

# Los genes y la ecología

## Un nuevo enfoque en ecología evolutiva

◆  
KEN OYAMA

*¿Cuándo sabremos la historia verdadera de la vida?*

### Introducción

En la actualidad, el campo de estudio de la ecología se ha ampliado a tal grado que han surgido nuevas áreas de interés donde se intenta combinar la información de tipo ecológico con los conocimientos producidos en la biología molecular, la genética, el estudio del comportamiento, la morfología comparativa, la sistemática y la biogeografía. Una de las consecuencias de esta integración es el planteamiento de nuevos retos científicos a menudo comprendidos en un terreno donde es preciso definir nuevos conceptos y desarrollar un marco teórico inédito.<sup>1</sup>

En el nivel de los individuos o las poblaciones, cada vez resulta más común encontrar investigaciones que utilizan marcadores genéticos y moleculares<sup>2</sup> para resolver algún pro-

blema ecológico. La información genética en el nivel de proteínas y ADN es utilizada para describir numerosos aspectos del comportamiento, historias de vida y relaciones evolutivas entre organismos. Esto, naturalmente, ha incrementado el interés por el estudio de los sistemas naturales, sin dejar de considerar la evolución molecular como un elemento adicional al marco conceptual de la evolución.

En particular, dentro de la ecología evolutiva, se está generando una nueva área llamada *ecología molecular*, donde se pretende utilizar conceptos y métodos desarrollados en la biología molecular para resolver ciertos problemas ecológicos. Se intenta entender el papel que desempeñan uno o varios genes en la variación fenotípica de un organismo dentro de un entorno ecológico bien definido. El objetivo último es aislar y caracterizar directamente un gen o un conjunto de ellos que influyan en la variación de caracteres fenotípicos adaptativos. Este interés no es nuevo y, a lo largo de la historia de la ecología evolutiva, el análisis genético de problemas ecológicos ha estado presente desde principios de siglo.

### La ecología evolutiva

Seguramente, en algún momento de reflexión, cada uno de nosotros se ha planteado preguntas como las siguientes: ¿por qué ciertos organismos, incluido el hombre, viven más que otros?, ¿por qué hay animales que emigran a sitios muy alejados de su lugar de origen al aproximarse el invierno y otros que no lo hacen?, ¿por qué hay plantas que se reproducen sólo una vez durante todo su ciclo de vida mientras que otras lo hacen periódicamente cada año?, ¿por qué hay más especies en ciertas localidades que en otras?, ¿por qué los organismos no aprovechan de igual manera un mismo recurso y reaccionan frente a él en forma distinta?

Este tipo de interrogantes son las que han mantenido ocupados a los ecólogos evolutivos durante el último siglo.

<sup>1</sup> Desde hace ya varios años ha habido interés por desarrollar una nueva síntesis de la teoría evolutiva. Este nuevo marco conceptual incluye la definición y revalorización de cuestiones como los niveles de organización biológica, la jerarquización de la vida, la caracterización de las jerarquías genealógicas y ecológicas, entender las causalidades descendentes y ascendentes de la evolución, definir las propiedades de cada nivel de organización, evaluar las unidades de evolución, los mecanismos de cambio de sistemas complejos, las interacciones entre unidades de evolución, etcétera. Es realmente interesante plantearnos este reto de una nueva síntesis de la evolución, en el cual no sólo están involucrados biólogos sino filósofos, matemáticos, etcétera.

<sup>2</sup> Los llamados marcadores moleculares se basan en la caracterización de ciertas proteínas y fragmentos de ADN para entender los fundamentos genéticos de la variabilidad fenotípica de los organismos. Existen varios tipos de marcadores como las isoenzimas, enzimas de restricción para análisis de fragmentos de ADN, aislamiento de fragmentos aleatorios de ADN, separación y determinación de genes o fragmentos de ellos, entre otros. Estos marcadores moleculares pueden ser muy útiles para resolver problemas de la evolución de los organismos relacionados con estructura poblacional, flujo génico, sistemas de cruzamiento, especiación (o formación de especies), hibridación, sistemática y filogenia.

