

Células germinales y biotecnología reproductiva: una esperanza para el ajolote mexicano

Tania J. Porras-Gómez^{1*} y Noé Zacaula-Juárez²

¹ Instituto de Investigaciones Biomédicas, Universidad Nacional Autónoma de México

² Laboratorio de Biotecnología, Instituto Nacional de Rehabilitación

* Dirección para correspondencia: tporras@iibiomedicas.unam.mx

En los canales de Xochimilco, entre lirios acuáticos y agua cada vez más turbia, sobrevive una de las especies más singulares del planeta: el ajolote (*Ambystoma mexicanum*). Esta criatura de aspecto enigmático, con sus branquias en forma de plumas y su asombrosa capacidad de regeneración, ha cautivado a científicos, artistas, estudiantes y habitantes locales. Más allá de poder regenerar extremidades, cola o incluso parte de su cerebro (Vieira *et al.*, 2020), el ajolote enfrenta una amenaza silenciosa: el riesgo de desaparecer para siempre en su hábitat natural (Zambrano *et al.*, 2010).

La conservación del ajolote requiere de diferentes estrategias que incluyan tanto acciones ecológicas como de educación ambiental. No basta con limpiar sus canales o proteger su hábitat, además es necesario emplear técnicas de biotecnología reproductiva para preservar las células que transmiten la herencia evolutiva, llamadas células germinales, que darán origen a los gametos (espermatozoides en los machos y óvulos en las hembras).

El término biotecnología hace referencia al uso de técnicas para mejorar los procesos fisiológicos de células u organismos (Rosete *et al.*, 2021). Su aplicación

en la reproducción del ajolote con el objetivo de optimizar su reproducción mediante el empleo de técnicas de fertilización *in vitro*, sigue siendo un desafío, pero constituye una herramienta clave para conservar esta especie emblemática de México.

Las células germinales: las semillas de la vida

Las células germinales constituyen un linaje celular único; son las únicas capaces de llevar a cabo recombinación genética, es decir, la mezcla de los genes provenientes de ambos padres. Gracias a ello, son portadoras de la información genética que se transmite de generación en generación. A lo largo de su desarrollo, estas células atraviesan cambios graduales: se convierten en ovogonias o en espermatogonias, según el sexo del organismo. Por esta razón, se consideran precursoras de los gametos: óvulos en las hembras y espermatozoides en los machos, indispensables para la fecundación y la formación de un nuevo individuo. Sin ellas, no hay descendencia ni posibilidad de perpetuar la vida. En el caso del ajolote, estudiarlas no solo es fascinante desde el punto de vista biológico, sino también crucial para la conservación de esta especie.

El trabajo multidisciplinario realizado en el Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM, en conjunto con el ajolotario de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, se ha centrado en analizar a las células germinales de esta especie: ¿cómo se ven, es decir, qué forma y tamaño tienen?, ¿en qué región del

ovario y testículo se localizan?, ¿cómo funcionan? y ¿cómo podemos conservarlas fuera del cuerpo del organismo sin que pierdan su capacidad de dar origen a una nueva generación? Estas preguntas orientan el desarrollo de soluciones científicas y tecnológicas como la creación de un banco de germoplasma que permita conservar al ajolote más allá de su hábitat natural.

Banco de germoplasma: un seguro para la preservación de las especies

Un banco de germoplasma funciona como un “banco financiero” de la biodiversidad. Así como depositamos nuestros ahorros para protegerlos y usarlos ante alguna eventualidad, en un banco de germoplasma se depositan las “riquezas biológicas” de las especies, como gametos, células, tejidos, polen o semillas. Cada muestra conservada es como una inversión genética que garantiza la posibilidad de restaurar poblaciones en el futuro. Es un fondo de emergencia para resguardar la biodiversidad.

El germoplasma es un recurso genético vivo que sirve como portador de la herencia. Para conservarlo, se utiliza la criopreservación, que consiste en mantenerlo a temperaturas criogénicas (-196 °C) para detener su metabolismo y garantizar su viabilidad a largo plazo. Esta tecnología se utiliza en técnicas de reproducción asistida, fecundación *in vitro* o incluso para enfrentar la vulnerabilidad genética de una especie en declive.

Aunque la criopreservación es una herramienta poderosa, no reemplaza la complejidad del ecosistema. Conservar una especie implica proteger también su hábitat, sus interacciones y su historia evolutiva.

México y sus bancos de germoplasma

A nivel internacional, los bancos de germoplasma cumplen un papel estratégico en la preservación de la diversidad genética. En Estados Unidos, el Programa Nacional de Germoplasma Animal del Departamento de Agricultura (USDA) conserva recursos genéticos ganaderos, acuáticos, avícolas e incluso de insectos; además, ofrece acceso a información y material biológico para investigación.

En Noruega, la Bóveda Global de Semillas de Svalbard resguarda más de un millón de muestras de cultivos básicos como trigo, arroz, cebada, sorgo, frijol y maíz, entre otras, asegurando su conservación frente a alguna catástrofe global.

