



ARBOLES FILOGENÉTICOS

Guía para el docente

MATERIAL ORIGINAL DE



USANDO SECUENCIAS DE ADN PARA CONSTRUIR ÁRBOLES FILOGENÉTICOS

RESUMEN

Esta lección sirve como complemento al cortometraje *Lizards in an Evolutionary Tree* (*Lagartijas en un árbol evolutivo*). El cortometraje se enfoca en un grupo de lagartijas estrechamente relacionadas entre sí llamadas anolis (género *Anolis*) que viven en las islas del Caribe. Estas lagartijas han evolucionado para ocupar diferentes nichos en el medio ambiente, y han sido usadas por científicos para hacer descubrimientos sorprendentes acerca de adaptación por selección natural, evolución convergente, y la formación de nuevas especies.

En esta actividad los estudiantes exploran las relaciones evolutivas entre las lagartijas anolis del Caribe. En la parte 1 los estudiantes examinan la diversa apariencia de las lagartijas y las agrupan en categorías de acuerdo a los diferentes tipos de cuerpo. Las diferencias entre las especies ilustran la radiación adaptativa; los estudiantes pueden generar hipótesis acerca de por qué las diferentes adaptaciones han evolucionado, y hacer inferencias sobre las relaciones evolutivas entre las lagartijas en base a estas adaptaciones. En la segunda parte, secuencias de ADN mitocondrial de las mismas especies de lagartijas son usadas para general el árbol filogenético que revela sus relaciones evolutivas. Los estudiantes deben explicar por qué el árbol evolutivo obtenido en la parte 2 es diferente del agrupamiento original propuesto por ellos en la parte 1. Los estudiantes ven partes del cortometraje en diferentes puntos de la actividad.

CONCEPTOS CLAVE Y OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

- A. Una adaptación es una estructura o función que aumenta la capacidad para sobrevivir y reproducirse en un ambiente específico.
- B. La radiación adaptativa ocurre cuando una especie ancestral se diversifica en muchas especies descendientes que ocupan diferentes nichos medioambientales.
- C. Diferentes grupos de organismos pueden evolucionar independientemente con rasgos similares al adaptarse a medios ambientes o nichos ecológicos similares, en un fenómeno conocido como evolución convergente.
- D. La comparación en la secuencia del ADN entre las diferentes poblaciones y especies permite a los científicos determinar las relaciones entre las diferentes especies.

Después de completar esta actividad, los estudiantes podrán:

- Explicar por qué los ecomorfos de las lagartijas anolis del Caribe son ejemplos tanto de radiación adaptativa como de evolución convergente.
- Usar alineamientos de secuencias y programas filogenéticos para comparar secuencias mitocondriales de ADN.
- Analizar árboles filogenéticos y determinar si los datos apoyan una hipótesis evolutiva determinada.

CONEXIONES CURRICULARES

Plan de estudios	Gran idea de la ciencia	Ejes temáticos	Habilidades científicas
1º medio	La evolución es la causa de la diversidad de los organismos vivos y extintos	Analizar e interpretar datos para proveer de evidencias que apoyen que la diversidad de organismos es el resultado de la evolución.	Habilidades de investigación científica (transversales); Comprensión y reflexión para generación de nuevos conocimientos; Comprensión de las etapas del proceso de investigación: pregunta a partir de la observación, formulación de conclusión, evaluación y reflexión de procedimientos y resultados, buscar evidencia, replicar experimentos, evaluar confiabilidad y validez, contrastar hipótesis con evidencias, etc. Comunicación de resultados Alfabetización científica
3º medio		Explicar la evolución orgánica, apoyándose en evidencias y en conceptos genéticos y ambientales. Analizar relaciones de parentesco entre los seres vivos relacionándolas con el concepto de ancestro común.	

TIEMPO REQUERIDO

Dando tiempo para debate y para ver el cortometraje, esta actividad toma dos periodos de 50 minutos en una clase de biología avanzada. Presupueste más tiempo si se necesita cubrir los principios de alineación del ADN.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Antes de hacer esta actividad, los estudiantes deberán tener una comprensión básica sobre selección natural, evolución y adaptación; tener familiaridad con el concepto de que los organismos llenan nichos específicos en sus hábitats; comprender que las secuencia de ADN cambian durante la evolución, y que las especies estrechamente relacionadas tienen secuencias similares de ADN; y una comprensión básica sobre qué son los árboles filogenéticos, especialmente el concepto de que especies relacionadas entre sí están localizadas en ramas cercanas del árbol.

