¿Dónde están cuando no los vemos?

Plasticidad de los anfibios para sobrevivir a condiciones ambientales extremas

Leticia M. **Ochoa Ochoa**

La capacidad de "tolerar" entornos desfavorables o condiciones ambientales extremas o poco favorables (como temperaturas muy altas, muy bajas o sequías) ha sido probablemente un factor clave en el éxito evolutivo de los anfibios, ya que, como grupo, han estado en la Tierra por más de 360 millones de años, pese a los monumentales cambios ambientales que han ocurrido durante ese enorme período de tiempo.

El grupo de los anfibios incluye lo que comúnmente se conoce como ranas y sapos –científicamente llamados anuros–; salamandras y tritones –o caudados–; y las cecilias, que son un tipo de anfibios que carecen de patas y, en general, tienen hábitos acuáticos o fosoriales, pasando la mayor parte del tiempo bajo tierra (Figura 1). Las especies que pertenecen a dicho grupo tienen características fisiológicas muy particulares: piel desnuda (sin pelos ni escamas) que necesita estar constantemente húmeda, debido a que parte de su respiración se lleva a cabo ahí; requieren agua para reproducirse, ya sea en forma de alta humedad en el suelo en caso de desarrollo directo –anfibios que no pasan por una etapa de larva (renacuajo) de vida libre– o en cuerpos de agua (poza, lago, río) para

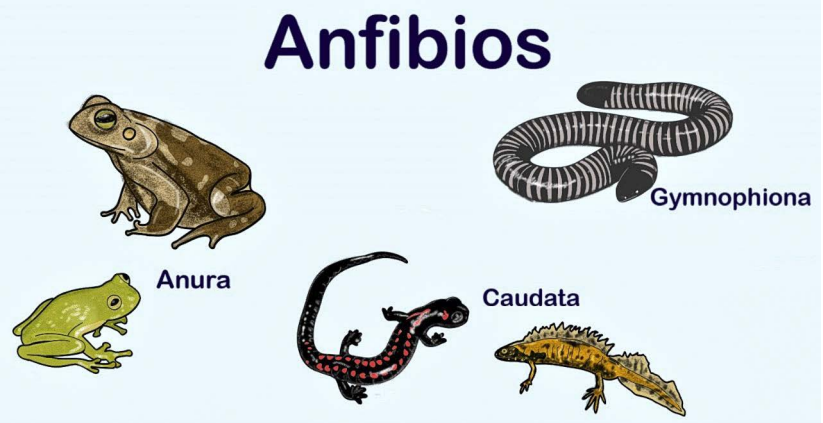

Figura 1. Ilustración que representa los grupos de anfibios existentes en el mundo. Imagen elaborada para este manuscrito por Zoé Fuentes Barrera.

los que sí tienen dicha etapa larvaria de vida libre; además, son ectotermos, lo cual quiere decir que su temperatura corporal depende en gran medida de la temperatura ambiental.

Las características fisiológicas mencionadas, aunadas a su limitada capacidad de dispersión (en general se acepta que los anfibios no pueden moverse grandes distancias), sugieren una tolerancia nula o al menos muy limitada a las condiciones ambientales desfavorables. De manera que la pregunta es: ¿cómo han logrado soportar las variaciones ambientales para sobrevivir durante tanto tiempo? La respuesta es que, en muchos casos, no es así. Es decir, no toleran las condiciones ambientales desfavorables, como sequía y temperaturas extremas altas o bajas. Pero entonces, ¿cómo es que siguen aquí?

En general, los anfibios utilizan refugios para esconderse diariamente durante las horas no activas; por ejemplo, se resguardan para dormir. No obstante, para sobrevivir períodos más largos (semanas, meses o años) y evitar que les afecten las condiciones ambientales adversas, los anfibios utilizan al menos dos mecanismos generales diferentes: la *criptobiosis* (que proviene del griego y significa "vida oculta"), un estado fisiológico y de comportamiento extremo, en que las moléculas se mueven tan lentamente que pareciera no haber metabolismo (la criobiosis es la interrupción del metabolismo debido a la congelación); y la *dormancia* o latencia, en la cual los organismos presentan un estado de metabolismo reducido o deprimido, pero no ausencia del mismo (es decir, hipometabolismo). La dormancia incluye a la hibernación y a la estivación (Navas *et al*., 2010). En general, se acepta que la hibernación ocurre en lugares donde hay un período del año con temperaturas bajas, mientras que la estivación se presenta en sitios donde hay un período seco y caliente. En otras palabras, ambos mecanismos se presentan en ambientes estacionales; es decir, donde las condiciones climáticas varían a lo largo del año (Figura 2).

