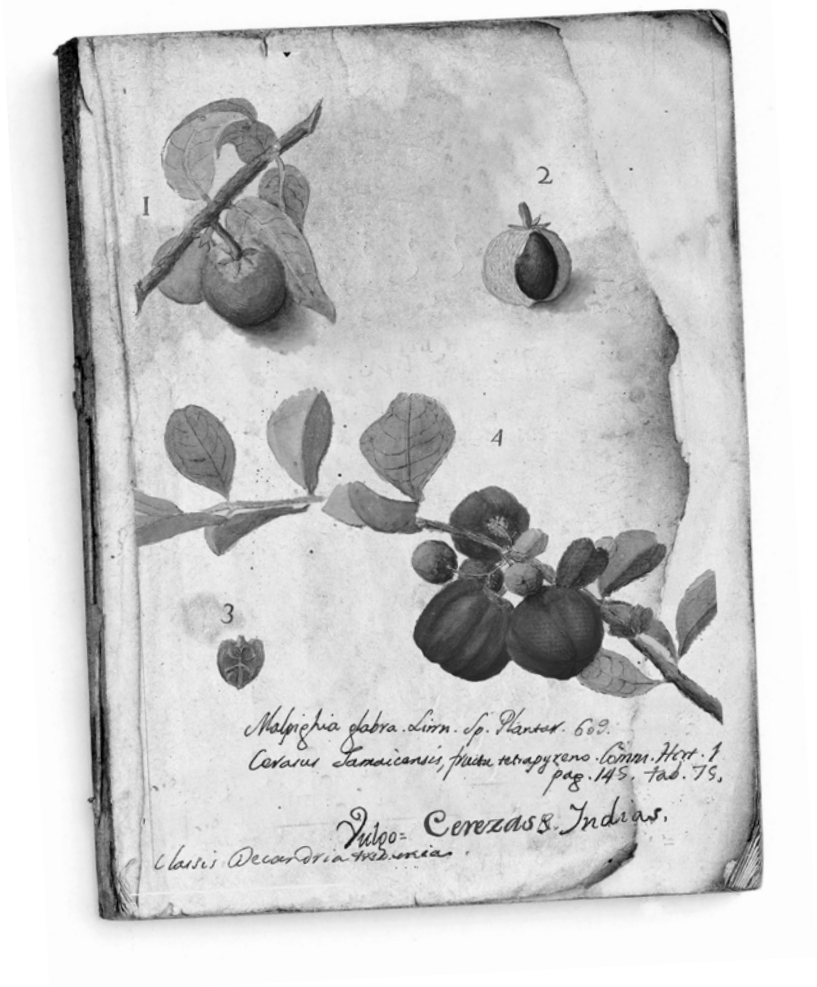


De los genes al cambio climático

Es evidente el deterioro ambiental que se percibe a escala local y a corto plazo, así como el que se vislumbra por efecto del cambio climático global. Ambos constituyen retos fundamentales para las ciencias ecológicas y la supervivencia de la vida sobre la Tierra. Para hacer frente a estos retos se requiere nuevos paradigmas en biología, tales como la ecología y evolución del desarrollo, el estudio de los sistemas complejos y las ciencias de la sustentabilidad. Estos tres ejes de estudio de los sistemas ecológicos son sustento conceptual y motor de las investigaciones que se realizan en nuestro departamento.

Los sistemas complejos

Gracias al avance en el estudio de los sistemas biológicos ha quedado demostrado que el mundo vivo no se puede entender con modelos simples, relaciones de causalidad que relacionan una a una las variaciones en el comportamiento de los múltiples componentes de cualquier sistema vivo y de manera proporcional o lineal, en función del ambiente y sus perturbaciones. Esto es válido para todos los niveles de organización de la vida: desde los genes, las redes reguladoras o metabólicas y el funcionamiento y la diferenciación

E. Álvarez-B., A. L. Anaya, V. Barradas, M. Benítez, J. Campo, R. Cruz, A. Gamboa,

de las células, hasta los fenómenos ecosistémicos y globales —por ejemplo, aquellos que rigen la relación de los vegetales con los cambios atmosféricos, uno de los temas importantes de nuestras investigaciones.

Históricamente, la ciencia se ha dedicado principalmente a descomponer los sistemas en sus partes más pequeñas y a estudiar su comportamiento de manera aislada o, cuando mucho, en interacciones pareadas. A este enfoque se le conoce como "reduccionismo" y es útil, pero no suficiente para entender el comportamiento de los complejos sistemas biológicos.

La ciencia ahora se aboca también al estudio de las interacciones de muchos o todos los componentes de un sistema y de su comportamiento colectivo. Esto ha permitido estudiar cómo se autoorganizan los elementos que interactúan en un sistema y llegan a dar lugar a ciertos patrones y regularidades emergentes, una característica de los sistemas complejos. Por ejemplo, el desarrollo de los organismos es regular, pero no es simple, y sus patrones emergen como resultado de la acción concertada y compleja de muchos componentes genéticos, epigenéticos (cambios heredables aunque no codificados en el ADN), celulares, etcétera.

Desde la perspectiva de los sistemas complejos se puede analizar procesos micro, meso y macroscópicos. Por ejemplo, es posible elaborar algoritmos que ayuden a entender el efecto de los genes en rasgos visibles (en el fenotipo), y así poder entender el desarrollo, la ecología y la evolución.

