe the Influence of Chemicals on the Environment*, Organic Xenobiotics and Plants. 217-236.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2016). PNUMA: Muertes prematuras debido a la degradación ambiental son una amenaza a la salud pública mundial. Comunicado No. 16/139, 23 de mayo 2016. Organización Mundial de las Naciones Unidas. Consultado el 01/12/2020. Disponible en <https://www.unenvironment.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/muertes-prematuras-debido-la-degradacion-ambiental-son-una-amenaza>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2014). 7 millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica, Comunicado de prensa. Organización Mundial de la Salud. Consultado el 04/18/2017. Disponible en <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/es/>
- Peña-Mendoza, E. R. *et al.* (2016). Nutrientes en follaje y depósito húmedo de nitrato, amonio y sulfato del lavado de copa en bosques de *Abies religiosa*, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 14: 2793–2805
- Persson, L. *et al.* (2010). Impacts of Pollution on Ecosystem Services for the Millennium Development Goals, Stockholm Environment Institute. Consultado el 16/11/2020. Disponible en <https://www.sei-international.org/mediamanager/documents/Publications/sei-ProjectReport-LPersson-ImpactsOfPollutionOnEcosystemServices.pdf>
- Sala, O. E. *et al.* (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100, *Science*. 287(5459): 1770-1774.
- Simkin, S. M. *et al.* (2016). Conditional vulnerability of plant diversity to atmospheric nitrogen deposition across the United States, *PNAS*. 113(15): 4086-4091.
- Skelly, J. M. *et al.* (1997). Observations of ozone induced foliar injury on black cherry (*Prunus serotina* var. *capuli*) within the Desierto de los Leones National Park, Mexico, *Environmental Pollution*. 95(2): 155–158.

- Stevens, G. *et al.* (2008). Characterizing the epidemiological transition in Mexico: national and subnational burden of diseases, injuries, and risk factors, *PLoS Medicine*. 5(6): e125.
- Taiz, L., Zeiger E. (2002). *Plant Physiology*. 3a ed. Sunderland: Sinauer Associates, pp. 690.
- Widory, D., M. Javoy. (2003). The carbon isotope composition of atmospheric CO₂ in Paris, *Earth and Planetary Science Letters*. 215(1-2): 289-298.
- Zambrano, A. *et al.* (2009). Distribution and sources of bioaccumulative air pollutants at Mezquital Valley, Mexico, as reflected by the atmospheric plant *Tillandsia recurvata* L., *Atmospheric Chemistry and Physics*. 9(17): 6479-6494.

EPÍLOGO

UNA BREVE REFLEXIÓN SOBRE NUESTRO LUGAR EN EL MUNDO

*Edison A. Díaz-Álvarez, Susana Guillén Rodríguez
y Beatriz Bolívar-Cimé*

Nuestra relación con la naturaleza ha cambiado radicalmente durante las últimas décadas, no solo por el aumento vertiginoso de la población mundial desde mediados del siglo xx, que pasó de 2 500 millones en 1950 a 7 800 millones de personas al momento de escribir este texto, sino también como resultado de la migración masiva de la población del campo a la ciudad (World Bank, 2020). Esto es particularmente notable cuando pensamos que la población urbana mundial pasó de 33.6% en 1960 a 55.7% para 2019. En el caso particular de México, este pasó de 42.6% a 80% en el mismo periodo (INEGI, 2013; World Bank, 2020). Estos movimientos poblacionales son la respuesta al aumento de la industrialización en los centros urbanos, lo que ha provocado el abandono de las actividades agrícolas y ganaderas tradicionales en busca de mejores oportunidades económicas ya que, las personas que habitan en el campo generalmente viven en la pobreza (INEGI, 2013; Coneval, 2015).

Vivir en estas vastas extensiones de concreto ha propiciado, a su vez, un cambio profundo en la percepción sobre el paradigma del “éxito”, incluyendo el progreso y el desarrollo, y nos ha conducido al consumismo impulsivo-compulsivo. Ahora todo lo podemos obtener muy fácil y rápidamente a través de internet o, en un caso extremo, mediante un viaje corto al “súper”, todo está cortado, preparado y empaquetado, listo para consumir o usar de inmediato, además siempre está disponible sin importar la época del año (De la Barrera *et al.*, 2020). Por lo que

damos por sentado la accesibilidad a los bienes y servicios que consumimos a diario; esto resulta en una desconexión total con su origen y sobre todo con los costos ambientales asociados a este “tenerlo todo”, porque, ¿cómo cuidar y proteger algo que nunca ves y de lo que solo escuchas hablar?

