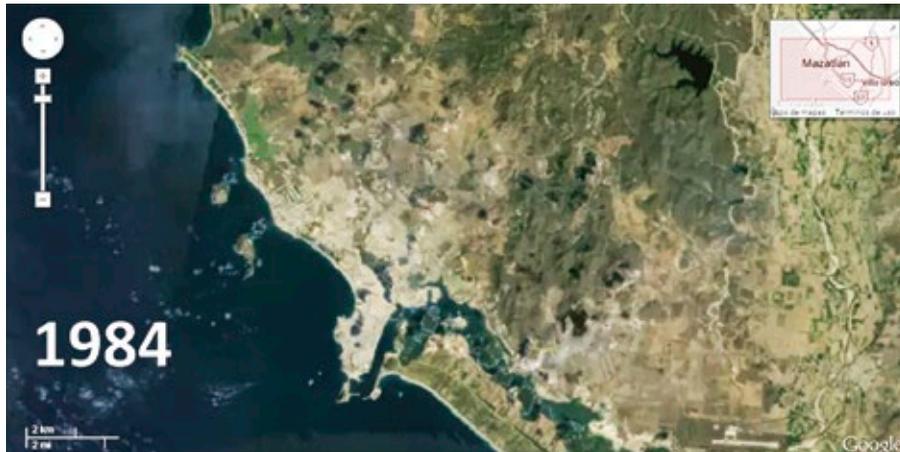


## ECOSISTEMAS EN TRANSFORMACIÓN: del paisaje a los genes

OLIVIA MILLÁN AGUILAR<sup>1</sup>, MARLENNE MANZANO SARABIA<sup>1, 3</sup>,  
MIGUEL ÁNGEL HURTADO OLIVA<sup>1</sup>, ALEJANDRO NETTEL-HERNANZ<sup>2</sup>



La herramienta *Timelapse* permite apreciar las transformaciones y el crecimiento poblacional 1984-2012.

© <http://world.time.com/timelapse/>

Los ecosistemas a nivel mundial se están transformando aceleradamente, como se puede advertir en *Timelapse*, una aplicación dinámica desarrollada por la revista *Time* y Google Inc., que utiliza imágenes satelitales del Programa Landsat de la Agencia Espacial Estadounidense (NASA, por sus siglas en inglés), la cual permite explorar la transformación del planeta durante el periodo comprendido entre 1984 y 2012 (<http://world.time.com/timelapse/>). El crecimiento poblacional y los fenómenos climáticos se encuentran entre los factores más importantes que han modificado la estructura de los ecosistemas marinos y terrestres. Dichas transformaciones pueden ser observadas en diferentes escalas, siendo recurrentes los estudios en el nivel de paisaje, cuyos cambios se abordan a través de una disciplina llamada *ecología del paisaje*, que fue definida como el estudio de toda la com-

plejidad de relaciones causa-efecto que existen entre las comunidades de seres vivos y sus condiciones ambientales en una sección específica de paisaje.<sup>1</sup> Determinar la pérdida de hábitat, la fragmentación del paisaje, el deterioro de los bosques, selvas o humedales, son algunos retos a los cuales se ha enfrentado la comunidad científica. Para afrontarlos, los científicos han desarrollado herramientas innovadoras desde hace décadas, tales como técnicas aplicadas en la micro (genéticas, moleculares) y macroescala (satelitales). Así nace la *genética del paisaje*, disciplina a la que se le han adjudicado varias definiciones; la más común la describe como “una fusión de la genética de poblaciones y la ecología del paisaje”,<sup>2</sup> lo que significa que por medio de ella se pueden evaluar cambios en la estructura genética de las poblaciones ocasionados por modificaciones en el paisaje. El origen de la *genética del paisaje* se remonta al siglo XIX cuando el botánico Augustin-Pyramus de Candolle (1778-1841) observó que los organismos siguen diferentes patrones de distribución a lo largo del