Ecofisiología y evolución del desarrollo

El desarrollo es el proceso mediante el cual una célula fecundada o un cúmulo de células indiferenciadas (como las meristemáticas en las plantas) se diferencian y arreglan espacio-temporalmente en las estructuras tridimensiona-

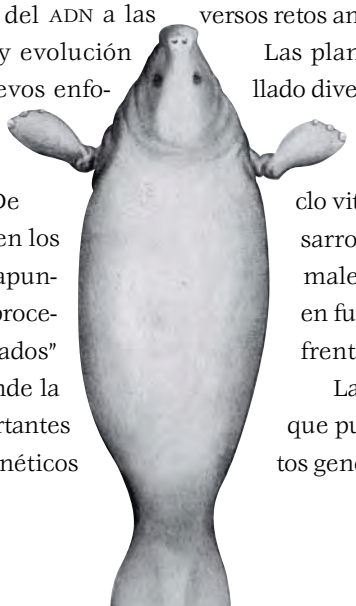
A. Garay, B. García, A. Mendoza, R. Pérez, A. Orozco, M. Sánchez, M. Sánchez y E. Solís

les de un organismo adulto en animales o en una estructura de una planta. El genotipo se expresa en los rasgos visibles que conforman el fenotipo de un ser vivo mediante mapeos complejos. En este proceso, al igual que durante el crecimiento, los seres vivos están expuestos a interacciones con otros seres vivos y a factores ambientales que también afectan su desarrollo. El estudio de tales relaciones se conoce como ecología del desarrollo.

La ecología del desarrollo reconoce que los procesos de diferenciación celular y morfogénesis dependen también de las condiciones ambientales en las cuales ocurren. En el marco conceptual de esta disciplina integradora se encuentran los nuevos hallazgos de la genética molecular y la epigenética (de las modificaciones químicas del ADN a las redes genéticas), así como de la ecología y evolución de la plasticidad fenotípica, aportando nuevos enfoques y perspectivas para el estudio en ecología, genética, evolución, biología de la conservación, biología del cáncer y medicina. De hecho, en contraste con la visión centrada en los genes o "genocentrista", los datos recientes apuntan a que el desarrollo es un conjunto de procesos de sistemas complejos dinámicos "anidados" (es decir, contenidos unos en otros), en donde la emergencia y la autoorganización son importantes y la interacción de factores genéticos, epigenéticos y ambientales, tanto bióticos, como abióticos, puede ser fundamental en el fenotipo adulto resultante.

Nuestras investigaciones han cristalizado en los primeros modelos de redes de regulación genética ancladas y validadas con datos de genética molecular para estudiar los procesos de diferenciación celular y morfogénesis en *Arabidopsis thaliana* (Brassicaceae), que es un sistema vegetal modelo.

Las redes de regulación genética propuestas exhiben comportamientos emergentes —la robustez, por ejemplo— ante perturbaciones tales como las mutaciones genéticas. Dichos comportamientos emergentes son cruciales para entender la plasticidad, las respuestas de las plantas ante diversos retos ambientales y la evolución de las formas vivas.



Las plantas son organismos sésiles y han desarrollado diversas estrategias que les permite adaptarse de manera plástica a las condiciones del medio que van experimentando a lo largo de su ciclo vital. Además, los vegetales no concluyen el desarrollo en su etapa embrionaria, como los animales, sino que van modificando su morfología en función de las condiciones ambientales que enfrentan a lo largo de su vida.

La regulación epigenética consiste en cambios que pueden ser hereditarios y se expresan en ciertos genes sin que se altere la secuencia de ADN; esto

ocurre por medio de las modificaciones postraduccionales de las histonas (proteínas que empaquetan el ADN y conforman la estructura de la cromatina) como la acetilación, metilación, fosforilación, ubiquitinación, etcétera. Este tipo de regulación parece tener un papel fundamental en los procesos de adaptación al medio. En *A. thaliana* existen varios ecotipos cuyas peculiaridades en el desarrollo dependen del hábitat en que crecen, principalmente en el hemisferio norte. Con estos ecotipos estudiamos el papel de los mecanismos epigenéticos en la regulación de factores transcripcionales tipo MADS-box como modelo de estudio.

Ya que en cualquier organismo pluricelular la morfogénesis depende de que haya un balance entre la tasa de proliferación y la diferenciación celular, hemos empleado *A. thaliana* para entender los procesos de desarrollo que están implicados en dicho balance, que es emergente en los sistemas morfogénicos. Más aún, debido a que este comportamiento es particularmente robusto en las plantas, su estudio puede brindar información importante respecto de cómo evitar la ruptura de tal balance y, con ello, el concomitante surgimiento de malformaciones y tumoraciones.

En cuanto a la gran mayoría de las enfermedades —que también son sistemas complejos y emergen como resultado de la interacción de los organismos con el ambiente circundante e implican cambios tanto genéticos como epigenéticos, ambos potencialmente heredables—, hemos iniciado una colaboración con el Instituto Nacional de Medicina Genómica para realizar estudios comparativos de redes genético-metabólicas en plantas y algunos tipos de cáncer con el fin de usar las primeras como sistemas experimentales vivos para explorar las bases complejas de la ruptura del equilibrio entre proliferación y diferenciación celular en diversas condiciones metabólicas y ambientales.

El desarrollo no puede explicarse solamente en términos de los genes y sus interacciones con componentes en el cigoto, o de las células indiferenciadas en un meristemo vegetal. Es necesario entenderlo en interacción constante con el ambiente en que se desenvuelve un ser vivo. Por ello, los estudios de ecología fisiológica y del desarrollo son fundamentales para entender la ecología de las especies bajo estudio.