El *porqué* un organismo se comporta de una manera y no de otra. Por ejemplo, ante la cuestión: ¿por qué ciertas especies viven más que otras? o, incluso, respecto a una misma especie, ¿por qué ciertos organismos viven más que otros pese a su pertenencia a la misma especie biológica?, podemos pensar, en primera instancia, que se debe a cuestiones de alimentación, de condiciones de vida, de entorno ecológico, etcétera. Pero adicionalmente cabe creer en la posibilidad de que estén involucrados ciertos genes a los que resultara posible llamar de la perennidad. Lo que en la mitología humana era un elixir para la eternidad, ahora son genes que, si bien poseen mecanismos complejos de funcionamiento que desconocemos por el momento, determinan indudablemente, en última instancia, caracteres de historias de vida tan importantes como la longevidad.

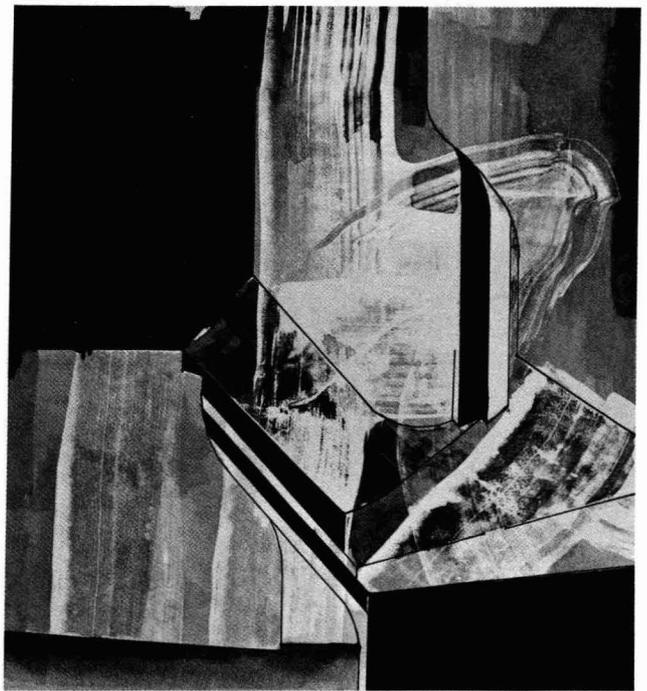
De esta manera, la *ecología evolutiva* es una rama de la ecología que intenta explicar la variación fenotípica conociendo sus bases genéticas y el papel de dicha variedad en función de la interacción con otros organismos y su ambiente. Se busca el esclarecimiento último o evolutivo de un problema funcional o ecológico de tipo proximal.

#### ***La genecología o ecología genética (¿cuál es el componente genético de la variación biológica?)***

La ecología evolutiva es una de las disciplinas que ha recibido una gran atención por parte de biólogos y naturalistas desde hace ya varias décadas. En su sentido más amplio, podría decirse que fue uno de los pilares más importantes para el desarrollo de la teoría moderna de la evolución biológica. Históricamente, los trabajos de Charles Darwin en el siglo pasado fueron los que marcaron las pautas para el desenvolvimiento de una nueva forma de pensamiento y, sobre todo, crearon una nueva concepción del movimiento de la naturaleza. Una de las conclusiones más importantes del darwinismo es que los organismos varían de una manera inimaginable pero siempre mostrando una coherencia, una armonía y un desenvolvimiento predecible en formas y tamaños.

Una de las propiedades intrínsecas más importantes de los seres vivos es la existencia de una gran variedad de formas, colores, capacidades fisiológicas y formas de desarrollo, que ha sido materia y producto de la evolución. Sin embargo, la pregunta que deberíamos formularnos en este momento resulta ésta: ¿cuál es el origen de tal variación? Se puede decir que prácticamente todos los organismos tienen esa variabilidad como base para su evolución. No es casual que una de las cuestiones eternas de la teoría de la evolución biológica aún en la actualidad sea precisamente el origen de las especies biológicas. Esta interrogante ha sido enfrentada por biólogos y filósofos, por naturalistas e historiadores, por antropólogos y sociólogos. El interés tan grande del origen de las especies radica en que, en última instancia, develar este enigma equivaldría a explicar el origen mismo de la vida y, por supuesto, el nacimiento y la evolución del hombre.