MATERIALES

- Un juego de tarjetas de lagartijas que acompañan a este documento.
- Computadora conectada al Internet.
- Cortometraje de HHMI “Lagartijas en un árbol evolutivo”.
- (Opcional) Computadora con el programa gratuito ClustalX instalado.

INTRODUCCIÓN

Esta sección presenta un breve resumen. Para más información acerca de las lagartijas anolis y el cortometraje, consulte la Guía para el cortometraje

Diferentes Morfologías de las Lagartijas Anolis



Figura 1: Las islas del Caribe son el hogar de los anolis. Las especies de anolis que se pueden observar en la película viven en Cuba, Jamaica, La Española (que abarca Haití y la República Dominicana), y Puerto Rico. (Reproducido con permiso de Losos, J. *Lizards in an Evolutionary Tree*. UC Press, 2009).

Las especies de anolis del Caribe pueden ser categorizadas en seis grupos de acuerdo con las características de sus cuerpos (morfología) y los nichos ecológicos que ocupan. A estos grupos se les refiere como morfotipos ecológicos o ecomorfos. En el Cuadro 1 se detallan los seis ecomorfos de anolis encontrados en las islas del Caribe y las características de sus cuerpos. El cortometraje habla solo de cuatro ecomorfos: copa-gigante, tronco-suelo, de ramas angostas y anolis de hierba-arbusto. En esta actividad se verán anolis representantes de los grupos tronco-copa, tronco-suelo, ramas angostas, y hierba-arbusto. Estas categorías están sombreadas en el cuadro.

Cuadro 1: Seis Ecomorfos de Lagartijas Anolis Encontrados en las Islas del Caribe.

Ecomorfo	Longitud Corporal	Longitud de las extremidades	Almohadillas en las patas	Longitud de la cola	Color	Hábitat
Copa-gigante	130-191 mm	Cortas	Grandes	Larga	En general verde	Troncos altos y ramas
Tronco-copa	44-84 mm	Cortas	Muy grandes	Larga	Verde	Troncos, ramas, hojas
Tronco	40-58 mm	Intermedias	Intermedias	Corta	Gris	Troncos
Ramas angostas	41-80 mm	Muy cortas	Pequeñas	Corta	Gris	Ramas angostas
Tronco-suelo	55-79 mm	Largas	Intermedias	Larga	Marrón	Parte inferior del tronco y suelo
Hierba-arbusto	33-51 mm	Largas	Intermedias	Muy larga	Marrón	Arbustos y hierbas



Las características del cuerpo de los ecomorfos son adaptaciones para sus nichos particulares (en la Figura 2 se observa un ejemplo de los hábitats de los diferentes ecomorfos.) En la película, se observa que los anolis de extremidades largas de troncos y suelos se mueven más rápido en el piso que los anolis de extremidades cortas que viven en ramas angostas. La adaptación de tener extremidades largas les ayuda no solo a capturar presas en el suelo, sino también a evitar a los depredadores. Sin embargo, en ramas angostas, los anolis de ramas angostas pueden moverse más fácilmente con sus extremidades cortas, mientras que los anolis de troncos y suelos son torpes. Los anolis de hierbas y