Específicamente, nos hemos enfocado en estudiar los cambios metabólicos que tienen lugar en semillas de diferentes especies de plantas cuando son sometidas a distintas condiciones de humedad, particularmente con relación a la movilización de sustancias de reserva. Estamos comparando los transcriptomas (conjunto de genes transcritos o expresados en cierto momento) de semillas de *A. thaliana* y de *Wigandia urens* (Hydrophyllaceae) que hayan crecido tanto en el medio silvestre como cultivadas en laboratorio. Los resultados de tales análisis permitirán entender mejor el acondicionamiento natural que lleva a una mayor velocidad de germinación y un mejor desempeño de las plántulas de las especies estudiadas.

En las angiospermas, el llamado tiempo de floración es un proceso en el que intervienen señales endógenas depen-

dientes del estado de desarrollo, pero que resultan fuertemente influenciadas por las condiciones ambientales o estacionales. Pese al gran esfuerzo que se ha puesto en entender la transición a la floración, aún no conocemos del todo sus bases genético-moleculares y fisiológicas. Nosotros utilizamos plantas mutantes y líneas de sobreexpresión de genes de la familia MADS-box para contribuir al conocimiento de las redes genéticas que participan en este proceso. Ya hemos caracterizado varios nuevos genes reguladores de la transición a la floración.

Otra familia de proteínas reguladores del desarrollo son las DUF642, privativas de las plantas, y cuyas funciones eran desconocidas hasta antes de nuestros estudios. Nos interesa entender su función en la germinación y en otras etapas del desarrollo vegetal. Esta familia de proteínas parece ser importante en diversas etapas del desarrollo, es específica de plantas con semillas (gimnospermas, como pinos y cipreses) y con flores (angiospermas), y está muy conservada. Las proteínas estudiadas hasta el momento se encuentran localizadas en las paredes celulares de las plantas, que son compartimentos dinámicos y cambian tanto en composición como en estructura durante el desarrollo en respuesta a señales ambientales.

El estudio de los sistemas vivos y ecológicos bajo el enfoque de las ciencias de la complejidad está ayudando a formular nuevas preguntas, obteniendo novedosas respuestas e impulsando la biología integrativa en una perspectiva ecológica y evolutiva.

La evolución del desarrollo individual

La acción de los genes en los patrones y procesos de desarrollo y los rasgos del fenotipo de los organismos vivos son expuestos a las fuerzas evolutivas en un largo plazo, dando lugar a la evolución del desarrollo. Estudiarlo es entonces fundamental para la biología evolutiva porque: 1) algunos rasgos o genes cruciales en los procesos de diferenciación celular o morfogénesis pueden ser útiles para reconstruir la historia filogenética de los organismos. Esto es cierto, a pesar de que sabemos que el desarrollo de un organismo no recapitula su historia evolutiva; 2) las particularidades del desarrollo de un linaje particular pueden restringir la evolución y explicar por qué hay combinaciones de estructuras que no se dieron durante la evolución —por ejemplo, tetrápodos con alas como extremidades adicionales; y 3) explicar cómo es que las mutaciones pequeñas pueden ocasionar cambios grandes en los fenotipos.

Investigamos un caso paradigmático de este último tipo: las causas proximales (mecanismos moleculares) y la últimas (evolutivas) del plan floral único de *Lacandonia schismatica*, cuya flor tiene los estambres centrales rodeados de carpelos, en contraste con lo que ocurre en la mayor parte del resto de las angiospermas hermafroditas, que tienen las estructuras femeninas (carpelos) en el centro. El cambio de patrón espacio-temporal de la expresión de un gen homeótico (cuya mutación determina un cambio en la posición de una estructura espacial por otra estructura de distinta iden-

tidad) parece ser la base del fenotipo floral único de esta especie endémica de los bosques tropicales chiapanecos.

La ecología química

Las interacciones que las plantas establecen entre sí, con su medio y con otros organismos, intermediadas por sustancias químicas (aleloquímicos y feromonas) pueden ser cruciales para comprender los patrones emergentes en comunidades vegetales. Estas substancias están constituidas por compuestos provenientes de las vías metabólicas secundarias, las cuales se encuentran a su vez íntimamente relacionadas con las vías que dan origen a los metabolitos primarios. El papel de los metabolitos secundarios es vital, ya que enlazan a los seres vivos en una red que subyace a la dinámica de los individuos, poblaciones, comunidades y ecosistemas.

La alelopatía se define como "cualquier proceso que involucre metabolitos secundarios producidos por plantas, algas, bacterias y hongos, y que influya sobre el crecimiento y desarrollo de sistemas biológicos". Los estudios de alelopatía en México se iniciaron en la estación biológica de la UNAM en los Tuxtlas, Veracruz, dentro del proyecto "Regeneración de selvas" dirigido por Arturo Gómez-Pompa. La pregunta básica en esos estudios se refería a la importancia del potencial alelopático o aleloquímico de algunas plantas en la dinámica de la sucesión secundaria. Uno de los primeros resultados fue que *Piper auritum* (Piperaceae) inhibe la germinación y crecimiento de otras plantas por medio del ß-pineno, y que *Ambrosia cumanensis* (Asteraceae) produce y libera al medio lactonas sesquiterpénicas que, dependiendo de su concentración, inhiben o estimulan el crecimiento de otras plantas y de ella misma, contribuyendo así a autocontrolar a su población.