En tiempos de cambio global se llevan a cabo dos importantes discusiones científicas: por una parte, muchos científicos están de acuerdo en que debemos aceptar que el Holoceno terminó y que ahora vivimos en el Antropoceno, y por otra, se discute sobre una posible sexta gran extinción de especies. Los argumentos a favor de aceptar ambos postulados son bastante fuertes, como que los desechos de nuestra civilización, incluyendo las detonaciones nucleares del siglo pasado, dejarán una huella en la geología de todo el planeta que durará por lo menos 50 mil años (Crutzen y Stoermer, 2000; Shivana, 2020). Por otra parte, desde la aparición de la humanidad se estima que una gran cantidad de especies han desaparecido y el pronóstico no es alentador, ya que esta tasa de desaparición es similar a la observada en las cinco extinciones masivas previas (Plataforma Intergubernamental Científica sobre Biodiversidad y Ecosistemas, IPBES, 2019). Sin embargo, debido a que en la actualidad la distribución espacial de diversas actividades humanas que ejercen una gran presión sobre la biodiversidad no es homogénea, existen regiones del planeta en donde las especies tienen un mayor riesgo de desaparecer por impacto humano (Allan *et al.*, 2019). La preocupación es tal que en 2011 la Organización de las Naciones Unidas declaró el comienzo de la década internacional de la biodiversidad con el objetivo de combatir la desaparición de especies. Sin embargo, a inicios de 2019 la IPBES advirtió sobre la posible extinción de un millón de especies en los próximos años, que incluye a organismos claves para nuestra supervivencia, como las abejas, esenciales para la polinización de cultivos (IPBES, 2019).

Ahora, con el inicio de una nueva década se establecen 10 años en los que las Naciones Unidas promoverán la restauración de los ecosistemas. Esta iniciativa busca la protección, el cuidado y el restablecimiento del estado natural de muchos de los ecosistemas afectados en el mundo por las acciones humanas, con el fin de combatir el cambio climático, la desaparición de especies y mejorar las condiciones de vida de las personas. Las acciones que como especie llevemos a cabo durante este tiempo son importantes, ya que los estudios muestran que 2030 es la fecha límite para prevenir una catástrofe climática y los desastres ecológicos y sociales asociados a esta.

La modificación masiva del planeta no solo afecta a los servicios básicos que obtenemos de los ecosistemas, sino que propicia la aparición de nuevas enfermedades, algunas de ellas de origen viral. Y es que los virus son muy cambiantes debido a sus altas tasas de mutación, que en ecosistemas saludables son inoocuos para la humanidad porque están aislados en sus propios ciclos y organismos como los murciélagos. Sin embargo, cuando las selvas y los bosques son perturbados o destruidos, los reservorios de los virus son modificados, de tal modo que los virus pueden entrar en contacto directo con animales domésticos, como vacas, puercos y pollos, en donde siguen su ciclo de mutación, y debido a la cercanía de estos animales con los humanos, eventualmente uno de estos virus se transmite al hombre, tales son los casos del virus del Ébola, del virus del Nilo Occidental y el del SARS-cov-2, que es el causante de la enfermedad conocida como covid-19.

A lo largo de este libro hemos explorado las consecuencias del deterioro ambiental en los sistemas forestales. Además, hemos mostrado alternativas para solucionar algunos de los problemas que afrontan los bosques y las especies que allí habitan. Mediante casos de estudio expusimos la aplicabilidad de diferentes técnicas para estudiar los bosques y sus cambios, además de aprovechar los compuestos químicos de las plantas. La creatividad y el empeño humano han conseguido muchos logros a lo largo de nuestra historia; sin embargo, la crisis ambiental es el mayor reto que afrontamos, en parte porque nuestra propia supervivencia está en juego, por lo que nuevas ideas son necesarias para lograr un equilibrio entre nuestras necesidades y la conservación de la naturaleza. La investigación y el desarrollo en temas forestales son un paso muy importante hacia la sustentabilidad, y con esta lograr el bienestar humano.