Dentro del desarrollo histórico de la ecología evolutiva es interesante notar la genialidad de ciertos naturalistas y biólogos para responder preguntas que, en su momento, fueron muy difíciles. Al observar la gran variedad de caracteres de organismos de la misma especie o de especies muy relacionadas surgió el problema no sólo de explicarla sino entender su origen y naturaleza. La respuesta obvia después de la obra monumental *El origen de las especies*, de Charles Darwin, consistía en que tales variaciones eran producto de la selección natural. Sin embargo, esta explicación general, que constituye una de las leyes fundamentales del comportamiento de la naturaleza, aunque válida, no explica en sus detalles la variedad biológica. Se requería un esclarecimiento más fino, más inmediato probablemente, que incluyera la fisiología del organismo, su desarrollo ontogenético, su relación con el entorno o la ecología y, por supuesto, su genética.



De ahí que no sea casual el surgimiento, alrededor de los años treinta y cuarentas de este siglo, de una disciplina de la biología denominada ecología genética o genecología, de suma importancia por varias razones. Por un lado, aportó una serie de evidencias e interpretaciones de tipo adaptativo opuestas a las ideas aparentemente dominantes de aquella época, cuando los conceptos adaptacionistas no gozaban de una aceptación general dentro de la comunidad científica. En segundo lugar, integró dos tipos de explicaciones relativamente diferentes como la ecológica y la genética para explicar la variación fenotípica de los organismos. Finalmente, incorporó en su método de estudio la experimentación fuera del laboratorio. Desarrolló pruebas en invernaderos, jardines, bioterios e, incluso, en el campo. Esto, aunque no era totalmente nuevo, poseía la originalidad y la creatividad suficientes para permitir, en



generado por eventos independientes —analogía— evolutivamente hablando. Tal hecho reviste gran importancia porque permite distinguir las relaciones históricas y filogenéticas entre un par o más de especies y elimina también la confusión respecto a si un carácter se debe a una adaptación o más bien al origen filogenético, a una especie de arrastre filogenético.

### *Problemas eternos de la ecología evolutiva*

Para finalizar este ensayo mencionaré tres tipos de dificultades que han persistido en la literatura biológica pese a los grandes esfuerzos para solucionarlas en los últimos años. Señalaré brevemente cómo el uso de marcadores moleculares puede contribuir a dar un giro a estas líneas de investigación.

1. *El sexo... siempre el sexo.* Uno de los problemas más interesantes que existen dentro de la ecología evolutiva es el referente a la evolución del sexo, uno de cuyos aspectos lo representa la proporción de sexos de las crías de una hembra que se reproduce sexualmente. Esta cuestión se remonta hasta los años treinta cuando Ronald Fisher, uno de los teóricos más importantes de este siglo, predijo que un organismo progenitor debería de invertir la misma cantidad de energía en cada sexo considerando el total de sus descendientes. A partir de este cálculo se han planteado numerosas modificaciones. Por ejemplo, algunos autores han afirmado que la variancia del éxito reproductivo en uno de los sexos es mayor que en el otro. Tales estimaciones se han complicado al añadirse otros aspectos, como el tamaño de la camada y su vínculo con la asignación de energía, etcétera. Dicho de otra forma, ¿por qué una hembra de un insecto oviposita diez huevecillos mientras que otras hembras de la misma especie ovipositan cien? Más aun: de estos cien huevecillos, ¿todos son machos o hembras?, ¿hay cincuenta de cada uno? Como se ve, no es trivial la respuesta a esto. Para ubicar al lector sobre la importancia de responder a este tipo de preguntas, mencionaré los siguientes puntos. Desde la perspectiva de la evolución por selección natural, la teoría más trascendente de la biología, es importante que las variaciones presentes se vayan fijando justamente por un mecanismo de selección. En teoría, las características que se fijan lo hacen por su valor adaptativo. Siguiendo este razonamiento el sexo es importante ya que machos y hembras desempeñan diferentes papeles dependiendo de la especie. Por ejemplo, actividades como el cuidado parental antes y después del nacimiento de las crías y la defensa de un territorio en contra de enemigos naturales durante el cuidado parental son características fijas pero que varían de una especie a otra. El esfuerzo reproductivo realizado por una hembra puede tener consecuencias evolutivas muy diferentes si genera una sola cría o cien de ellas. Más aun, parir cien crías será muy diferente si una sola de ellas es hembra o si todas lo son.