Actualmente estamos realizado estudios de ecología química en la Reserva Ecológica El Edén, Quintana Roo, en donde los árboles poseen defensas químicas muy efectivas. Los metabolitos secundarios de la rutácea *Stauranthus perforatus* y la euphorbiácea *Sebastiania adenophora* desempeñan un papel multifuncional de gran importancia para las interacciones ecológicas, y que los aleloquímicos pueden también ser fundamentales para los hongos micorrízico-arbusculares y los endófitos —que constituyen un vasto campo de investigación y una fuente potencial de compuestos susceptibles de ser utilizados como plaguicidas, reguladores del crecimiento, medicinas y otras drogas.

Los estudios de alelopatía también son cruciales para entender la dinámica de los agroecosistemas. Nuestros estudios han mostrado que en los agroecosistemas tradicionales la heterogeneidad biótica se corresponde a su vez con una heterogeneidad química, y ambas, en sí mismas, constituyen formas de protección, determinadas también por la gran disponibilidad de pequeños hábitats y las numerosas fuentes de alimento. Este tipo de sistemas de policultivo son mucho más resilientes que los monocultivos.

En un cafetal tradicional bajo sombra en Coatepec, Veracruz, cuya estructura es semejante a la de un bosque templado caducifolio, encontramos que el suelo bajo los cafetos (*Coffea arabica*, Rubiaceae) contiene compuestos capaces de inhibir el crecimiento de algunas plantas que conviven con ellos. Asimismo, en una chinampa tradicional de Xochimilco encontramos que el control de las malezas se ejerce por la mezcla de aleloquímicos de las diversas plantas que ahí crecen. El polen del maíz es fuertemente alelopático y al aplicarse sobre plantas modelo inhibe el crecimiento. Se hicieron investigaciones semejantes en Tlaxcala con un policultivo de maíz, frijol, calabaza y alfalfa rodeado de plantas cuyas hojas se utilizan como abonos verdes y que reducen la abundancia de malezas e incrementan la producción de frijol y calabaza.

También estamos estudiando las bases bioquímicas de la interacción alelopática de una maleza endémica de México, el "chayotillo" (*Sicyos deppei*, Cucurbitaceae) y el jitomate (*Solanum lycopersicon*, Solanaceae). Nuestros resultados revelan que los aleloquímicos retrasan la germinación del jitomate al interferir con eventos metabólicos necesarios durante su germinación, como la movilización de las reservas, el ablandamiento del micropilo y el catabolismo del ABA. Estos resultados pueden ayudar a entender las

interacciones de especies y el efecto de la inclusión de nuevas especies en un sistema.

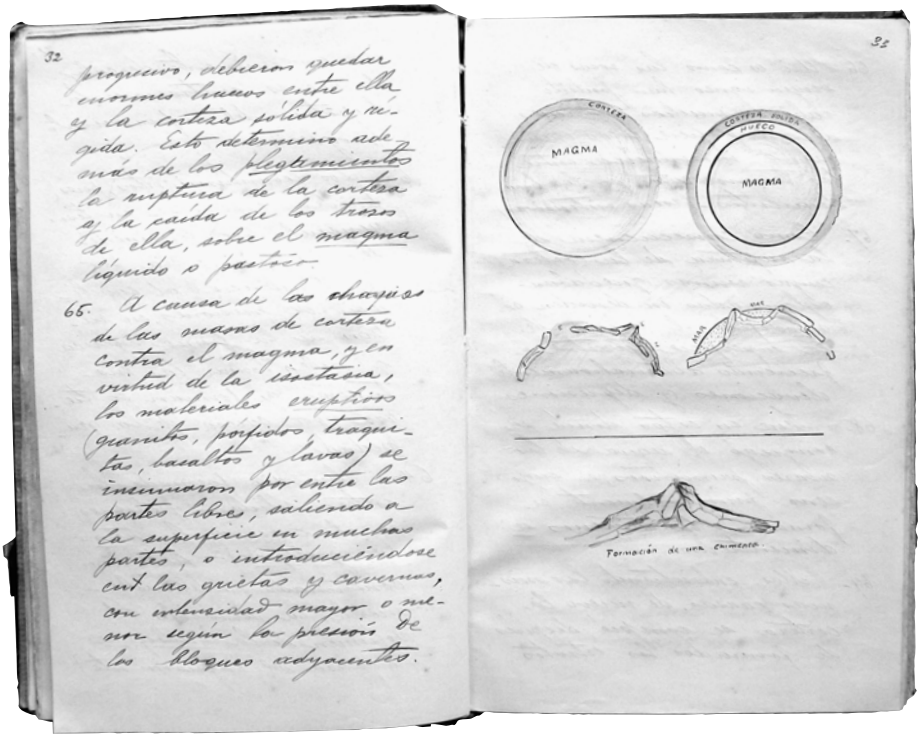
Finalmente, estamos estudiando el comportamiento de algunas plantas que son importantes indicadores de la resiliencia de un ecosistema y pueden acumular metales tóxicos del suelo. La resiliencia es la capacidad de un sistema de absorber una perturbación, evitando el cambio a un nuevo estado estable o de equilibrio. Por ejemplo, el aluminio en su forma Al^{3+} es tóxico, pero bajo condiciones de pH ácido se solubiliza en el suelo y entonces puede ser absorbido por algunas plantas. La acidez del suelo se puede dar por razones naturales o por un uso excesivo de fertilizantes nitrogenados. Hemos encontrado que *Conostegia xalapensis* (Melastomataceae) es capaz de crecer en suelos ácidos con altas concentraciones de Al^{3+}, como los de los potreros y selvas secundarias o acahuales, pero no en el bosque tropical primario, en cuyo suelo no se encuentra este elemento.

