

La fluctuación del mar y su efecto en la biodiversidad en ambientes de agua dulce

Por *Juliana Rosa Matias Ciccheto* y *Walter Antonio Pereira Boeger*



Los ambientes de agua dulce se caracterizan por tener una gran cantidad de especies. Ilustración con collage imaginario que representa la gran diversidad de especies de peces y otros animales acuáticos. / Imagen: Rawpixel

La vida evoluciona. Una de las cosas más importantes reconocidas por Darwin es que la vida que conocemos se diversificó a partir de una única especie que representó la emergencia de la vida hace aproximadamente 4 mil millones de años. A lo largo de ese tiempo, basándose en esa única especie, procesos que generan la multiplicación de especies (especiación) y extinción, promovieron la

(a) Antropoceno: Período reciente en la historia del planeta Tierra que comenzó en el siglo XVIII, cuando las actividades humanas comenzaron a tener un impacto global significativo en el clima y el funcionamiento de los ecosistemas.

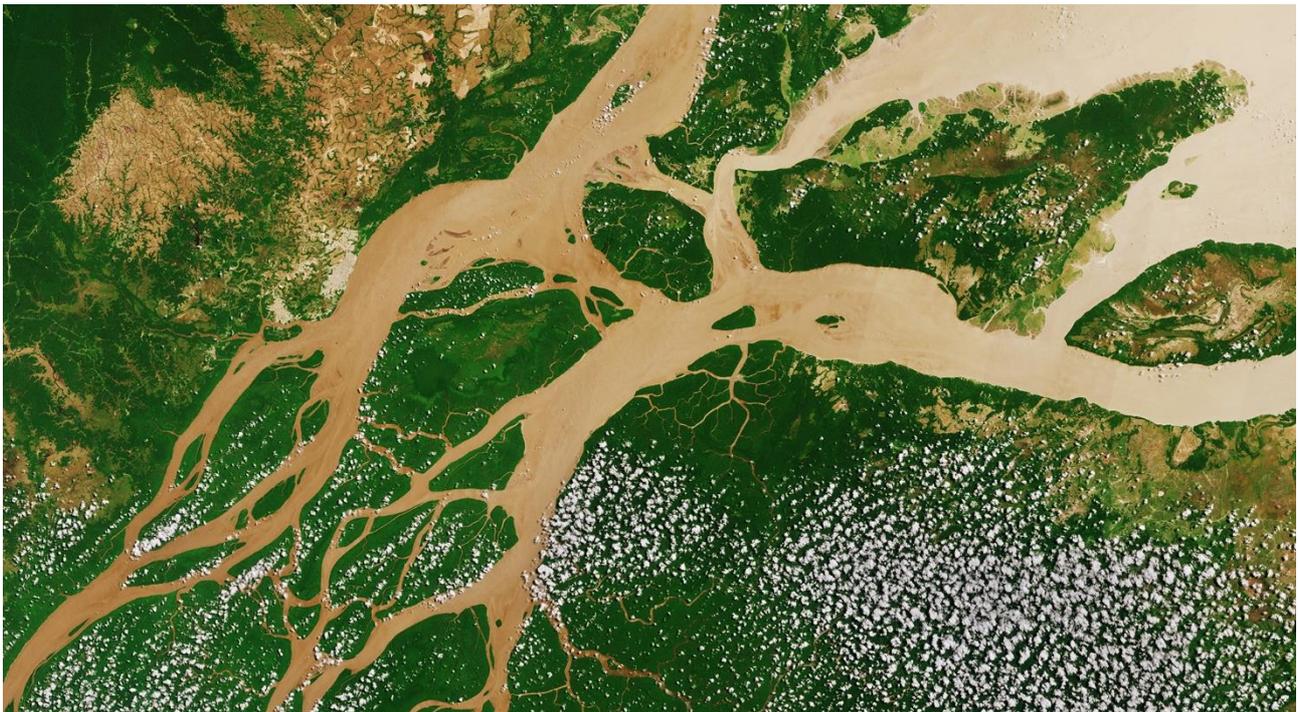
diversificación de la vida. Si bien hoy conocemos poco sobre el número de especies que habitan el planeta, entre 3 y 100 millones de especies, aún sabemos mucho menos acerca de las especies que ya han pasado por la Tierra y que ahora están extintas. ¡Se estima que el número de especies que alguna vez estuvo en el planeta fue de hasta 10 mil millones! Sin embargo, la mayoría se perdió para siempre, ya que los registros fósiles son muy limitados.