Bibliografía

- Allan, J. R. *et al.* (2019). Hotspots of human impact on threatened terrestrial vertebrates, *PLoS biology*. 17(3): e3000158.
- Banco Mundial. (2020). Urban population. Consultado el 05/10/2020. Disponible en https://data.worldbank.org/indicator/sp.urb.totl.in.zs?end=2019&most_recent_value_desc=true&start=1960&view=chart&year=1960
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval). (2015). Medición de la Pobreza en México y en las Entidades Federativas. Consultado el 05/10/2020. Disponible en <http://www>.

- coneval.org.mx/Medicion/Documents/Pobreza%202014_coneval_web.pdf#search=Pobreza%202014%5fconeval%5Fweb%2Epdf
- Crutzen P. J., E. F. Stoermer. (2000). The “Anthropocene”. *IGBP NewsLetter*. 41: 17–18.
- De la Barrera, E. *et al.* (2020). *Como agua pa'l Antropoceno: manual para el planeta con recetas, relatos y ciencia*. México: UNAM, pp. 184. ISBN 978-1-08-736989-1.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). Censo de Población y Vivienda 2013. ISBN: 978-607-494-531-7.
- Plataforma Intergubernamental Científica sobre Biodiversidad y Ecosistemas (IPBES). (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. En: E. S. Brondizio *et al.* (ed). IPBES secretariat. Bonn, Alemania.
- Shivanna, K. R. (2020). The sixth mass extinction crisis and its impact on biodiversity and human welfare, *Resonance*. 25: 93-109.

GLOSARIO

Abiótica/o. Ausencia de organismos vivos.

Acícula. Hoja larga, delgada y puntiaguda, en forma de aguja; es muy común en las hojas de las coníferas.

Alcaloide. Sustancia nitrogenada que se encuentra en ciertos vegetales y constituye un estimulante natural; puede ser venenosa y algunas se emplean en terapéutica médica.

Alelopatía. Fenómeno biológico en el cual los organismos cercanos tienen la capacidad de comunicarse o interactuar entre ellos mediante diferentes compuestos químicos.

Aminoácido. Cualquiera de los compuestos orgánicos que contienen uno o más grupos amino básicos y uno o más grupos carboxilo ácidos y que se polimerizan para formar péptidos y proteínas; solo 20 de los más de 80 aminoácidos que se encuentran en la naturaleza sirven como componentes básicos para las proteínas.

Anestésico. Una droga, como el éter, que produce pérdida de sensibilidad.

Antineoplásica sustancia. Un agente, como los compuestos de mercaptopurina, que es antagonista del crecimiento de una neoplasia.

Antipirética/o. Cualquier sustancia, tal como la aspirina, que reduce o previene la fiebre

Antropoceno. Es un término utilizado para designar la era geológica actual que se distingue por el papel central que desempeña la humanidad para propiciar significativos cambios geológicos.

- Asexual.** Que no involucre sexo.
- Bacteriostática.** Sustancia que inhibe el crecimiento bacteriano.
- Biótica/o.** 1. Perteneciente o relativo a la vida y a los organismos vivos.
2. Inducido por las acciones de organismos vivos.
- Cambio de uso de suelo.** Transformación de la cubierta vegetal original para convertirla a otros usos o degradar la calidad de la vegetación modificando la densidad y la composición de las especies presentes.
- Cambio global.** Conjunto de cambios y transformaciones a gran escala producto de las actividades antropogénicas y que afectan al planeta.
- Cavitación.** Disfunción fisiológica que ocurre en el xilema de las plantas cuando estas están bajo déficit hídrico, y que constituye la pérdida de conductancia hidráulica cuando algunos vasos se llenan de aire.
- Clado.** Un grupo taxonómico que está compuesto por un ancestro común y sus descendientes.
- Clon/es.** Todos los individuos, considerados colectivamente, producidos asexualmente o por partenogénesis a partir de un solo individuo.
- Composición isotópica.** Proporción entre los isótopos pesados y ligeros de un elemento.
- Compuestos volátiles.** Son todos aquellos hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a temperatura ambiente (20 °C) o que son muy volátiles a dicha temperatura.
- Conductancia estomática.** Parámetro de proporcionalidad que relaciona el flujo de agua transpirada a través del estoma con la fuerza motora del mismo.
- Conífera.** El nombre común de las plantas del orden Pinales.
- Cotiledón.** La primera hoja del embrión de las plantas con semillas.
- Cultivo *in vitro*.** Técnica que consiste en tomar una porción de una planta y colocarla en un medio nutritivo estéril en donde se regenerarán una o muchas plantas.
- Cutícula.** Película continua de cutina que cubre ciertas partes de la planta, principalmente las hojas.
- Desecación.** Extracción o eliminación de la humedad de un terreno o cuerpo.
- Epífita planta.** Una planta que crece de forma no parasitaria en otra planta o en alguna estructura inanimada, como un edificio o un poste telefónico, obteniendo humedad y nutrientes del aire.
- Erosión.** Desgaste y modelación de la corteza terrestre, causados por la acción del viento, la lluvia, los procesos fluviales, marítimos y glaciales, y por la acción de los seres vivos.
- Especie endémica.** Única a una región o sitio específico.