paisaje por distintas causas, refiriéndose a diferentes fuerzas evolutivas y que hoy pueden ser explicadas dentro del panorama de la biogeografía ecológica y la genética;<sup>2</sup> este estudio es considerado como un parteaguas de esta disciplina y por primera vez se menciona el concepto de genética del paisaje. Al ser un engranaje de diferentes disciplinas, la genética del paisaje no es considerada una ciencia independiente, por lo cual no posee un marco metodológico propio, sino que se desarrolla con los métodos de las disciplinas que la sustentan, esto es, que combina procedimientos de genética de poblaciones, ecología del paisaje y análisis estadísticos (estadística espacial) para su interpretación.<sup>3</sup> Esta conjunción de conocimientos coadyuva en la comprensión y explicación de las modificaciones en el paisaje y procesos microevolutivos como el *flujo génico*, la *selección natural* o la *deriva génica*.<sup>4, 2</sup>

### Factores de cambios en el paisaje

El paisaje es un sistema dinámico en constante transformación causado por factores humanos y/o naturales. Los primeros parten de términos socioeconómicos, de la búsqueda de obtener beneficios a pesar de que dichas modificaciones afecten –de manera directa o indirecta– los bienes y servicios que provee el ecosistema. Entre ellos encontramos el desarrollo urbano a través de la construcción de infraestructura turística o industrial, cambios de uso de suelo por expansión de actividades agrícolas o acuícolas, deforestación, entre otras. Por otra parte, los diferentes procesos o fenómenos asociados a variaciones naturales pueden cambiar la conformación de los ecosistemas, como sucede con los huracanes. Uno de los procesos que afectan el paisaje y que puede tener como consecuencia una pérdida de diversidad genética es la fragmentación, es decir, la disgregación de la cobertura original que crea fragmentos dentro de un área determinada, donde la vulnerabilidad del ecosistema se encuentra en función con el nivel de fragmentación.<sup>5</sup> La fragmentación está relacionada con otro término empleado en la *genética del paisaje*: la conectividad, también llamada *conectividad ecológica*. Esta condición de los ecosistemas puede contrarrestar los efectos que ocasiona la fragmentación en los mismos, al fomentar el flujo génico y propiciar el mantenimiento de la biodiversidad por conectividad entre las poblaciones.

### Cambios a nivel genético derivados de la transformación del paisaje

Las transformaciones en el paisaje afectan, por lo general, las poblaciones que lo conforman. Uno de los panoramas más frecuentes es la formación de barreras físicas que dan origen a la separación de los individuos, donde el principal efecto es la disminución de la migración entre las poblaciones que quedaron divididas. En una investigación reciente, se analizó la relación entre la dispersión de semilla del roble rojo (*Quercus castanea*) en la zona de Cuitzeo, Mi-



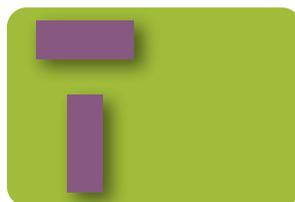
Transformaciones en el paisaje de Lázaro Cárdenas, Michoacán.  
© Imagen Landsat TM 5 en falso color (1990, 2008)

choacán, y los procesos de fragmentación, donde se tomaron muestras de adultos (antes de dichos procesos) y juveniles (establecidos después) situados en diferentes fragmentos. En los resultados se observó una correlación positiva entre la diversidad genética y el tamaño de los fragmentos para el caso de las plántulas. Aquí, la dispersión de semillas junto con la conectividad han disminuido por la fragmentación, pudiendo afectar directamente la biodiversidad de los bosques y la disminución de la densidad de esta especie.<sup>6</sup> Bajo un escenario donde el aislamiento entre las poblaciones es muy fuerte (nulo flujo génico), pudiera darse un caso de especiación por aislamiento reproductivo. Las especies migratorias son las que se ven más afectadas por transformaciones en el paisaje. Un ejemplo en el océano es el de las tortugas marinas, ya