La biodiversidad, sin embargo, está constantemente en riesgo debido al proceso de cambio climático previsto para el futuro inmediato y a los impactos ambientales causados por la especie humana durante el Antropoceno^a. Es necesario desarrollar acciones que busquen minimizar estos impactos, como el reconocimiento y estudio de la biodiversidad a partir de estrategias y políticas de conservación. Con ello, se espera mitigar el efecto de la acción humana y la relación entre cambio climático y la extinción de especies.



El tiburón toro (*Carcharhinus leucas*) es una de las pocas especies de peces que, además de habitar en agua salada, ha evolucionado para adaptarse a ecosistemas de agua dulce; siendo encontrada en lugares tan diversos como el Lago Nicaragua, los ríos Zambeze (el cuarto más largo de África), Amazonas y Misisipi (EE. UU.), o las costas del mar Caribe. / Imagen: Doug Adams – Florida Fish and Wildlife – Flickr

La planeación para hacer frente a estos impactos requiere comprender los procesos que generaron esta diversidad en el pasado, ya que estos deberán ser los mismos procesos que recompondrán las pérdidas recientes y futuras. Desde el origen de la vida, el planeta ha experimentado grandes y constantes perturbaciones ambientales (como los cambios climáticos y eventos geológicos) que parecen haber maximizado el proceso de formación de nuevas especies. Uno de los modelos más comúnmente asociados con la formación de especies es el modelo alopátrico vicariante^b o de especiación geográfica. Cuando especies de amplia distribución se fragmentan debido a la aparición de barreras, las subpoblaciones aisladas pueden evolucionar de manera independiente y generar nuevas especies a partir de la especie ancestral original. Sin embargo, este modelo parece incapaz de explicar la enorme diversidad de vida en el planeta, pasada y presente.