Es importante hacer énfasis en que parece ser que la dormancia no es un fenómeno universal en los anfibios. Esta suposición tiene varias posibles explicaciones:

1. No se presenta en muchos anfibios debido a que viven en condiciones adecuadas todo el año.
2. Simplemente no se ha registrado la presencia del fenómeno (aquí vale la pena aclarar que gran parte de las personas que estudian anfibios aún se dedican a describir especies; es decir, no se ha terminado aún de cuantificar las especies de anfibios que existen en México ni en el mundo).
3. No se han hecho los experimentos apropiados para verificar que se pueda presentar un estado de dormancia.

Por ejemplo, el sapo *Rhinella marina* aparentemente no estiva en condiciones naturales (al menos no se había registrado un caso), pero al someterlo a condiciones experimentales de estrés hídrico y de temperatura, sí presenta estivación (Boutilier

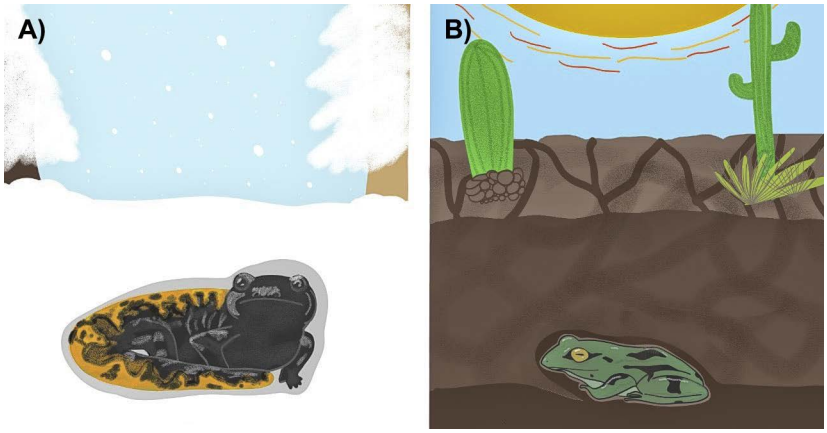

Figura 2. Ejemplos de los mecanismos que utilizan los anfibios para evitar condiciones ambientales adversas. A) Criobiosis, que se presenta en lugares donde se pueden presentar muy bajas temperaturas en algún momento del año, y B) un ejemplo de dormancia, estivación que se presenta en lugares donde hay un periodo de secas que además generalmente es cálido. Imagen elaborada por Zoé Fuentes Barrera.

et al., 1979). También cabe aclarar que no se sabe qué tan conservada, en términos evolutivos, está dicha capacidad de entrar en dormancia entre los grupos existentes, ya que algunos peces pulmonados (Dipnoi) –los cuales son los parientes vivos más cercanos de los anfibios– sí estivan, y algunos forman capullos. Dado que la dormancia es un tema muy extenso, en este escrito me enfocaré en la estivación.

La estivación suele ser una latencia estacional o de largo plazo en respuesta a cambios ambientales fuertes y periódicos (generalmente sequía o altas temperaturas). La regulación intrínseca del metabolismo celular es muy importante, particularmente para lograr la supresión coordinada de las vías de producción de energía en el metabolismo, frente a las de consumo de dicha energía, para:

a) Poder priorizar el uso de energía en el estado hipometabólico.
b) Cambiar los patrones de consumo de energía (por ejemplo, la estivación depende en gran medida de las reservas de grasas).
c) Implementar mecanismos de preservación celular (Malik *et al*., 2023).

Un metabolismo deprimido representa grandes desafíos para la supervivencia del organismo, incluido el estrés oxidativo que se presenta durante y al despertar de la estivación, la acumulación de metabolitos tóxicos, los cambios en las fuentes de energía, los ajustes del estado inmunológico, la atrofia muscular debido a la inmovilidad prolongada y la degeneración de los órganos internos debido a la inanición o privación prolongada de alimentos (Jiang *et al*., 2023). En las investigaciones realizadas hasta el momento, se han descubierto varias formas en que los anfibios pueden lidiar con el estrés metabólico que representa un estado hipometabólico donde no hay entrada ni de agua ni alimento, pero tampoco salida de los metabolitos secundarios tóxicos. Se ha observado también, por ejemplo, que en algunos casos como *Xenopus laevis* lidian con la pérdida de agua corporal a través de una estrategia coligativa, al incorporar el amoníaco residual en la biosíntesis de urea y retener altas concentraciones de urea (normalmente un producto de desecho secretado del catabolismo proteico) u otros solutos compatibles en sus tejidos, lo cual a su vez los protege del estrés oxidativo (Storey *et al*., 2023).