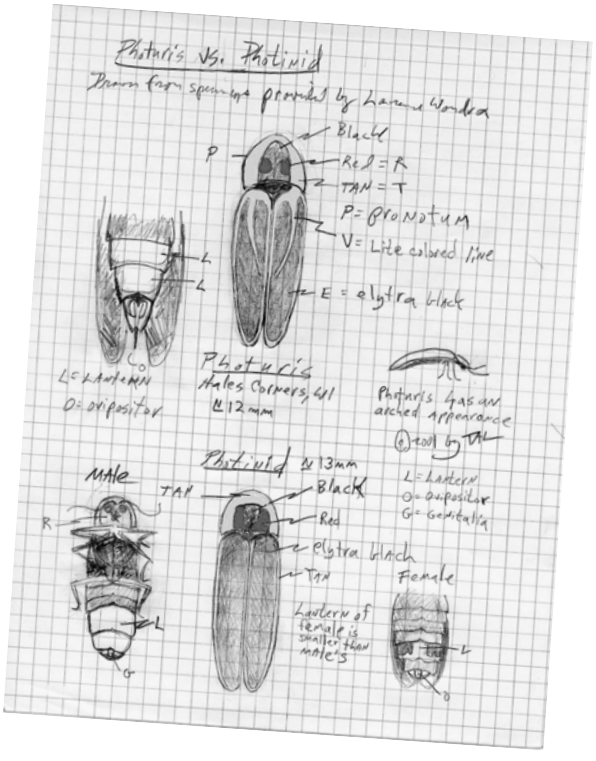
La interacción de las plantas y la atmósfera

Los estudios sobre las interacciones de las plantas y la atmósfera son relevantes para entender la forma en que los distintos comportamientos ecofisiológicos se aprecian en los patrones de distribución y abundancia de las plantas. Asimismo, estos estudios sirven para analizar los efectos que en el ambiente puede tener la perturbación de los diferentes ecosistemas por el cambio de uso del suelo y las relaciones que se puedan dar mediante la retroalimentación que tiene lugar entre el ambiente y el sistema vegetal (A-SV-A). Tales relaciones deben entenderse también para la restauración, la conservación ecológica y el manejo de recursos.

Estamos formulando modelos de carácter físico-biológico-ecológico que permitan predecir o simular escenarios hipotéticos de captura de agua y bióxido de carbono cuando cambia el uso del suelo y se introducen nuevas especies de plantas productivas en ecosistemas naturales, así como para estudiar los posibles efectos de diferentes tipos de manejo de recursos.

Frente a los escenarios de cambio climático es imperativo estudiar cómo las actividades humanas pueden impactar la sustentabilidad de los ecosistemas al modificar la cobertura vegetal y alterar el ciclo de los elementos. Los bosques tropicales son, tanto globalmente como a escala nacional, los ecosistemas que sufren mayor presión humana en cuanto a su extensión por las actividades agrícolas y ganaderas. Tales ecosistemas ejercen una influencia desproporcionadamente grande sobre el ciclo del carbono terrestre. Aun cuando estos bosques ocupan aproximadamente sólo la décima parte de la superficie terrestre, contienen más de





40% del carbono en la biósfera terrestre, y participan con al menos un tercio del intercambio anual de dióxido de carbono (CO_2) entre la atmósfera y la biósfera, así como del carbono orgánico almacenado globalmente en los suelos. Por todo ello, los pequeños cambios en los flujos de CO_2 que ocurrieran en tales ecosistemas podrían tener impacto suficiente como para modificar el balance global de carbono, el clima y la composición atmosférica.

Nuestros estudios en Morelos y Yucatán han permitido determinar los principales factores ambientales que limitan la productividad de los bosques ubicados en esas regiones semiáridas, denominados bosques tropicales estacionalmente secos. Más recientemente se ha determinado también la capacidad de captura de carbono de tales bosques en Yucatán, buscando estrategias alternativas que permitan incrementar dicha capacidad.

Para la simulación de escenarios futuros es fundamental determinar si existen reglas de interacción de los bioelementos, y explorar qué tan robusto y flexible es el funcionamiento ecosistémico. Los modelos que se usarán para integrar estos datos a nivel ecosistémico son muy similares a los usados para el estudio de los sistemas complejos en niveles de organización inferiores como son las redes genéticas.

La sustentabilidad

El enfoque de los sistemas complejos es crucial para la generación de una nueva ciencia de la sustentabilidad. La mayor parte de nuestros proyectos están motivados por la intención de coadyuvar al manejo sustentable de los ecosistemas naturales y antropogénicos. Usamos enfoques tanto dinámicos y de sistemas complejos —adoptando una postura "precautoria" en torno a las posibles afectaciones al ambiente— así como una visión alternativa que busca lograr transformación sustentables basadas en el desarrollo, la adaptación dinámica y la mitigación a partir de la innovación tecnológica.