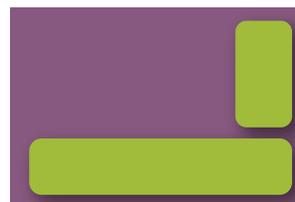
### CAMBIOS EN EL NIVEL DE PAISAJE



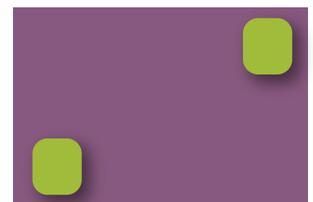
**INTACTO**  
menos del 10%  
de hábitat destruido



**SALPICADO**  
10-40%  
hábitat destruido



**FRAGMENTADO**  
40-60%  
hábitat destruido



**RELICTO**  
90%  
hábitat destruido

© Modificado a partir de Hobbs y Wilson (1998)

Aspecto actual del paisaje de la costa de Bahía de Kino, Sonora, dominado por granjas camaroneras.

Foto: © cortesía del doctor José Alejandro Rodríguez Valencia<sup>10</sup>



que estos organismos presentan la particularidad de regresar a anidar a la misma playa donde nacieron (conducta conocida como *filopatría*), pero durante su ciclo de vida realizan grandes migraciones entre su lugar de nacimiento y los lugares de reproducción y alimentación. El establecimiento de barreras físicas (como cambios en las corrientes marinas) impediría que regresaran a su lugar de origen. Tras generaciones, por esta separación pueden llegar a formarse poblaciones diferentes a nivel genético, pese a que se sigue considerando la misma especie. Si el aislamiento permanece por el suficiente número de generaciones, pudiese darse incluso un evento de especiación. Existen muchos estudios que abordan la filogenia de las tortugas marinas alrededor del mundo. Uno en particular muestra una fuerte similitud entre poblaciones de tortuga verde del Atlántico y poblaciones del Mediterráneo, sugiriendo una separación histórica causada por cambios en la temperatura de los océanos.<sup>7</sup>

Una de las actividades con mayor impacto en las últimas décadas es la práctica de la acuicultura, donde la instalación de la infraestructura requerida para tal actividad ha dado origen a la fragmentación y deterioro de grandes extensiones de humedales, como es el caso de los manglares (para conocer la importancia ecológica y económica de los manglares, consúltese el artículo “El valor de los manglares”).<sup>8</sup> La fragmentación y disminución de cobertura de estos ecosistemas conlleva a la pérdida de diversas especies por una reducción en la conectividad debido a la separación entre los fragmentos originados. Genéticamente, esta pérdida de conectividad se traduce como disminución de flujo genético.

Estas poblaciones aisladas pueden sufrir la pérdida de variabilidad genética por efecto del azar (fenómeno conocido como *deriva génica*). La presión antropogénica a la que son sometidos los manglares en las costas mexicanas merma su condición de salud, pudiendo ser que las poblaciones se eliminen o disminuyan drásticamente su número y pasen por un evento de cuello de botella por el que, junto con la privación de calidad de los servicios ambientales que ofrecen, se pierda a su vez su diversidad genética y tengan que pasar muchas generaciones para ver su recuperación. Las áreas de manglar en México están reduciéndose (se estima que de 1981 a 2005 la superficie de manglar en el país disminuyó 82,218 hectáreas),<sup>9</sup> por lo que deben implementarse medidas que mitiguen los daños causados, y que dichas poblaciones puedan recuperarse.

### Panorama actual y perspectivas

A la par del auge que han tenido las investigaciones sobre el cambio climático y sus repercusiones sobre los ecosistemas y su biodiversidad, se han podido resolver interrogantes sobre la genética y la ecología del paisaje, principalmente aquellas relacionadas con los cambios espacio-temporales de los ecosistemas y su relación con la diversidad genética de las poblaciones que los constituyen.