México cuenta con el Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG-INIFAP) en Jalisco, donde se concentra la colección más grande del país con más de 800,000 accesiones (muestras de material genético) de especies agrícolas y forestales, así como de algunos recursos ganaderos y de animales marinos. A nivel local, la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENADR) resguarda maíces nativos (amarillos, azules, blancos, rojos, negros y mestizos), entre otras especies.

Existen otros bancos importantes, como el Banco de Germoplasma del Estado de México (ICAMEX), el banco forestal de CONAFOR, el banco vegetal de Coahuila, el banco del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), y los de otras importantes instituciones académicas, como la Universidad Autónoma de Nuevo León, la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Autónoma de Querétaro o la Universidad Autónoma de Chapingo.

En México, la mayoría de los bancos de germoplasma se han enfocado en la agricultura y la ganadería, mientras que los esfuerzos dirigidos a la conservación de la fauna silvestre han sido limitados. Sin embargo, existen algunos ejemplos que muestran la importancia de resguardar el patrimonio genético de especies en riesgo. Tal es el caso del lobo mexicano (*Canis lupus baileyi*), cuya recuperación ha sido posible gracias a programas que combinaron colecciones genéticas con la reproducción en cautiverio y la elaboración de convenios binacionales con Norteamérica. Otro ejemplo es la vaquita marina (*Phocoena sinus*), el cetáceo más amenazado del planeta, para la cual se desarrollan proyectos que buscan preservar su material genético ante la inminente posibilidad de su desaparición. A la lista se suma el teporingo (*Romerolagus diazi*), un pequeño conejo endémico de los pastizales del Eje Neovolcánico Transversal. Su drástica disminución poblacional y virtual desaparición en vida libre no solo representa la pérdida de una especie única, sino también la alteración de un ecosistema completo, ya que es un consumidor clave de pastos y dispersor de semillas; su ausencia repercutirá en la dinámica de

los pastizales de alta montaña y afectará a otras especies que dependen de este hábitat, como el zorro gris, la comadreja, el coyote y el águila cola roja.

El caso del ajolote mexicano

Para el ajolote mexicano (*Ambystoma mexicanum*), la situación ecológica es crítica.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, esta especie está en peligro de extinción. El ajolote representa, al mismo tiempo, la fragilidad y la resiliencia de la biodiversidad mexicana. En torno a él se han impulsado diversas iniciativas de conservación *in situ*, como la restauración de chinampas en Xochimilco para recuperar y proteger su hábitat (Chávez *et al.*, 2019).

En paralelo, se han implementado estrategias de conservación *ex situ* (fuera de su hábitat), como la criopreservación de gametos. En el ámbito del conocimiento básico, se ha demostrado que la especificación de células germinales ocurre por inducción, y se han identificado genes clave en este proceso (Extavour y Akam, 2003). Estos avances abren la posibilidad de desarrollar cultivos de células germinales, una herramienta con gran potencial para la conservación genética del ajolote y de otras especies silvestres en México.

Nuestro grupo de trabajo se ha sumado a estas iniciativas a través del estudio de la biología de las células germinales. Hemos logrado identificar y caracterizar el linaje germinal de ovarios y testículos adultos del ajolote, y hemos reportado la presencia de células troncales de ovogonias y espermatogonias (Porras y Moreno,

2023). Actualmente nos encontramos en la siguiente fase, que es el aislamiento y cultivo de estas células troncales de la línea germinal. Un avance prometedor es el desarrollo de métodos para congelar y preservar esperma. En pruebas de laboratorio, se recolectaron pequeñas cantidades de fluido espermático (Coxe *et al.*, 2024; Mansour *et al.*, 2012), y se observó que, incluso tras varios días en solución salina y después del proceso de congelación y descongelación, más de la mitad de los espermatozoides mantuvieron su motilidad. Lo más notable es que, al usarlos en ensayos de fertilización *in vitro*, algunos huevos lograron desarrollarse hasta la eclosión de embriones (Coxe *et al.*, 2024). Estos resultados constituyen una evidencia experimental sólida y un precedente directo para la creación de bancos de gemoplasma que puedan ayudar a preservar esta singular especie (Figura 1).

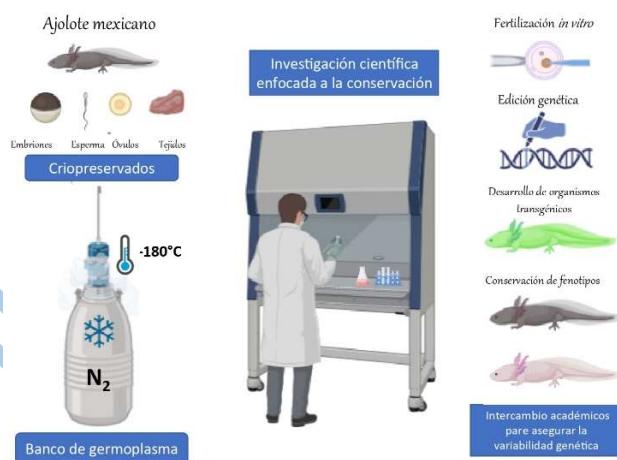


Figura 1. Representación esquemática de las aplicaciones biotecnológicas orientadas a la conservación del ajolote. Los gametos, embriones y tejidos pueden ser criopreservados en bancos de germoplasma, lo que asegura su viabilidad a largo plazo. Estas colecciones biológicas constituyen la base para desarrollar técnicas de fertilización *in vitro*, edición genética de organismos transgénicos y conservación de fenotipos. La investigación científica en este campo se orienta a la preservación de la variabilidad genética y al diseño de estrategias de conservación que permitan la supervivencia de la especie. Ilustración realizada con BioRender.