Dado que un uso ineficiente de los recursos naturales eventualmente puede llevar a puntos de no retorno en las comunidades vivas o en los ecosistemas, debemos más bien enfocarnos en la resiliencia de los ecosistemas como criterio de sustentabilidad para evitar, por ejemplo, que a un bosque tropical —con una gran diversidad de especies— una perturbación lo deje dominado por una sola especie como *Pteridium aquilinum*, un helecho que produce químicos que inhiben (alelopáticos) el crecimiento de otras plantas.

Es decir, al maximizar la eficiencia de algún componente en un sistema complejo sin considerar sus interacciones con otros se le puede llevar a deshacerse de la redundancia, que confiere resiliencia —y robustez— al sistema ecológico, esto es, su capacidad de permanecer sustentable.

En el mismo sentido, pero en otra escala, se puede alterar la robustez de las redes genéticas y de los procesos del desarrollo, por ejemplo, al efectuar modificaciones genéticas (por medio de la biotecnología) que solamente buscan la producción eficiente de alguna proteína. Este cambio en la robustez puede hacer que, al ser liberado el organismo en el ambiente natural, las redes afectadas produzcan cambios fenotípicos no esperados, generando así una afectación que puede ser irreversible en una escala macro. Este aspecto nos ha preocupado mucho, pues la liberación de transgénicos puede afectar de manera no deseable e irreversible

la diversidad de cultivos en sus centros de origen (como es el caso del maíz en México).

Por otra parte, los umbrales a los cuales cambia un ecosistema de un estado a otro pueden ser afectados por el ser humano. Esto sucede cuando los seres humanos tratan de controlar un sistema o lo alteran extrayendo uno o varios de sus recursos (por ejemplo agua, minerales, alguna especie vegetal o animal, o liberando transgénicos). Algunos de los nuevos estados son reversibles, pero otros no.

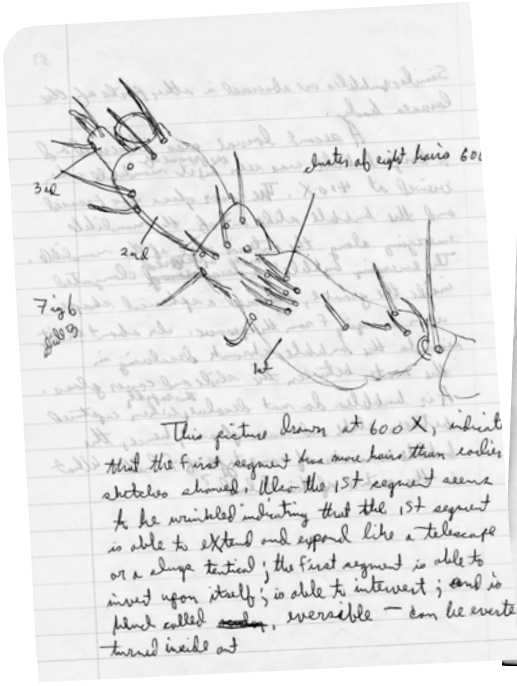
En algunos sistemas muy alterados, como el del Valle de México, hemos participado en proyectos de restauración para recuperar la resiliencia y los estados estables más deseables con base en los conocimientos profundos de la biología de las especies vegetales, que una vez reinstaladas pueden coadyuvar a la rehabilitación de elementos clave para la restauración de los ecosistemas. Ésta debe hacerse antes de que los sistemas estén demasiado perturbados y se haya pasado de cierto umbral, a partir del cual ya no es posible recuperar la resiliencia. Como dicen S. F. Gilbert y D. Eppel: "la relación de un organismo en desarrollo y sus entornos medioambientales es crucial para el futuro del planeta".

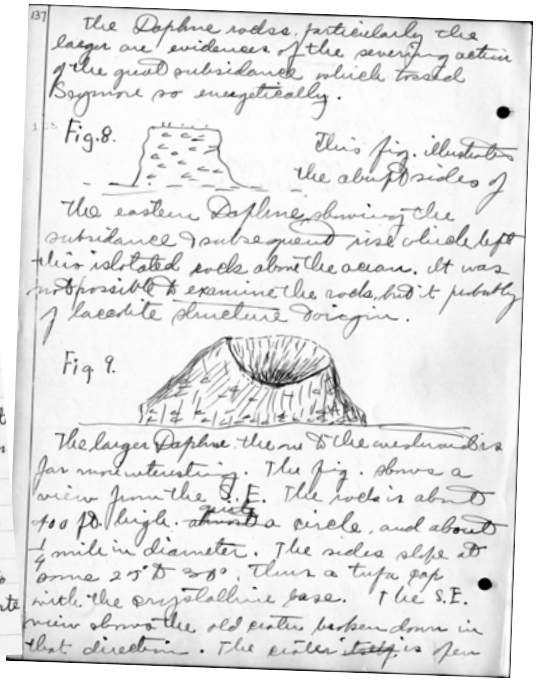
La restauración ecológica

El valle de México se ha ido transformando en zonas industriales y habitacionales, con la consecuente deforestación y pérdida de sus áreas agrícolas. Con la desaparición de estos ecosistemas no sólo se pierde la biodiversidad, sino que se alteran o se pierden los servicios que proporcionan, como son la captación de bióxido de carbono, la producción de oxígeno, la fertilidad del suelo y, de manera muy importante, la captación e infiltración de agua para la recarga de los acuíferos que abastecen a la ciudad.