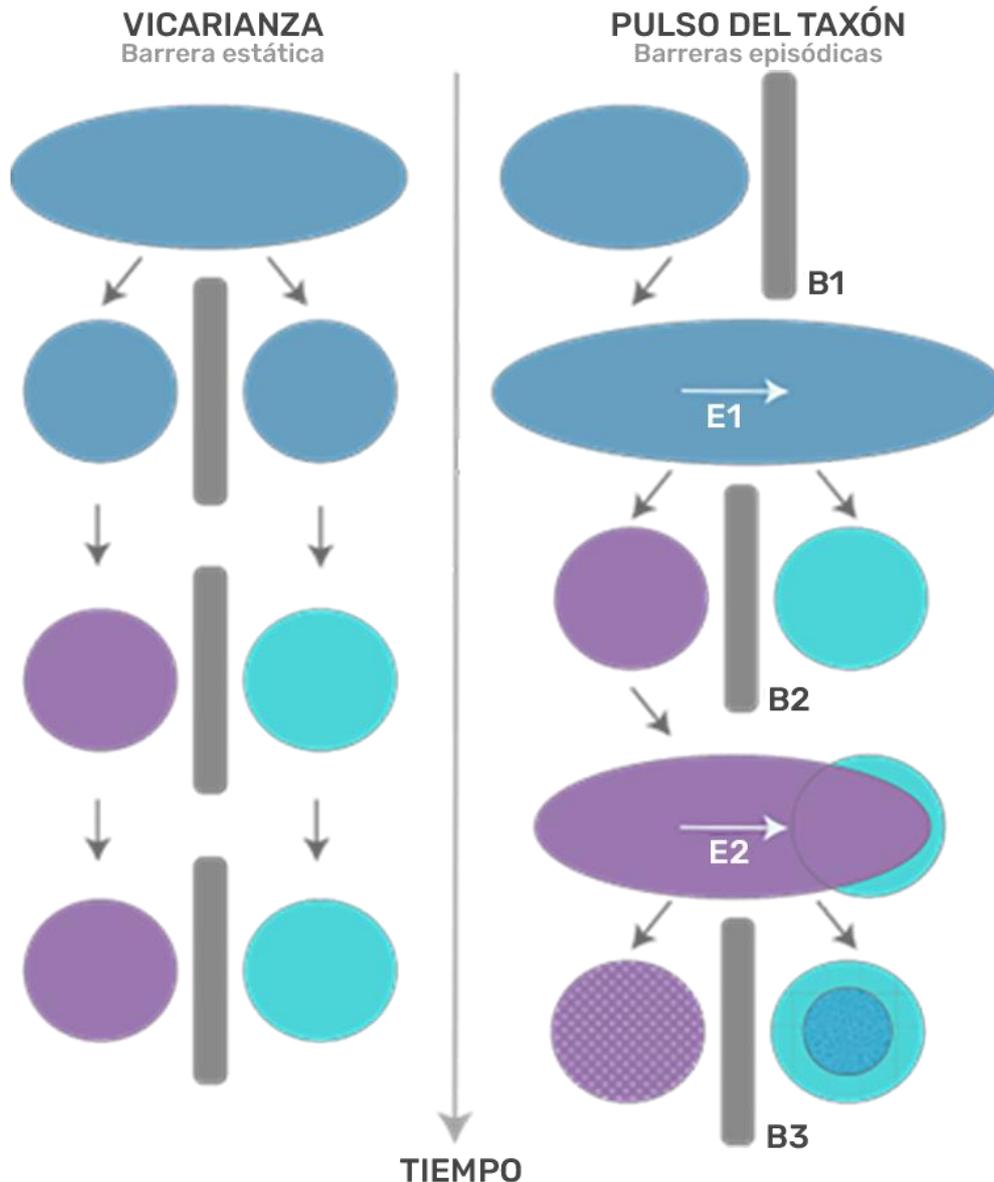


El satélite Copernicus Sentinel-2A enfoca el encuentro del río Amazonas con el Océano Atlántico en el norte de Brasil, el 22 de agosto de 2017. Nótese como existen muchos tipos de ambientes dentro de una cuenca hidrográfica que pueden limitar la distribución de las especies. / Imagen: European Space Agency - Flickr

(b) Modelo alopátrico: El aislamiento geográfico entre poblaciones que interrumpe el flujo genético y, en consecuencia, proporciona aislamiento reproductivo y la posibilidad de especiación.

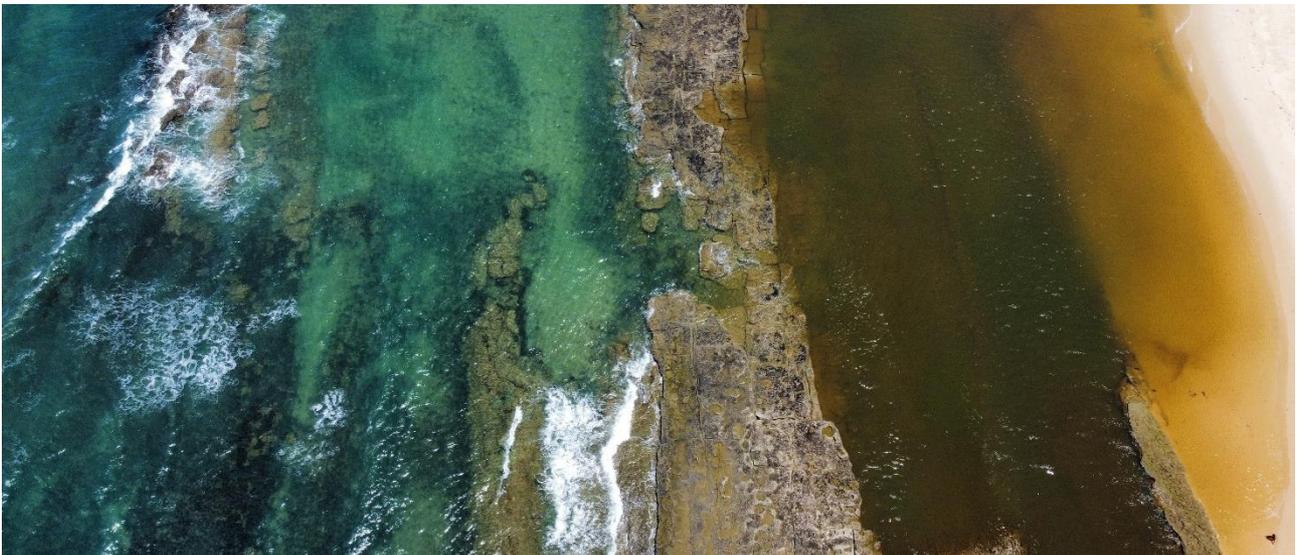
Las perturbaciones ambientales generadas en la intensa dinámica ambiental a lo largo de la historia evolutiva han influido en la permeabilidad de las barreras ecológicas, a veces aislando y a veces permitiendo la expansión de poblaciones, generando nuevas especies a tasas elevadas a través de un modelo conocido como **Pulso de Taxón**. El modelo de diversificación denominado Pulso de Taxón, propuesto por Erwin en 1985, sugiere que los ciclos de aislamiento y expansión en la distribución de comunidades, asociados a la dinámica ambiental del planeta, maximizan la formación de nuevas especies (gráfica 1). Las comunidades estructuradas de esta manera se convierten en mosaicos complejos resultado de la mezcla de comunidades debido a episodios de expansiones y aislamientos.