La ecología del paisaje y la genética del paisaje se han convertido en un apoyo fundamental en las áreas de la ecología y conservación de las especies. Bajo este enfoque, investigadores y estudiantes de posgrado de la Universidad Autónoma de Sinaloa, la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas con el apoyo de la Comisión Nacional para el Conocimien-

to y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), así como de investigadores de la agencia United States Geological Survey (USGS), están actualmente desarrollando diversos estudios en los ecosistemas de manglares a lo largo de la costa de Sinaloa, con el objetivo de analizar su estructura forestal, las tendencias de cambio en su cobertura, así como la respuesta de aquéllos ante la variabilidad climática. Con imágenes satelitales obtenidas en las últimas dos décadas se ha logrado observar la disminución en la extensión y condición de salud de los manglares en algunas regiones por diferentes procesos, entre los que destacan los de origen antropogénico (como la construcción de granjas acuícolas y la pérdida de fragmentos). En conjunto con el análisis de las métricas del paisaje, se han realizado también muestreos de individuos adultos y juveniles del mangle negro *Avicennia germinans*, para determinar si dichos cambios o modificaciones en el paisaje han tenido efecto en su diversidad genética. De confirmarse este escenario, se propondrán medidas emergentes que disminuyan estos efectos y permitan eventualmente su recuperación. Es importante que México, por medio de sus instituciones de educación superior y dependencias de gobierno, continúe con la monitorización del estado de conservación de los manglares, de los cuales dependemos por los diferentes bienes y servicios que proveen.

### Glosario

**Conectividad:** métrica del paisaje directamente relacionada con la fragmentación; entre mayor fragmentado esté un ecosistema, menor conectividad habrá entre sus componentes, alterando su estructura y biodiversidad.

**Deriva génica:** fuerza microevolutiva que reduce la heterocigosidad por pérdida de alelos en una pobla-

ción. Este efecto de disminución de la diversidad es más grande en poblaciones pequeñas.

**Ecología del paisaje:** disciplina que a su vez engloba otras herramientas, como la geografía y la biología, necesarias para interpretar las interacciones entre el paisaje y los componentes que lo conforman.

**Flujo génico:** movimiento de genes o alelos de una población a otra, permitiendo su homogeneización genética, o diferenciación en caso de que no exista. La migración es la principal causa del flujo génico.

**Genética poblacional:** rama de la genética que describe cómo se distribuye la variabilidad genética (frecuencias alélicas) en el seno de una población o entre poblaciones.

**Humedal:** extensiones de superficies cubiertas de agua (como marismas, pantanos), de origen natural o artificial, temporales o permanentes, salobres o saladas, cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros (Convención de Ramsar, Irán, 1971).

**Migración:** en términos de genética poblacional, se refiere al intercambio de genes entre una población y otra, o dentro de la misma.

**Selección natural:** adaptación de individuos por fijación generacional de genes o alelos más favorables en una población.

### Agradecimientos

Los autores agradecen los apoyos derivados de los proyectos PROFAPI-Universidad Autónoma de Sinaloa (2012/098; 2013/106), CONABIO LM004, a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas por el financiamiento recibido a través del Programa de Fortalecimiento a la Investigación, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgar la beca número 202595 a O. Millán Aguilar para realizar la tesis doctoral.



Cambios en la línea de costa de Sonora en 1993 y 2011 debido al incremento en el número de granjas acuícolas.