La Barranca de Tarango, en la delegación Álvaro Obregón, es un ejemplo de las acciones que se pueden emprender para restaurar y conservar los bosques del Distrito Federal. Mediante sistemas de información geográfica ha sido posible elaborar mapas de unidades geomorfológicas y de vegetación, con los cuales se ha identificado aquellas zonas que aún conservan parte de la vegetación original que consistía en bosque de encino. De las 161 especies de encinos reportadas para el país, 14 se encuentran en el D.F. y 50% de éstas se localiza en la Barranca de Tarango. Actualmente, tales especies son dominantes en los bosques remanentes. Los estudios sobre fenología realizados en ellos, la regeneración natural de encinos y la introducción de especies nativas (encinos, tejocotes y capulines) han brindado información relevante para la restauración. La caracterización de variables ambientales y edáficas, así como la elaboración de mapas de suelos, de las pendientes y su orientación son también fundamentales para llevar a cabo acciones de restauración ecológica en la zona.

Otros esfuerzos de restauración ecológica en el Ajusco Medio y en algunas zonas del trópico húmedo mexicano se han abocado a preparar artificialmente las plántulas para tolerar las condiciones adversas prevalecientes en los pro-





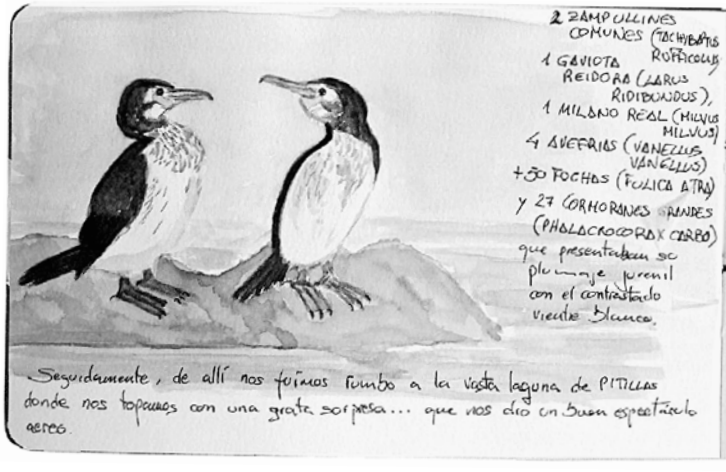
gramas de restauración ecológica, y generar métodos que nos permitan incorporar los elementos del paisaje y usar aquellos desarrollados en la agricultura para producir plantas más vigorosas, capaces de enfrentar su ambiente. También se están identificando las principales limitaciones que impiden la regeneración de bosques tropicales en las áreas abandonadas del sureste y el centro del país, así como las potencialidades de diferentes especies nativas para favorecer el reestablecimiento rápido de la cobertura vegetal en zonas semiáridas.

Retos y perspectivas

Bajo el paraguas de los cambios paradigmáticos que resultan del estudio de los sistemas complejos, la ecología y evolución del desarrollo, y las ciencias de la sustentabilidad, nuestros estudios tienen en común el análisis de los patrones y procesos ecológicos a fin de desentrañar aspectos estructurales y funcionales que son clave para entender cómo se pasa, conecta o mapea de un nivel de organización inferior a otro superior —por ejemplo, de los genes a los fenotipos de los organismos, de las interacciones químicas de las plantas a los patrones emergentes en sus comunidades, o de éstas y la atmósfera a los ciclos biogeoquímicos o a los patrones del clima.

También combinamos estudios de lo proximal, que tratan de contestar el cómo —la genética molecular, la ecofisiología y el desarrollo— con estudios guiados por preguntas evolutivas últimas, que buscan contestar el por qué de un patrón o un proceso.

Cualquier actividad humana privada o pública debe ser vista como un sistema que está fuertemente acoplado social, ambiental y económicamente en diferentes escalas, desde la explotación de un recurso particular (por ejemplo, una especie de uso maderable), hasta una actividad extractiva privada o pública que impacta de manera más obvia todo un ecosistema (una mina), o desde el manejo tradicional de una comunidad, hasta la escala regional y global. En este sentido, la resiliencia debe ser considerada como una característica universal que cristaliza la sustentabilidad de un sistema natural y antropogénico.



El reto en las ciencias de la sustentabilidad es poner como eje rector el respeto y la recuperación de la resiliencia de los ecosistemas y el bienestar social con justicia para todos. Si el desarrollo humano sigue privilegiando la generación de dinero y la productividad por encima de los criterios de sustentabilidad e interés social nos iremos acercando a los umbrales de cambio a equilibrios estables no deseables en los ecosistemas, con pocas posibilidades de retorno.

Para ello es necesario privilegiar una visión precautoria, eminentemente científica, comprometida con el bienestar social y la sustentabilidad, así como con la búsqueda de estrategias de restauración ecológica. Pero también realizar actividades de vinculación que permitan crear conciencia acerca de esta dinámica perturbadora que resulta de planes de desarrollo no sustentables y de la intervención de tecnologías animadas primordialmente por el lucro. Aquellas que dependen y transforman a los seres vivos corren el riesgo de escaparse del control de sus "creadores" y desencadenar consecuencias irreversibles, no deseables e impredecibles, dada la naturaleza misma de los sistemas complejos que se intervienen.

Elena Álvarez-Buylla, Ana Luisa Anaya, Víctor L. Barradas, Mariana Benítez, Julio Campo, Rocío Cruz Ortega, Alicia Gamboa, Adriana Garay Arroyo, Berenice García Ponce de León, Ana Mendoza, Rigoberto Pérez, Alma Orozco, María Esther Sánchez Coronado, Mari Paz Sánchez Jiménez y Enrique Solís

Instituto de Ecología,
Universidad Nacional Autónoma de México.