- Especie exótica.** No endémica a un área.
- Estoma.** Abertura microscópica del tejido epidérmico de las hojas y partes verdes de las plantas por donde ocurre el intercambio de gases entre la planta y el exterior.
- Etiolación.** Pérdida de color de las hojas de las plantas debido a la poca clorofila en estas.
- Ex situ.** Fuera de su lugar.
- Fenología.** Ciencia que estudia las fases del ciclo vital de los seres vivos y cómo les afectan las variaciones estacionales e interanuales del clima.
- Fenotipo.** Los caracteres observables de un organismo, que dependen del genotipo y el efecto del medio ambiente.
- Feromonas.** Sustancias liberadas por algunos animales para comunicarse con otros.
- Franjas climáticas.** Zona que cuenta con una climatología específica, particularmente al hablar de montañas.
- Genotipo.** La constitución genética de un organismo, usualmente con respecto a un gen o unos pocos genes relevantes en un contexto particular
- Germoplasma.** Conjunto de los genes que mediante células reproductoras o gametos son transmitidos a los descendientes a través de la reproducción
- GPS.** Sistema de Posicionamiento Global (por sus siglas en inglés, *Global Positioning System*).
- Grupo funcional.** Conjunto de especies con rasgos semejantes, susceptibles de tener efectos similares sobre el funcionamiento del ecosistema. También, tienen respuestas similares a cambios ambientales particulares.
- Hidrosoluble.** Que se disuelve en agua.
- Hotspot.** Son regiones que contienen la mayor biodiversidad del planeta.
- Invertebrado.** Animal que carece de columna vertebral.
- Lixiviación suelo.** Desplazamiento de sustancias solubles o dispersables causado por el movimiento de agua en el suelo.
- Migración altitudinal.** Desplazamiento vertical de especies en respuesta a cambios ambientales.
- Mitosis.** División del núcleo de la célula que involucra la duplicación y separación exacta de los cromosomas en dos células hijas.
- Moléculas aromáticas.** La aromaticidad describe la resonancia de los dobles enlaces conjuntados en moléculas cíclicas.
- Musgo.** Plantas formadas por tallos y hojas pequeñas y delgadas, sin tejido vascular; carecen de raíces verdaderas, pero tienen unas estruc-

turas filamentosas que las sujetan y crecen formando capas sobre la tierra, las rocas, los troncos de los árboles y en el agua.

Nematicida. Sustancia que mata nematodos.

Nematodo. Fílum de gusanos unisexuales, de cuerpo cilíndrico y delgado, sin segmentar, cubierto por una cutícula; de formas libres y parásitas.

Nodrizaje. Proceso en el cual una planta contribuye con el crecimiento de otra.

Orografía. Parte de la geografía física que se encarga del estudio, la descripción y la representación del relieve terrestre.

Orteto. Grupo de individuos (ramets) procedentes originariamente de un único individuo (ortet) mediante reproducción vegetativa, por ejemplo, mediante estaquillas, micropropagación, injertos, acodos o divisiones.

Piretroide. Sustancia insecticida utilizada en cultivos y en animales.

Plasticidad fenotípica. La capacidad de un organismo a cambiar su fenotipo en respuesta a los cambios ambientales.

Quimioterapia. Es una terapia empleada en el tratamiento del cáncer. Consiste en emplear diversos fármacos para destruir células cancerígenas y reducir o eliminar completamente la enfermedad.

Resiliencia. Se refiere a los ecosistemas o especies que se caracterizan por ser adaptables, flexibles y capaces de lidiar con el cambio.

Salicina. Sustancia extraída de la corteza del sauce, usada en medicina como tónico.