Las barreras ecológicas no son solo elementos geográficos, como montañas y ríos, sino también características ambientales que pueden ser influenciadas por el cambio climático y las actividades humanas. El Pulso de Taxón forma parte del **Paradigma de Estocolmo**, un marco teórico que incorpora supuestos destinados a explicar la dinámica ecológica y evolutiva de las asociaciones ecológicas y la vida en el planeta.



Gráfica 1. Contraste entre los procesos de vicarianza y Pulso de Taxón. En la vicarianza, observamos la aparición de una barrera estática con el tiempo, que divide un área en dos, causando aislamiento entre las especies locales. En el Pulso de Taxón, observamos eventos de vicarianza (aparición de barrera) intercalados con eventos de desaparición de barrera (desarrollo episódico entre la aparición y ruptura de la barrera). B1-B2-B3: desarrollo de barreras; E1-E2: ruptura de barreras, con fases de expansión asimétrica, lo que resulta en un mosaico complejo para el ecosistema, las especies y las poblaciones, según lo determinado por la escala espacial y temporal. Adaptado de Hoberg y Brooks, 2010. / Imagen: Juliana Cicceto y Walter Boeger

Estudios recientes en las regiones costeras y cuencas hidrográficas de diversas partes del mundo, especialmente en la costa atlántica de Brasil, sugieren que el Pulso de Taxón fue fundamental en la producción y composición de la comunidad de peces en las cuencas costeras y estuarios^c. Las cuencas hidrográficas funcionan como islas para la mayoría de los peces de agua dulce debido a la limitación de la dispersión de organismos de agua dulce por el entorno marino y terrestre. Además de la posibilidad de conexiones físicas entre ríos a través de inundaciones, canales o incluso lagos, la variación histórica del nivel del mar representa un proceso cíclico que permite el contacto o el aislamiento de las comunidades de peces de cuencas vecinas. Por lo tanto, la diversidad y la riqueza de peces en las cuencas hidrográficas pueden verse influenciadas por eventos eustáticos^d, que son las fluctuaciones históricas del nivel del mar. Estas fluctuaciones a lo largo del tiempo geológico son fuertes determinantes de la distribución íctica costera^e.



Encuentro del océano Atlántico y una fuente de agua dulce en Porto Seguro, estado de Bahia, Brazil. Las fuertes diferencias ambientales entre estos dos ambientes mantienen restringidas geográficamente a algunas especies. / Imagen: Gabriel Martins – Unsplash

(c) Estuarios: Son zonas de transición entre un río y un mar que presentan influencia de agua dulce y marina.

(d) Eventos eustáticos: Variaciones del nivel del océano debido a causas no tectónicas ni meteorológicas.

(e) Íctica: Se refiere a los peces. En este caso, se relaciona con la distribución de los peces en las cuencas hidrográficas costeras.