Curiosamente, aunque esta latencia se presenta durante condiciones de alta sequía y/o calor extremo, algunos anfibios mantienen una hidratación normal de los tejidos durante la estivación (Malik *et al*., 2023). Así, se ha observado que, como consecuencia de la acumulación de urea, la osmolaridad aumenta en *X. laevis*, y esto ayuda a impedir una mayor pérdida de agua. No obstante, la pérdida de agua que sigue ocurriendo hace que primero se utilice el agua del plasma, manteniendo los niveles de agua en los órganos vitales. Esto conduce a un deterioro de la circulación, por lo que disminuye la entrega de oxígeno a los tejidos. Si la deshidratación sigue progresando, primero se sacrifica la

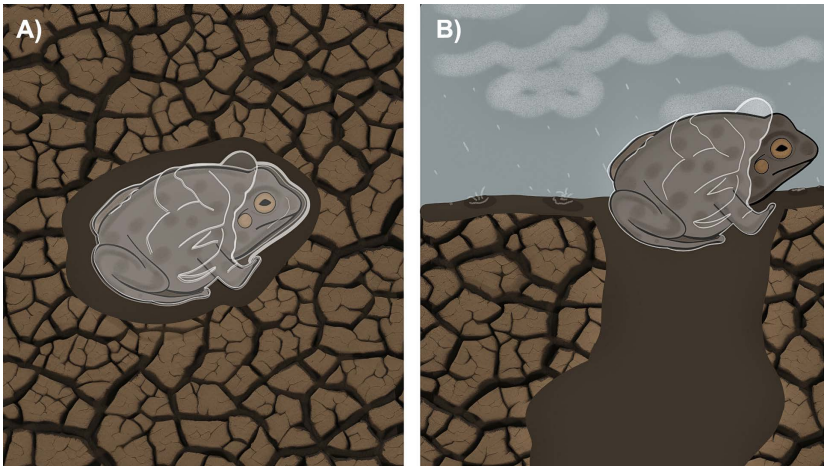

Figura 3. Ilustración de un anuro en estivación que puede formar un capullo. A) Durante el periodo de inactividad, en estivación. B) salida del refugio, cuando las condiciones ambientales han cambiado y hay más humedad en el ambiente, generalmente cuando empieza la época de lluvias. Imagen elaborada por Zoé Fuentes Barrera.

circulación hacia el tejido esquelético y se mantiene durante el mayor tiempo posible en los órganos centrales, y en realidad aumenta en el cerebro (Luu *et al*., 2021). Esto implica que los anfibios tienen que desencadenar procesos fisiológicos para evitar el daño que la deshidratación causa a los tejidos o evitar la deshidratación por completo. En el primer caso, ciertas rutas fisiológicas y genes se activan y pueden prevenir el daño por deshidratación (Malik *et al*., 2023). En el segundo caso, para evitar la deshidratación, algunos anfibios crean un refugio impermeable donde realizan la estivación. Esta cubierta impermeable es creada con su misma piel y se le suele llamar capullo (Withers, 1995).

Muchos anuros y algunas salamandras forman un capullo con varias capas de mudas de piel (Figura 3). Este cubre toda la superficie del cuerpo excepto las fosas nasales. En otros casos, el capullo está compuesto por capas alternas de epitelio desprendido y mucus secretado que construye una barrera eficaz contra la pérdida transcutánea de agua durante la latencia (Cartledge *et al*., 2006). Un ejemplo fenomenal lo presenta *Cyclorana platycephala*, que es una rana que vive en los desiertos de Australia y cuyo nombre común en inglés es “Water-holding frog” (rana que retiene agua). Dicha especie forma un capullo y puede permanecer en estivación hasta por cinco años (Van Beurden, 1980). Se ha descubierto también que el grosor del capullo puede variar según el sustrato donde se entierra la rana: entre más seco es el ambiente, más capas tiene el capullo (Booth, 2006). Vale la pena mencionar que aún no se conocen bien los mecanismos globales de silenciamiento de genes, supresión del ciclo celular y aquellos que ayudan a prolongar la vida minimizando los procesos degradativos de atrofia o muerte celular en anfibios en estivación. Lo anterior es crucial, ya que de no existir estos mecanismos globales el individuo no estaría listo para moverse en cualquier momento; por ejemplo, para aprovechar las lluvias temporales, sin tener que recurrir a un “tiempo de despertar”, como sucede en la criobiosis.