Las posibles aplicaciones de este conocimiento en la preservación a largo plazo de gametos, células o tejidos, y la eventual reintroducción de ajolotes a su hábitat, deben entenderse como perspectivas y líneas de investigaciones en curso, aún no plenamente desarrolladas, pero viables en el futuro.

Un símbolo vivo de México que debemos preservar

El ajolote no solo es un organismo fascinante por su biología regenerativa, también es un símbolo vivo de la riqueza natural, histórica y cultural de México (López-Ortiz, 2018). Desde la época prehispánica fue venerado por los mexicas como representación del dios Xólotl, y utilizado por los pueblos de Xochimilco en su alimentación, medicina tradicional y con fines rituales. Hoy, sin embargo, enfrenta una situación crítica: la contaminación, la urbanización, la introducción de especies invasoras y la pérdida de su hábitat han reducido drásticamente sus poblaciones silvestres. La ciencia ofrece nuevas herramientas para su conservación, desde la criopreservación de gametos y tejidos, hasta la exploración de su extraordinaria capacidad de regeneración, lo que lo convierte en un importante modelo de estudio biomédico (Faisal *et al.*, 2024).

A pesar de los avances, aún queda un largo camino que recorrer en el desarrollo de la biotecnología reproductiva aplicada al ajolote. Es necesario perfeccionar técnicas como la criopreservación y la fertilización *in vitro*, que permitan su uso seguro y contribuyan a garantizar la preservación de esta especie.

¿Qué puedes hacer por el ajolote?

La conservación es tarea de todos; no necesitas tener un laboratorio para ayudar.

Acciones sencillas como cuidar el agua; evitar su contaminación, interesarte por las especies endémicas de México y difundir la importancia del ajolote pueden marcar la diferencia.

El ajolote ha sobrevivido desde tiempos prehispánicos hasta hoy, y su futuro depende de nuestra capacidad para combinar ciencia, conciencia y acción. Al conservar el ajolote, también salvaguardamos una parte de nuestra identidad y riqueza cultural. Cada célula preservada representa un compromiso con la vida y con México, un esfuerzo para evitar que desaparezca el encanto ancestral de esta especie única en el mundo.

Agradecimientos

T JPG agradece al Programa de Becas Posdoctorales de la UNAM por el apoyo otorgado durante el periodo 2019-2021, así como a la Facultad de Ciencias de la UNAM por el respaldo brindado en esta etapa. Este trabajo está dedicado a la memoria de la doctora Norma Moreno Mendoza.

Referencias

Chávez C, Ramírez J y González A (2019). Conservación comunitaria en Xochimilco: chinampas y ajolotes. En Pérez M (Ed.), *Agua Cultura en México* (pp.120-142). Secretaría de Cultura, México.

Coxe N, Liu Y, Arregui L et al. (2024). Establishment of a Practical Sperm Cryopreservation Pathway for the Axolotl (*Ambystoma mexicanum*): A Community-Level Approach to Germplasm Repository Development. *Animals* (Basel) 14(2):206. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani14020206>.

Extavour CG y Akam M (2003). Mechanisms of germ cell specification across the metazoans: epigenesis and preformation. *Development* 130 (24):5869–5884. DOI: <https://doi.org/10.1242/dev.00804>.

Faisal M, Mehreen A, Hays D et al. (2024). The Genetic Odyssey of Axolotl Regeneration: Insights and Innovations. *International Journal of Developmental Biology* 68(3):103-116. DOI: <https://doi.org/10.1387/ijdb.240111yl>.

López-Ortiz M (2018). *El ajolote en la historia y cultura de México*. México: UNAM.

Mansour N, Lahnsteiner F and Patzner RA (2011). Collection of gametes from live axolotl, *Ambystoma mexicanum*, and standardization of in vitro fertilization. *Theriogenology* 75:354–361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2010.09.006>.

Porras-Gómez TJ y Moreno-Mendoza N (2023). Biología del linaje germinal para el rescate del *Ambystoma mexicanum*. *Gaceta Biomédicas* 28(6):6-8.

Rosete Fernández JV, Álvarez Gallardo H, Urbán Duarte D et al. (2021). Biotecnologías reproductivas en el ganado bovino: cinco décadas de investigación en México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 12 (Suppl. 3). DOI: <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5918>.

Vieira WA, Wells KM and McCusker CD (2020). Advancements to the Axolotl Model for Regeneration and Aging. *Gerontology* 66(3):212–222. DOI: <https://doi.org/10.1159/000504294>.

Zambrano L, Mosig-Reidl P, McKay J et al. (2010). *Ambystoma mexicanum*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2010. DOI: <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2010-2.RLTS.T1095A3229615.en>.