En Brasil, se han realizado algunos estudios para comprender los patrones de biodiversidad esperados a partir de la influencia de las fluctuaciones del nivel del mar en el pasado y eventos de conexión o aislamiento. En muchos de estos estudios, en los que se evalúa la diversidad genética, las especies de peces estrictamente de agua dulce o estuarinas presentan patrones de mayor diversidad genética donde hay una mayor probabilidad de conexión de paleodrenajes^f entre cuencas hidrográficas. Por ejemplo, en el sur del país, la diversidad genética de las poblaciones de peces es mayor en comparación con las especies ubicadas en el noreste, donde el aislamiento parece haber sido constante en el pasado reciente.

A finales de la era geológica denominada Pleistoceno, por ejemplo, hace aproximadamente 18 mil años los peces de agua dulce costeros tuvieron la oportunidad de dispersarse en diferentes lugares de la costa a partir de conexiones directas entre sistemas de agua dulce que antes estaban aislados. En ese momento, conocido como el Último Máximo Glacial (UMG), el nivel del mar retrocedió unos -120 metros desde la costa (gráfica 2). La plataforma continental^g quedó expuesta y los ríos drenaron hacia el mar (ilustración 1). Estos drenajes en la plataforma expuesta (paleodrenajes), representan extensiones de las cuencas hidrográficas —territorio continental bañado por un drenaje principal— que pueden unirse para formar megacuencas (ilustración 1). En este escenario, se produce una mezcla de las comunidades de peces de las cuencas involucradas.

(f) Paleodrenajes: Son los flujos de agua o sistemas de drenaje que existieron en algún momento en el pasado, debido a la exposición de la plataforma continental en eventos de regresión del nivel del mar.

(g) Plataforma continental: Es la porción de superficie que actualmente se encuentra sumergida en el mar y que se extiende desde la línea de costa actual hasta el talud continental.



Gráfica 2. Variaciones del nivel del mar (m, metros) en los últimos miles de años.
Datos: Spratt y Lisiecki (2016). / Imagen: Juliana Cicceto y Walter Boeger