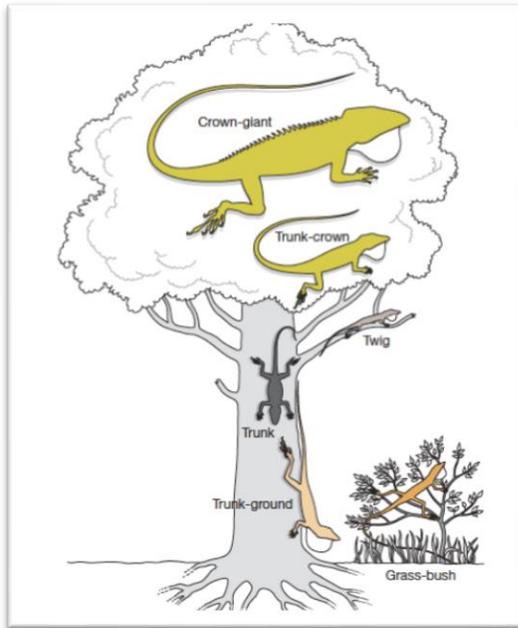


Figura 2: Los anolis ocupan diversos nichos ecológicos. Diferentes tipos de lagartijas anolis han desarrollado adaptaciones que les permiten sobrevivir en nichos específicos, por ejemplo en distintas partes de los árboles, o en las hierbas y arbustos. En la imagen se observan los seis ecomorfos de lagartijas anolis que se encuentran en las Islas del Caribe. (Reproducido con permiso de Losos, J. *Lizards in an Evolutionary Tree*. UC Press, 2009). Crown-giant=copa-gigante,

arbustos son pequeños, tienen extremidades largas y una cola impresionantemente larga que les ayuda a equilibrarse en las ramas delgadas y en la punta de las hierbas. Los anolis de troncos y copas, con sus grandes almohadillas, están adaptados para vivir en la superficie de las hojas de los árboles.

Evolución Convergente en las Lagartijas Anolis

Hay diferentes explicaciones posibles para el hecho de que ecomorfos similares sean encontrados en las diferentes islas.

Una hipótesis es que cada ecomorfo evolucionó una sola vez, y que las especies con el mismo ecomorfo están estrechamente emparentadas entre ellas. En este caso, una posibilidad es que las islas hayan sido adyacentes en el pasado, cuando los ecomorfos evolucionaron, y subsecuentemente las placas tectónicas hayan separado las islas. Otra posibilidad es que todos los ecomorfos hayan evolucionado en la misma isla y luego hayan migrado para establecerse en las otras islas. Si cada ecomorfo evolucionó una sola vez para luego distribuirse a las otras islas, un análisis de ADN debería

revelar que las especies de anolis de ramas angostas están más cercanamente emparentadas entre ellas que con especies de otros ecomorfos que viven en sus mismas islas.

Una hipótesis alternativa es que los ecomorfos evolucionaron repetida e independientemente en cada una de las islas. En base a esta hipótesis, se predice que los anolis de cada isla deberían tener entre sí una relación más estrecha que con especies que tienen sus mismos ecomorfos pero que habitan en islas distintas.

Cuando los científicos examinaron secuencias de ADN de docenas de especies de anolis caribeños, descubrieron que en general, la relación entre las especies que habitan en la misma isla tiende a ser más estrecha que la relación entre especies con los mismos tipos corporales pero que habitan en islas diferentes. Esto sugiere que las mismas adaptaciones evolucionaron de manera independiente en poblaciones diferentes de anolis en cada una de las islas, un ejemplo de evolución convergente.

FOCALIZACIÓN

Objetivo Genérico: que alumnos expliciten concepciones previas del o los conceptos a desarrollar y motivarlos hacia el aprendizaje. Recuerde que en esta etapa no hay respuestas buenas ni malas.

Los estudiantes deben tener nociones sobre los conocimientos previos indicados en esta guía.

EXPLORACIÓN

En esta actividad los estudiantes exploran las relaciones evolutivas entre las lagartijas anolis del Caribe. Los estudiantes pueden trabajar individualmente o en grupos pequeños de dos a cuatro, dependiendo del tipo de salón de clases. Cada estudiante tendrá un set de instrucciones para guiar esta actividad, pero habrá puntos en los que se deseará detener el cortometraje y guiar una discusión grupal, mostrar partes del cortometraje a toda la clase, o aclarar un concepto. Alternativamente, se puede realizar la actividad con toda la clase en un solo grupo, dependiendo de la dinámica de su salón.

Parte 1: Identificación de Ecomorfos y Exploración de la Radiación Adaptativa de los Anolis.

En este punto, los estudiantes no han visto aún el cortometraje de las lagartijas.