Aunadas a esto, las dificultades técnicas para identificar el sexo de estadios juveniles de casi cualquier organismo limitan fuertemente la respuesta a las preguntas planteadas. Cabe aclarar que, si bien es verdad que en ciertos organismos es fácil distinguir morfológicamente los machos de las hembras, en la mayoría de ellos no resulta posible hacerlo. La otra forma sería encontrar y detectar un cromosoma sexual. Sin embargo, para un estudio ecológico sería prohibitivo elaborar los cariotipos de cientos de individuos. Entonces, la solución debería consistir en encontrar un marcador genético o molecular asociado a un cromosoma sexual, para utilizarlo en la determinación sexual de los organismos analizados. Esto sería sumamente útil y ayudaría a resolver algunos de los problemas antes mencionados. En la actualidad se llevan a cabo esfuerzos en tal sentido y, como es natural, la mayoría de los estudios de marcadores moleculares asociados al sexo se han hecho con vertebrados.

2. *Los sistemas de apareamiento y los análisis de paternidad.* El estudio de los sistemas de apareamiento son de interés particular para los ecólogos evolutivos interesados en el análisis del éxito reproductivo de los individuos que componen una población en condiciones naturales. Uno de los problemas más complicados en esta área de investigación ha sido el estudio de la paternidad, esto es una medida del grado de parentesco entre individuos, padres e hijos, de una población. Si uno se imagina una población humana casi no existe este tipo de dificultades, pero en las poblaciones de animales y plantas es prácticamente imposible conocer estas relaciones sin un análisis genético. Se han aplicado varias técnicas basadas en la identificación, con un marcador molecular, de cada individuo de la población bajo estudio para tratar de caracterizar sus relaciones de parentesco con los demás.

Para ilustrar aun mejor la utilidad de los marcadores moleculares podemos traer a colación casos recientes de criminalidad en los Estados Unidos, donde las investigaciones de medicina forense han recurrido a este tipo de marcadores para identificar la culpabilidad de personas acusadas de delitos. Esto se ha efectuado utilizando análisis genéticos de ADN de muestras de sangre, semen o cualquier otro tejido disponible del presunto autor del hecho criminal. Hasta el año 1990, más de dos mil casos de juicios legales en los Estados Unidos habían empleado resultados aportados por marcadores moleculares como una evidencia más para determinar la culpabilidad de un acusado. Se dice que, para fines de este siglo, esos instrumentos van a desempeñar un papel similar al que hasta el momento han tenido las huellas digitales. Los Sherlock Holmes del siglo XXI van a necesitar no a un intrépido Watson sino a un biólogo molecular con una máquina de PCR para amplificar segmentos de ADN en lugar de una lupa de mano.

En los sistemas naturales de plantas y animales, la caracterización de la identidad genética mediante marcadores moleculares ha sido muy importante, ya que ha revelado fenómenos como los de paternidad múltiple y competencia por

polen o por espermatozoides en especies que pueden producir prole de varios padres. Este fenómeno de paternidad múltiple significa que dos o más machos compiten por fertilizar una hembra dentro de un solo ciclo reproductivo. Varios caracteres morfológicos, fisiológicos y de comportamiento ilustran el hecho de que existe esta competencia entre machos e, incluso, que estos caracteres adaptativos se han fijado por selección natural. Un ejemplo muy conocido es el de las sustancias secretadas por machos de ciertas especies de gusanos, insectos y arañas después de copular, para impedir que una hembra sea inseminada nuevamente. Sin embargo, se ha planteado que, desde el punto de vista de una hembra, no es deseable limitar esta fertilización múltiple, pues presenta ventajas como la de asegurar la fertilización, la inclusión de los genotipos machos más adecuados y el incremento de la diversidad genética entre la prole.