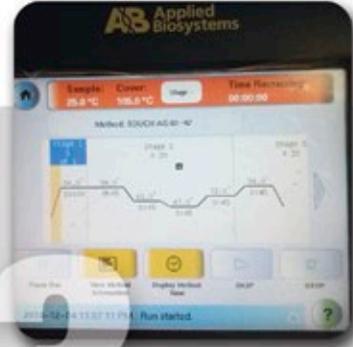
© U.S. Geological Survey



1  
Recolección de muestras de manglar



2  
Extracción de ADN



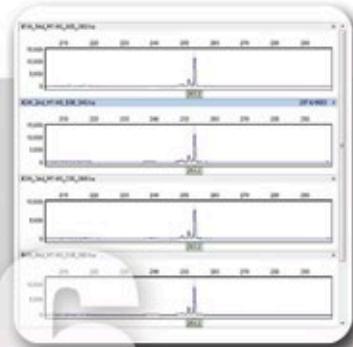
3  
Amplificación (PCR)



4  
Cromatograma de resultados



5  
Análisis de fragmentos de loci microsatelitales



6  
Visualización del producto Amplificado en gel de agarosa (1%)

Metodología del análisis de fragmentos de microsatélites, desde la recolección de muestras hasta el análisis de resultados.

### Bibliografía

- <sup>1</sup> Ferrari I., A. Ferrari. 2008. "From ecosystem ecology to landscape ecology: a progression calling for a well-founded research and appropriate disillusions", *Landscape Online* 6:1-12.
- <sup>2</sup> Manel S., M. K. Schwartz, G. Luikart y P. Taberlet. 2003. "Landscape genetics: combining landscape ecology and population genetics", *Trends in Ecology & Evolution* 18:189-197.
- <sup>3</sup> Holderegger R. y H. H. Wagner. 2008. "Land ahead: using genome scans to identify molecular markers of adaptive relevance", *Plant Ecology and Diversity* 1:273-283.
- <sup>4</sup> Holderegger R., D. Buehler, F. Gugerli y S. Manel. 2010. "Landscape genetics of plants", *Trends in Plants Science* 15:675-683.
- <sup>5</sup> Hobbs, R. J. y A. M. Wilson. 1998. "Corridors: Theory, Practice and Achievement of Conservation. Objectives" en J. W. Dover y R. G. H. Bunce (eds.), *Key Concepts in Landscape Ecology*, Preston, IALE, pp. 265-279.
- <sup>6</sup> Herrera Arroyo M. L., V. L. Sork, A. González Rodríguez, V. Rocha Ramírez, E. Vega y K. Oyama. 2013. "Seed-mediated connectivity among fragmented populations of *Quercus castanea* (Fagaceae) in a Mexican landscape", *American Journal of Botany* 100(8):1663-1671.
- <sup>7</sup> Bowen B. W., A. B. Meylan, J. P. Ross, C. J. Limpus, G.

H. Balazs, J. C. Avise. 1992. "Global population structure and natural history of the green turtle (*Chelonia mydas*) in terms of matriarchal phylogeny", *Evolution* 46:865-881.

- <sup>8</sup> Calderón, C., O. Aburto, E. Ezcurra. 2009. "El valor de los manglares", *Biodiversitas* 82:1-6.
- <sup>9</sup> Rodríguez Zúñiga M. T., C. Troche Souza, A. D. Vázquez Lule, J. D. Márquez Mendoza, B. Vázquez Balderas, L. Valderrama Landeros, S. Velázquez Salazar, A. Uribe Martínez, J. Acosta Velázquez, J. Díaz Gallegos, M. I. Cruz López y R. Ressler. 2012. *Los manglares de México: estado actual y establecimiento de un programa de monitoreo a largo plazo: segunda y tercera etapas. Informe final SNIB-CONABIO proyecto no. GQ004*. México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- <sup>10</sup> Rodríguez Valencia, J. A., D. Crespo y M. López Camacho. 2010. *La camaronicultura y la sustentabilidad del Golfo de California*. Disponible en <http://www.wwf.org.mx>.

<sup>1</sup> Laboratorio de Ecosistemas y Variabilidad Climática. Posgrado en Ciencias en Recursos Acuáticos. Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa.

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Biológicas. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

<sup>3</sup> Autor para correspondencia: mmanzano@uas.edu.mx