1. Entregue a los estudiantes la Parte 1 de la Guía de Estudio (páginas 1 y 2) y un juego de tarjetas con las fotografías de las lagartijas (un juego por grupo). Deje que los alumnos examinen las fotografías de las 16 especies de lagartijas y que las organicen en grupos de acuerdo a su apariencia. Pueden generar tantos grupos como deseen.

Los estudiantes pueden usar cualquier idea que surja de las fotografías para agrupar a las lagartijas. Pueden usar cualquier rasgo de los ecomorfos, incluyendo color, longitud o grosor de las extremidades, forma del cuerpo, largo de la cola, tamaño. Tal vez ellos los agrupen de acuerdo al hábitat que observen en la imagen, tales como ramas, troncos de árboles o pasto.

2. Dé tiempo a los estudiantes para contestar la pregunta 1, después diga a los equipos que expliquen cómo los agruparon y por qué formaron esos grupos (pregunta 2). Si escogen características relacionadas con la forma del cuerpo, pídeles que especulen sobre las ventajas y desventajas de esas características en el hábitat que ocupan.
3. Muestre la primera parte del cortometraje (hasta el tiempo 09:48, el fin del experimento en la pequeña isla).
4. Dé tiempo a los estudiantes para que contesten la pregunta 4 y para que cambien sus grupos de fotografías si lo desean.
5. Revele los cuatro ecomorfos. Las 16 especies representan los 4 ecomorfos listados a continuación. El Cuadro 1 contiene más detalles sobre éstos.

Tronco-copa: verdes, almohadillas en las patas

Ramas angostas: extremidades cortas, morfología como un lápiz

Hierba-arbusto: Extremidades delgadas, cuerpo y cola larga y delgada

Tronco-suelo: Apariencia robusta y fornida, con largas extremidades

6. Dé tiempo a los estudiantes para contestar las preguntas 5 a 8. Discuta con los estudiantes las características corporales de los ecomorfos, cómo se adaptan al medio ambiente en donde viven, y el concepto de radiación adaptativa. Por ejemplo, las grandes almohadillas de los anolis de tronco-copa les permiten adherirse a las hojas y moverse libremente entre las copas de los árboles. Las extremidades cortas de las lagartijas de ramas delgadas son adaptaciones para vivir en ramas delgadas. Para más detalles refiérase a la sección *Diferentes Morfologías de las Lagartijas Anolis* en la introducción.

Parte 2: Generación de una filogenia a partir de secuencias de ADN para determinar las relaciones evolutivas de los Anolis.

(Opcional) Si sus estudiantes nunca han generado e interpretado filogenias en base a secuencias de ADN, puede usar los siguientes recursos de BioInteractive para introducirlos a los conceptos clave:

- a. Siga el procedimiento delineado en el archivo *Alineamiento de Secuencias Usando ClustalX*.
- b. Haga que sus estudiantes exploren el "Click and Learn" *Creando Árboles Filogenéticos con secuencias de ADN*. <http://www.hhmi.org/biointeractive/creating-phylogenetic-trees-dna-sequences>

1. Reparta las primeras dos páginas de la parte 2 de la Guía de Estudio (páginas 3 y 4).
2. Haga que los estudiantes sigan las instrucciones para descargar el archivo con las secuencias de los Anolis y usen www.phylogeny.fr para alinear las secuencias y crear un árbol filogenético.
3. El sitio web generará un árbol filogenético que se puede guardar en una variedad de formatos. Debido a la naturaleza del análisis filogenético, que involucra un muestreo al azar, cada estudiante puede obtener un árbol ligeramente distinto, pero el patrón general deberá ser muy similar.

Extremidades reducidas o ausentes también pueden ser ejemplos: víboras, cecílicos, sirenios, lagartijas gusano.

7. (Opcional) Descargue el archivo (<http://media.hhmi.org/biointeractive/activities/lizard/Reference-Phylogeny.pdf>) y refiérase al árbol filogenético. Encuentre las 16 especies usadas en esta actividad, y vea si hay diferencias entre este árbol y los árboles generados por los estudiantes.