Los procesos regulatorios de la estivación son componentes clave para discernir –tanto en forma cuantitativa como cualitativa– las perturbaciones de los procesos biológicos, cómo funcionan estos procesos regulatorios y qué tan flexibles pueden ser mientras mantienen la vida. Por ejemplo, se podrían plantear preguntas como las siguientes: ¿Durante cuánto tiempo puede estivar un anfibio? ¿Es flexible este período? ¿Qué factores ambientales y fisiológicos desencadenan el proceso de estivación? Dadas las mismas condiciones ambientales, ¿todos los anfibios pueden estivar? Y una vez comprendidos los procesos genético-fisiológico-ambientales se podrían incluso plantear experimentos para inducir la estivación en otros vertebrados.

Obtener esa información nos ayudaría a poder comprender la permanencia de las especies en ambientes estacionales y la posibilidad de que

© **Raúl Chiquito**. *Fila de chiquihuites*. Comprando pan de día de muertos.

estas persistan dadas las proyecciones de cambios ambientales y la fragmentación de la vegetación nativa (Tan *et al*., 2023).

De hecho, la estivación puede proporcionar el mejor modelo para identificar los principios básicos, el grupo central de proteínas y los mecanismos reguladores comunes que definen el hipometabolismo en los sistemas animales (Navas *et al*., 2010), particularmente en una era donde la desertificación como consecuencia del cambio climático y la urbanización a lo largo del mundo la presentan como un factor central que las especies tienen que sobrevivir.

Estar a la vista o no estarlo (refugiados y en estivación) es una capacidad de los anfibios que les ha ayudado a subsistir pese a condiciones ambientales extremas que se han presentado a lo largo de la historia evolutiva del grupo y puede ser la clave frente a condiciones ambientales extremas que están aún por presentarse.

AGRADECIMIENTOS

A Rafael De Villa Magallón por los comentarios que ayudaron a mejorar el escrito. Al Programa de Apoyos para la Superación del Personal Académico (PASPA) de la DGAPA-UNAM y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), gracias a los cuales se pudo realizar la estancia sabática. A la doctora Rebecca Tarvin por recibirme en su laboratorio en la Universidad de California en Berkeley para realizar un año sabático de investigación.

R E F E R E N C I A S

Booth DT (2006). Effect of soil type on burrowing behavior and cocoon formation in the green-striped burrowing frog, *Cyclorana alboguttata*. *Canadian Journal of Zoology* 84(6):832-838.

Boutilier RG, Randall DJ, Shelton G and Toews DP (1979). Acid-Base Relationships in the Blood of the Toad, *Bufo marinus*: I. The Effects of

© **Raúl Chiquito**. *Yendo por la novia*. Mujeres yendo por la novia el día de la boda.

Environmental CO2. *Journal of Experimental Biology* 82(1):331-344.

Cartledge VA, Withers PC, McMaster KA, Thompson GG and Bradshaw SD (2006). Water balance of field-excavated aestivating Australian desert frogs, the cocoon-forming *Neobatrachus aquilonius* and the non-cocooning *Notaden nichollsi* (Amphibia: Myobatrachidae). *Journal of Experimental Biology* 209(17):3309-3321.

Jiang C, Storey KB, Yang H and Sun L (2023). Aestivation in Nature: Physiological Strategies and Evolutionary Adaptations in Hypometabolic States. *International Journal of Molecular Sciences* 24(18):14093.

Luu BE, Hawkins LJ and Storey KB (2021). Insights from a vertebrate model organism on the molecular mechanisms of whole-body dehydration tolerance. *Molecular and Cellular Biochemistry* 476(6):2381-2392.

Malik AI, Storey JM and Storey KB (2023). Regulation of the unfolded protein response during dehydration stress in African clawed frogs, *Xenopus laevis*. *Cell Stress and Chaperones* 28(5):529-540.

Navas CA and Carvalho JE (Eds.) (2010). *Aestivation Molecular and Physiological Aspects*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Storey JM and Storey KB (2023). Chaperone proteins: universal roles in surviving environmental stress. *Cell Stress and Chaperones* 28(5):455-466.

Tan WC, Herrel A and Rödder D (2023). A global analysis of habitat fragmentation research in reptiles and amphibians: what have we done so far? *Biodiversity and Conservation* 32(2):439-468.

Van Beurden EK (1980). Energy metabolism of dormant Australian water-holding frogs *(Cyclorana platycephalus*). *Copeia* 5(4):787-799.

Leticia M. Ochoa Ochoa
Museo de Zoología "Alfonso L. Herrera"
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México
Museum of Vertebrate Zoology
University of California, Berkeley
leticia.ochoa@ciencias.unam.mx