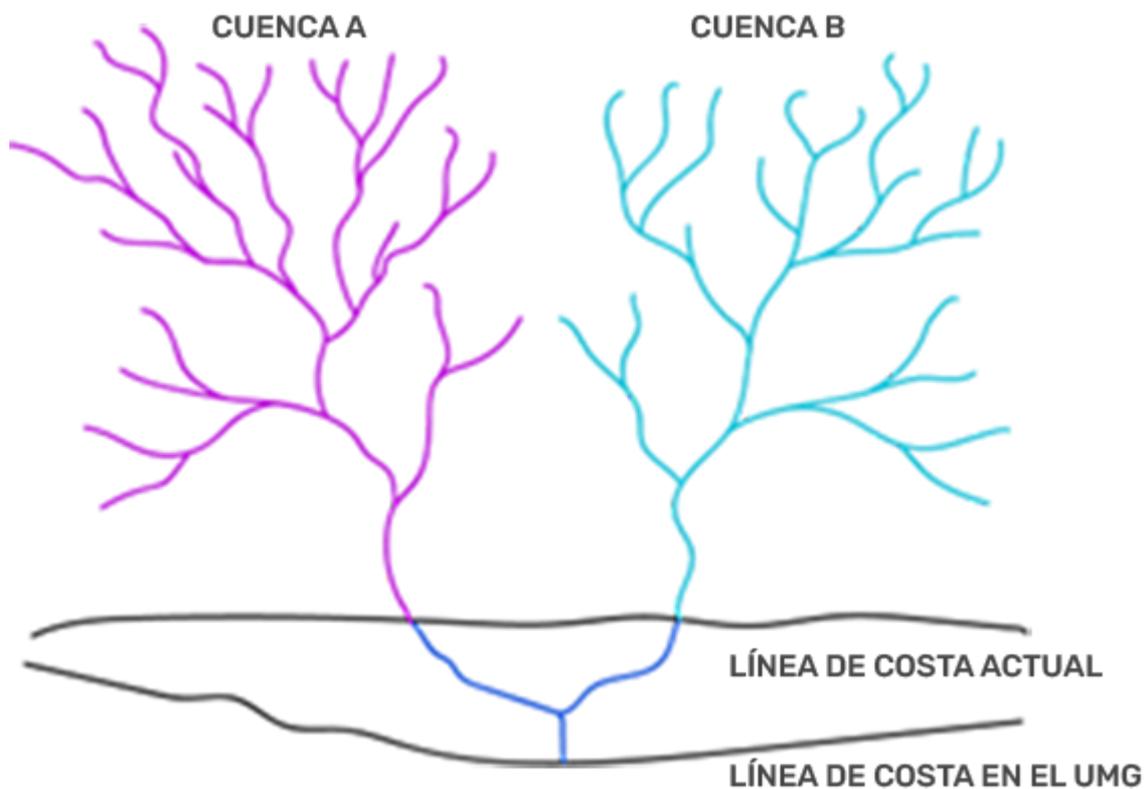


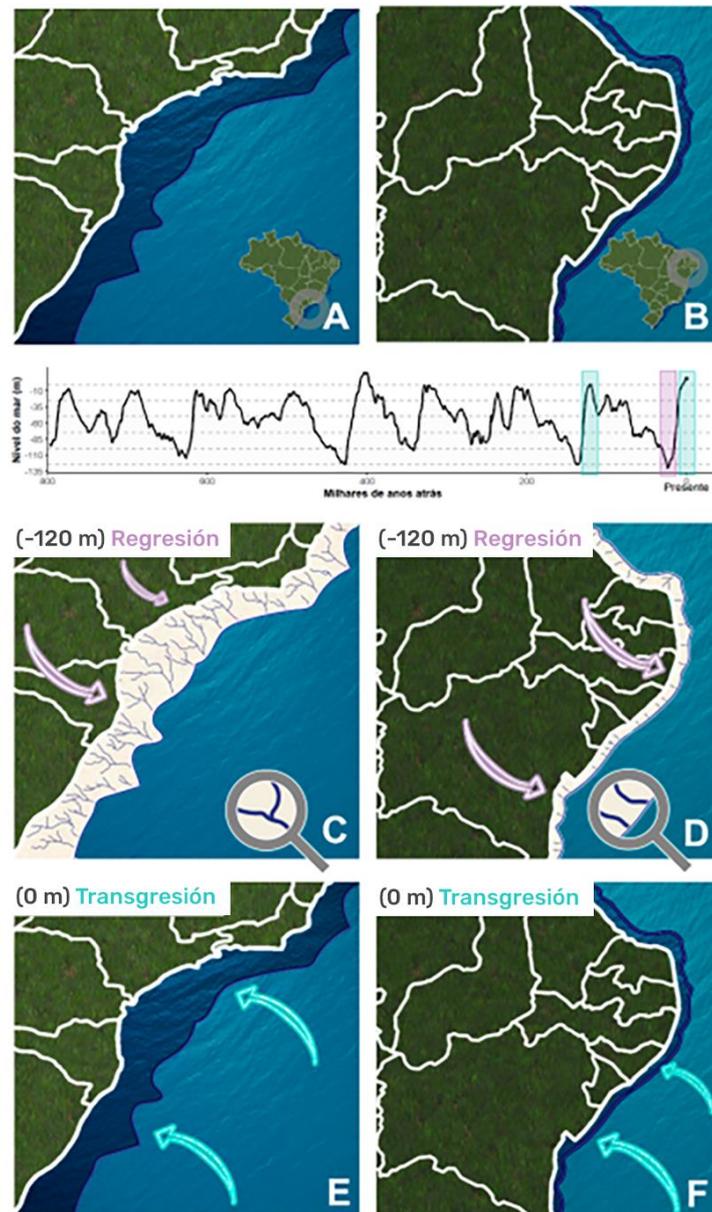
Ilustración 1. Representación de paleodrenajes. Durante el Último Máximo Glacial (UMG), la línea de costa retrocedió en -120 m, permitiendo la conexión entre paleodrenajes de cuencas distintas (Cuenca A y Cuenca B). / Imagen: Juliana Cicceto y Walter Boeger

Con el aumento subsiguiente del nivel del mar, las comunidades de las cuencas involucradas se vuelven gradualmente más aisladas y las especies tienen la oportunidad de diferenciarse, ya que no intercambian material genético durante este período. Ciclos repetidos de fluctuación del nivel del mar generan ciclos de aislamiento y expansión de comunidades y resultan en una gran diversificación de la comunidad de peces de las cuencas hidrográficas involucradas. Este es el proceso del Pulso de Taxón.