Algunas razones para las diferencias: El árbol que se muestra en el archivo es de una publicación científica, y en ese estudio se incluyeron muchas más especies, lo cual puede influenciar los patrones del árbol; en el artículo también se usan diferentes cálculos para alinear las secuencias y generar filogenias.

LISTA DE ESPECIES DE LAGARTIJAS

Nombre de la Especie	Isla	Ecomorfo
<i>Anolis alutaceus</i>	Cuba	Hierba-Arbusto
<i>Anolis angusticeps</i>	Cuba	Ramas Angostas
<i>Anolis chlorocyanus</i>	La Española	Tronco-Copa
<i>Anolis cristatellus</i>	Puerto Rico	Tronco-suelo
<i>Anolis cybotes</i>	La Española	Tronco-suelo
<i>Anolis evermanni</i>	Puerto Rico	Tronco-copa

<i>Anolis grahami</i>	Jamaica	Tronco-copa
<i>Anolis lineatopus</i>	Jamaica	Tronco-suelo
<i>Anolis occultus</i>	Puerto Rico	Ramas delgadas
<i>Anolis olssoni</i>	La Española	Hierba-arbusto
<i>Anolis ophiolepis</i>	Cuba	Hierba-arbusto
<i>Anolis porcatus</i>	Cuba	Tronco-corona
<i>Anolis pulchellus</i>	Puerto Rico	Hierba-arbusto
<i>Anolis sagrei</i>	Cuba	Tronco-suelo
<i>Anolis shelpani</i>	La Española	Ramas delgadas
<i>Anolis valencienni</i>	Jamaica	Ramas delgadas
<i>Leiocephalus barahonensis</i>		Grupo externo

RESPUESTAS A LAS PREGUNTAS DE EXPLORACIÓN

Parte 1: Identificación de Ecomorfos y Exploración de la Radiación Adaptativa de los Anolis

Preguntas 1-6: las respuestas de los estudiantes pueden variar. Es importante que ellos puedan explicar sus respuestas.

7. Explique por qué los diferentes ecomorfos son un ejemplo de radiación adaptativa.
La radiación adaptativa ocurre cuando una especie ancestral se diversifica en muchas especies descendientes, las cuales se adaptan a diferentes nichos ambientales. Los ecomorfos pueden haber surgido a partir de este proceso de especiación y adaptación, ya que cada ecomorfo posee características morfológicas que lo hace más apto para el nicho que ocupa.
8. Desarrolle una hipótesis que explique cómo ecomorfos similares evolucionaron para estar presentes en diferentes islas del Caribe.
Las respuestas de los estudiantes variarán.

Parte 2: Generación de una filogenia a partir de secuencias de ADN para determinar las relaciones evolutivas de los Anolis.

Use la lista de especies de lagartijas y colorea los árboles filogenéticos para tener una representación visual de cómo las especies evolucionaron:

- a. Coloree cada rama de acuerdo con la isla de origen (Cuba, La Española, Jamaica, o Puerto Rico). Si dos ramas unidas por un nodo son del mismo color, coloree también la raíz de la rama y continúe hacia la izquierda hasta el siguiente nodo. Escriba una leyenda para la figura.

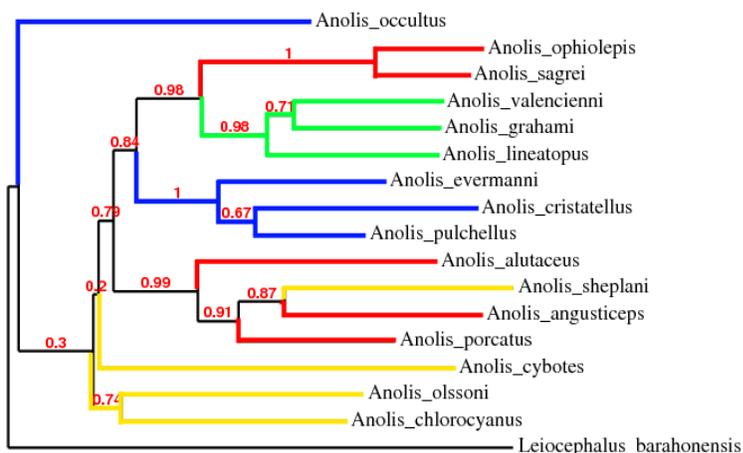


Figura 4: Filogenia coloreada de acuerdo con la distribución geográfica de las lagartijas. Rojo = Cuba, Verde = Jamaica, Azul = Puerto Rico, Amarillo = La Española. Todas las especies de Jamaica se agrupan juntas, y muchas especies de Puerto Rico también se agrupan juntas. Especies de Cuba y La Española están un poco más dispersas alrededor del árbol.

b. Coloree cada rama de acuerdo al ecomorfo de cada especie. Escriba una leyenda para la figura.