Sin embargo, determinar si este fenómeno de fertilizaciones múltiples ocurre o no resulta muy difícil si no se cuenta con un análisis genético. El reto consiste en identificar esta paternidad múltiple con marcadores moleculares cuando no existe otro tipo de instrumento aplicable.

3. *Las migraciones y el flujo génico.* El estudio de las migraciones de individuos y el flujo de genes es uno de los temas más fascinantes de la ecología evolutiva. Este tipo de fenómenos naturales van desde los espectaculares casos de migraciones masivas como, por ejemplo, las de mariposas, aves o peces, hasta los estudios en donde se analiza el movimiento genético a través de granos de polen, semillas o cualquier propágulo potencial capaz de desarrollar un organismo.

En México, es de todos conocido el caso de las mariposas monarca (*Danaus plexippus*) que, alrededor de los meses de noviembre y diciembre de cada año, llegan por millares a

los bosques de abetos del estado de Michoacán para permanecer ahí durante tres o cuatro meses y después regresar a sus lugares de origen (los Estados Unidos y Canadá). Después de haber visitado alguna vez uno de los santuarios de la mariposa monarca y después de sentirse abrumado por los miles de individuos que revolotean en estos bosques de abetos, una pregunta que todos nos hemos hecho es si estos insectos que emigran tantos y tantos kilómetros son genéticamente iguales. Gracias a un estudio elaborado hace varios años se encontró que las mariposas monarca presentan variación morfológica, la cual tenía una cierta correlación con los niveles de heterocigosidad genética de las mismas. En otro trabajo reciente no se detectaron diferencias genéticas entre individuos colectados en las dos costas de Estados Unidos, México y una isla del Caribe, utilizando como marcador molecular un fragmento del ADN mitocondrial. Este resultado, por demás sorprendente, indica que el flujo génico ha mantenido cohesionada a esta especie a lo largo de varias generaciones.

Sin embargo, el problema de las mariposas monarca no termina aquí. En México existen poblaciones locales de esa especie, a las que se ha llamado *Danaus plexippus*, variedad *curasavica* —por el nombre de la especie de asclepias de las que se alimenta, *Asclepias curasavica*—, que no emigran y permanecen durante todo el año en ciertas regiones del centro del país. La pregunta inmediata es ¿por qué unas mariposas emigran y otras no? Podemos imaginarnos varias respuestas, desde explicaciones fisiológicas hasta el comportamiento mismo de las mariposas. Pero si buscamos la contestación última tendremos que sugerir una hipótesis en el plano molecular, como suponer la existencia de genes que determinen el comportamiento de migración o influyan en él. No hay una respuesta definitiva a esto pero, desde el punto de vista de la ecología molecular, convendría hallar un marcador que permitiera identificar diferencias genéticas entre las poblaciones migratorias y no migratorias en primera instancia, y, simultáneamente, realizar una investigación sobre genes involucrados en las cuestiones que determinan el comportamiento migratorio.

### Comentarios finales

Con estos ejemplos es posible demostrar la importancia de que las aportaciones de la biología y la genética molecular se integran para resolver problemas de ecología evolutiva. Investigaciones basadas en ambas disciplinas tienen un potencial enorme y abarcan prácticamente todos los niveles de organización biológica: enigmas que van desde cuestiones de evolución en el nivel molecular hasta otras de historia filogenética de un grupo de organismos. No hay duda de que la ecología evolutiva ha recibido un gran estímulo con el desarrollo de la biología molecular y seguramente recibirá una gran atención en los próximos años, ya que está contribuyendo a solucionar problemas fundamentales de la biología. ♦