Referencias bibliográficas

Álvarez-Buylla, E. R., M. Benítez, A. Corvera-Poiré, Á. Chaos Cador, S. de Folter, A. Gamboa de Buen, A. Garay-Arroyo, B. García-Ponce, F. Jaimes-Miranda, R. V. Pérez-Ruiz, A. Piñeyro-Nelson y Y. E. Sánchez-Corrales. 2010. "Flower Development", en *The Arabidopsis Book* (disponible en 8:e0127.doi:10.1199/tab.0127elocation-id: e0127).

Flores-Carmona, M. C., R. Cruz-Ortega y A. L. Anaya. 2008. "Allelopathic potential of some tropical trees from the Ecological Reserve El Eden, Quintana Roo, Mexico", en *Allelopathy Journal*, vol. 21, núm. 1, pp. 57-72.

Gamboa A. M., C. Hidalgo, F. de León, J. D. Etchevers, J. F. Gallardo y J. Campo. 2010. "Nutrient addition differentially affects soil carbon sequestration in secondary tropical dry forests: Early- vs. late-succession stages", en *Restoration Ecology*, vol. 18, núm. 2, pp. 252-260.

Gilbert, S. F. y D. Epel. 2009. *Ecological Developmental Biology: Integrating Epigenetics, Medicine, and Evolution*. Sinauer Associates, Sunderland.

González-Zertuche L., C. Vázquez-Yanes, A. Gamboa, M. E. Sánchez-Coronado, P. Aguilera y A. Orozco-Segovia. 2001. "Natural priming of *Wigandia urens* seeds during burial: effects on germination, growth and protein expression Seed", en *Science Research*, vol. 11, núm. 1, pp. 27-34.

Lara-Núñez, A., S. Sánchez-Nieto, A. L. Anaya Lang y R. Cruz-Ortega. 2009, "Phytotoxic effects of *Sicyos deppei* (Cucurbitaceae) in germinating tomato seeds", en *Physiologia Plantarum*, vol. 136, núm. 2, pp. 180-192.

Velazquez-Rosas N., V. L. Barradas, S. Vasquez-Santana, R. Cruz-Ortega, F. García-Jiménez, E. Toledo-Alvarado y A. Orozco-Segovia. 2010. "Optical and morpho-functional traits of the leaves of treespecies growing in a mountain cloud forest", en *Acta Oecologica*, núm. 36, pp. 587-598.

Imágenes

P. 54: C. G. Ortega, *Cerezas de Indias*, Real Jardín Botánico, siglo xviii. P. 55: página del Diario de Malaspina, siglo xviii. P. 56: Antonio Pineda, *Anatomías*, siglo xviii; *Manuscrito Voynich*, siglos xv-xvi; *Manatí*, Real Jardín Botánico, siglo xviii. P. 57: *Manuscrito Voynich*, siglos xv-xvi; B. Siglo Carmona, *Couroupita Guianensis*, Real Jardín Botánico, siglo xviii; George Crabbe, cuadernos de notas, siglo xix. P. 58: John Covel, cuadernos de notas, 1660-1713; José Guio, *Nicotiana*, siglo xviii; pliegos del herbario de Luis Neé, siglo xviii; Haenke Tadeo, *Palma*, 1794. P. 59: Cardero, *Bienteveo de Acapulco*, siglo xviii; José Guio, *Cactus*, siglo xviii; José Guio, *Estudio de insectos*, Acapulco siglo xviii. P. 60: John Smith, cuadernos de notas, 1888-1896; cuadernos de campo de la Estación Biológica de Doñana, España, siglo xx; Terry Lynch, boceto, 2001; notas de sismología y vulcanología, *ca.* 1939. P. 61: José A. Sensianes Ortega, *Apuntes marismeños*; Louis Agassiz Fuertes, *Halcón*, 1930. P. 62: Alban Stewart, *Notas sobre las islas Galápagos*, 1905-1906; Juan Carlos Gálvez, cuadernos de apuntes; Terry Lynch, cuaderno de notas. P. 63: José Javier Friás, *Vivencias de la Naturaleza*. P. 64 *Home naturalist*, manual, siglo xix.

From genes to climate change: new paradigms and challenges for functional ecology

Palabras clave: alelopatía, cambio climático, ciclos biogeoquímicos, ecofisiología, ecología y evolución del desarrollo, redes genéticas, sistemas complejos y sustentabilidad.

Key words: Allelopathy, Climate Change, Biogeochemical Cycles, Ecophysiology, Ecology and Evolution of Development, Genetic Networks, Complex Systems and Sustainability.

Resumen: En este texto se abordan los nuevos paradigmas de la ecología y evolución del desarrollo, el estudio de los sistemas complejos, y las ciencias de la sustentabilidad.

Abstract: This article discusses new paradigms in ecology and evolution of development, the study of complex systems, and the sciences of sustainability.

Todos los autores de este texto pertenecen al Departamento de Ecología Funcional del Instituto de Ecología de la unam en donde se estudian desde los genes y sus interacciones —para entender cómo se desarrollan los seres vivos bajo condiciones ambientales contrastantes—, hasta el funcionamiento de los ecosistemas y los efectos potenciales del cambio climático.

Recibido el 13 de abril de 2011, aceptado el 4 de mayo de 2011.