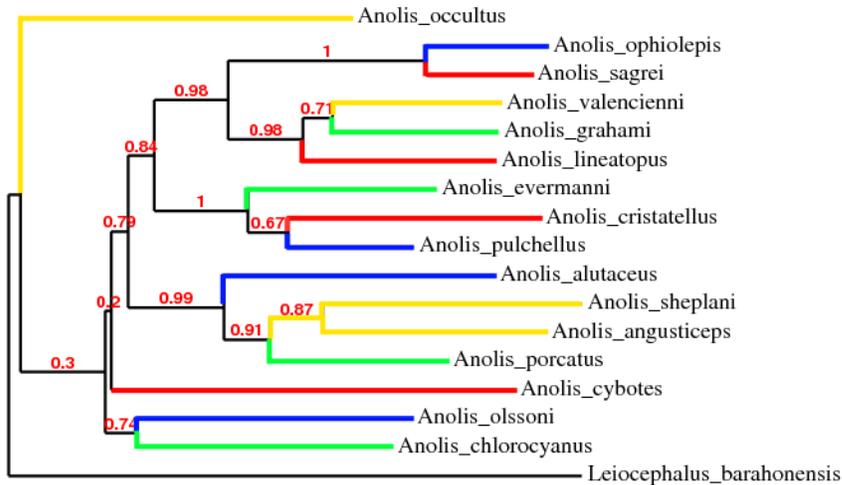


Figura 5: Filogenia coloreada de acuerdo a ecomorfo.

**Rojo = Tronco-suelo,
Verde = Tronco-copa,
Azul = Hierba-arbusto,
Amarillo = Rama delgada.**

APLICACIÓN Y ANÁLISIS

1. ¿Qué patrones generales ve en el árbol?

En general, las filogenias deben mostrar que las especies de la misma isla están más estrechamente relacionadas entre sí que las especies que pertenecen al mismo tipo de ecomorfo. Por ejemplo, las tres especies de Jamaica están agrupadas, así como tres de las cuatro especies de Puerto Rico. Las especies de Cuba y de La Española también se agrupan, pero el patrón es más complicado.

2. ¿Las especies con el mismo ecomorfo se agrupan juntas en el árbol? Describa la evidencia que apoya su respuesta.

Los grupos en el árbol están formados por especies que pertenecen a diferentes ecomorfos. Excepto por dos especies de ramas delgadas, ninguno de los ecomorfos están agrupados.

3. ¿Las especies de la misma isla se agrupan juntas en el árbol? Describa la evidencia que apoya su respuesta.

Todas las especies de Jamaica se agrupan juntas, y muchas especies de Puerto Rico se agrupan juntas. Especies de Cuba y La Española también se agrupan, pero el patrón es más complicado.

4. Basándose en los árboles coloreados, escriba una afirmación acerca de si las especies que pertenecen al mismo ecomorfo o las especies que viven en la misma isla están más estrechamente relacionadas entre sí. Justifique su afirmación con evidencia obtenida de los árboles filogenéticos coloreados.

Las especies que viven en la misma isla están más estrechamente relacionadas entre sí que con

otras especies de su mismo ecomorfo que viven en islas diferentes. Cuando se colorean las ramas de acuerdo a la isla de origen se observan grupos del mismo color con especies que comparten nodos, mientras que en el árbol coloreado de acuerdo a ecomorfo, los grupos contienen especies de distintos colores (es decir, de distintos ecomorfos).