Selección natural direccional. Es un tipo de selección natural que favorece un solo alelo, y por esto la frecuencia alélica de una población continuamente va en una dirección.

Sistemas silvícolas. Consisten en una serie de métodos, actividades y prácticas tendientes a manejar y aprovechar la vegetación de los diferentes ecosistemas forestales.

Sustentabilidad. Es algo que se puede sostener a lo largo del tiempo sin agotar sus recursos o perjudicar el medio ambiente.

Taxa (taxón). Cada una de las subdivisiones de la clasificación biológica, desde la especie, que se toma como unidad, hasta el filo o tipo de organización.

Totipotencia. Capacidad de las células vegetales para regenerar una nueva planta completa.

Volatilización. Es el cambio de estado que ocurre cuando una sustancia pasa del estado sólido al gaseoso, por aumento de la temperatura, sin pasar por el estado líquido intermedio.

SOBRE LOS AUTORES

Armando Aparicio Rentería. Su línea de investigación es: Silvicultura clonal.

Beatriz del Socorro Bolívar Cimé. Su línea de investigación es: Ecología del paisaje y fauna silvestre.

Cecilia Cruz López. Su línea de aplicación es: Aplicaciones de las técnicas estadísticas.

Claudia Alvarez Aquino. Su línea de investigación es: Ecología forestal.

Edison Armando Díaz Álvarez. Su línea de investigación es: Biomonitorio de la contaminación atmosférica.

Fernando Zavaleta Hernández. Su línea de investigación es: Ecología forestal.

Héctor Viveros-Viveros. Su línea de investigación es: Manejo de recursos genéticos forestales.

Odette I. Cadena Morales. Su línea de investigación es: Ecología forestal.

Olivia Márquez Fernández. Su línea de investigación es: Fitoquímica y ecología química.

Rafael Flores Peredo. Su línea de investigación es: Ecología conductual de fauna silvestre en ambientes naturales, urbanos y periurbanos. Interacciones ecológicas planta-animal.

Rosa Amelia Pedraza Pérez. Su línea de investigación es: Ecología de la Restauración

Susana Guillén Rodríguez. Su línea de investigación es: Ecofisiología vegetal

Virginia Rebolledo Camacho. Su línea de investigación es: Conservación genética y propagación asexual de especies forestales.



Siendo rector de la Universidad Veracruzana
el doctor Martín Gerardo Aguilar Sánchez,
La investigación forestal en tiempos de cambio global: problemáticas y perspectivas,
de Susana Guillén Rodríguez, Beatriz del Socorro Bolívar Cimé
y Edison Armando Díaz Álvarez (coordinadores),
se terminó de imprimir en diciembre de 2022,
en los talleres de Lectorum, S. A. de C. V., Belisario Domínguez núm. 17, loc. B,
col. Villa Coyoacán, CP 04000, Ciudad de México, tel. 5555813202.
Los interiores fueron impresos en papel bond blanco de 75 g.
Para su composición se utilizaron tipos Palatino de 11:15 y 30:34 puntos.
Edición y maquetación: Arturo Reyes Isidoro y Aída Pozos Villanueva.

Los bosques nos prestan valiosos servicios que necesitamos para nuestra vida diaria, sin embargo, desde el comienzo de la humanidad han estado bajo una gran presión. En *LA INVESTIGACIÓN FORESTAL EN TIEMPOS DE CAMBIO GLOBAL: PROBLEMÁTICAS Y PERSPECTIVAS*, en forma simple y amena se expone al lector común una compilación de la investigación que se lleva a cabo en el Instituto de Investigaciones Forestales de la Universidad Veracruzana.

Por una parte, se muestran las amenazas que sufren los ecosistemas forestales, desde el cambio climático que afecta a los bosques de montaña, pasando por la pérdida de cobertura vegetal, hasta llegar a los ambientes antropizados, en donde los bosques se han reducido a muy pequeñas islas verdes en un mar de concreto.

Por otra parte, se presentan las técnicas y herramientas que se utilizan en la investigación forestal y se expone cómo estas ayudan al abordaje, desde una perspectiva científica, de los problemas ambientales que enfrentan los bosques, todo ello para contribuir a su entendimiento.

Finalmente, el lector hallará diversas propuestas como parte de posibles soluciones a la crisis ambiental que hoy se vive en nuestro planeta.