5. Revisemos las dos hipótesis discutidas anteriormente. Una hipótesis es que cada ecomorfo evolucionó una sola vez. La hipótesis alternativa es que los ecomorfos evolucionaron repetida e independientemente en cada una de las islas. ¿Cuál hipótesis es apoyada por el análisis filogenético? Justifique su respuesta y explique su razonamiento.
La hipótesis con más apoyo en base al árbol filogenético es que los ecomorfos evolucionaron repetida e independientemente en cada isla. Es por esto que especies que viven en la misma isla se muestran más estrechamente relacionadas entre ellas que con especies de islas diferentes, es decir comparten un ancestro común más reciente que con especies de otras islas.
6. Examine la relación entre *Anolis sheplani* y *Anolis angusticeps*. ¿Encaja esta relación con la hipótesis que escogió en la pregunta anterior? Explique su respuesta. Proponga una hipótesis adicional que pueda explicar esta relación. La relación entre estas dos especies no encaja con la hipótesis seleccionada. *Anolis sheplani* es una especie de ramas delgadas de la isla La Española cuyo pariente más cercano es otra especie de ramas delgadas de Cuba, *Anolis angusticeps*. Una hipótesis adicional para explicar esta relación es que *A. sheplani* evolucionó a partir de una especie de ramas delgadas que colonizó La Española desde Cuba.
7. ¿Los resultados coinciden con lo que se muestra en el cortometraje? ¿Cuáles son las similitudes y las diferencias?
Los resultados en general deben coincidir con lo que se muestra en el cortometraje. El cortometraje explica que las especies en una isla están más estrechamente relacionadas entre sí que con los miembros del mismo ecomorfo que viven en otras islas. Los estudiantes notarán que los datos con los que estuvieron trabajando sugieren una relación más compleja (no tan simple como en el cortometraje). La explicación que más se ajusta a los datos es en general la misma, pero hay algunos casos (ver pregunta 6) que no encajan. Además, el cortometraje discute cuatro ecomorfos (analis de copa-gigante, tronco-suelo, de ramas delgadas y hierba-arbusto), uno de los cuales es diferente a los discutidos en esta actividad.

EVALUACIÓN

¿Puede una misma especie evolucionar teniendo radiación adaptativa y al mismo tiempo tener evolución convergente?

Sí. Los ecomorfos de las lagartijas anolis del Caribe son ejemplos tanto de radiación adaptativa como de evolución convergente. La relación entre las especies que habitan en la misma isla tiende

a ser más estrecha que la relación entre especies con los mismos tipos corporales pero que habitan en islas diferentes.

REFERENCIAS

Losos, J. (2009) Lizards in an Evolutionary Tree. University of California Press, Berkeley, CA.

Rabosky, D. L., and Glor, R. E. (2010) Equilibrium speciation of dynamics in a model adaptive radiation of island lizards. PNAS 107, 22178-22183.

ClustalX: Larkin, M.A., Blackshields, G., Brown, N.P., Chenna, R., McGettigan, P.A., McWilliam, H., Valentin, F., Wallace, I.M., Wilm, A., Lopez, R., Thompson, J.D., Gibson, T.J., Higgins, D.G. (2007) Clustal W and Clustal X version 2.0. Bioinformatics, 23, 2947-2948.

Phylogeny.fr: Dereeper, A., Guignon, V., Blanc, G., Audic, S., Buffet, S., Chevenet, F., Dufayard, J.F., Guindon, S., Lefort, V., Lescot, M., Claverie, J.M., Gascuel, O. (2008) Phylogeny.fr: robust phylogenetic analysis for the non-specialist. Nucleic Acids Res. 2008 Jul 1;36(Web Server issue):W465-9. Epub 2008 Apr 19.

AUTORES

Escrito por Satoshi Amagai, PhD, HHMI

Guía de estudio creada por Valerie May, Woodstock Academy, Ann Brokaw, Rocky River High School, Susan Dodge, consultor

Editado por Laura Bonetta, PhD, Laura Helft, PhD, HHMI; chequeado por Linda Felaco

Revisado por Jonathan Losos, PhD, Harvard University.

Adaptación Chile: Karin González Allende, Profesora de Biología y Cs. Naturales. Académica DEP, Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad de Chile. Embajadora HHMI.