Sin embargo, en la costa brasileña y probablemente en otras regiones del mundo, la conexión entre cuencas costeras adyacentes depende principalmente del ancho de la plataforma continental. Cuanto menor sea la extensión de esta, menor será la probabilidad de contacto entre paleodrenajes de cuencas hidrográficas diferentes, ya que habrá menos espacio para el flujo de los ríos en la plataforma (infografía 1, D). Por otro lado, cuando la extensión de la plataforma continental es mayor, aumenta la probabilidad de contacto entre paleodrenajes de las cuencas, ya que hay más espacio para el flujo de los ríos a lo largo de la misma plataforma (infografía 1, C). Dado que muchos peces de agua dulce no sobreviven en ambientes con alta salinidad y dependen exclusivamente de la conexión entre sistemas de drenaje de agua dulce, entre ríos adyacentes, a partir de paleodrenajes, permitieron la dispersión de peces que antes estaban aislados en sus respectivas cuencas.

Se observan diferencias en el ancho de la plataforma continental entre la costa del sur de Brasil (infografía 1, A) y el noreste de Brasil (infografía 1, B). En estas regiones, la amplitud espacial para la dispersión y el contacto entre las especies de peces costeros es diferente, ya que, a partir del ancho de la plataforma, la extensión de los paleodrenajes formados durante períodos de bajo nivel del mar difiere. Los ríos de las cuencas más al sur, donde el ancho de la plataforma es mayor, pueden conectarse con mayor probabilidad a

través de paleodrenajes, ya que presentan una plataforma continental de mayor extensión, aumentando la oportunidad de conexión entre estas cuencas (infografía 1, C).



Infografía 1. Plataforma continental a lo largo de la costa brasileña. A-C-E: En el sur de Brasil; y B-D-F: En el noreste de Brasil. Eventos de regresión del nivel del mar (C-D), en -120 metros, seguidos por eventos de transgresión del nivel del mar (E-F). Las líneas blancas representan los límites de los estados y el país. / Imagen: Juliana Cicceto y Walter Boeger

Basándonos en la batimetría^h actual, es posible estimar cómo se organizaron los paleodrenajes durante el **Último Máximo Glacial (UMG)** en el pasado y cómo se establecieron las conexiones entre las cuencas distribuidas a lo largo de la costa brasileña (ilustración 1). A través de la reconstrucción de los paleodrenajes, podemos estimar la conexión entre las cuencas costeras en el tiempo y el espacio (ilustración 1, C y D).

La comprensión de este proceso histórico puede ayudarnos a entender patrones de riqueza, endemismo y estructura de comunidades. Por lo tanto, observar cómo los eventos ecológicos y evolutivos históricos influyen en la biodiversidad actual es esencial para comprender los patrones de formación de futuras comunidades biológicas, especialmente a partir de proyecciones de cambio climático. La hipótesis del Pulso de Taxón nos permite extrapolar cómo las interacciones de los organismos acuáticos oscilan en el tiempo.

Con el aumento del nivel del mar debido al calentamiento global, por ejemplo, se espera el aislamiento de las cuencas y, en consecuencia, una pérdida sustancial de la diversidad genética y taxonómica de los peces costeros. La oscilación entre el aislamiento y la expansión de las cuencas hidrográficas se ve facilitada por las crecientes modificaciones de los entornos naturales y las alteraciones climáticas. Por lo tanto, es necesario discutir los posibles efectos de estos cambios en la biodiversidad de los peces costeros, especialmente a partir del aislamiento de estas comunidades que se espera en un futuro cercano.

Más información en:

1. Baggio, R. A., Stoiev, S. B., Spach, H. L., Boeger, W. A. Opportunity and taxon pulse: the central influence of coastal geomorphology on genetic diversification and endemism of strict estuarine species. *Journal of Biogeography*, 2017.

2. Brooks, Daniel R., Hoberg, Eric P., Boeger, Walter A. The Stockholm paradigm: climate change and emerging disease. University of Chicago Press, 2019.
3. Hoberg, Eric P., Brooks, Daniel R. Beyond vicariance: Integrating taxon pulses, ecological fitting and oscillation in evolution and historical biogeography. In: The Biogeography of Host-Parasite Interactions, 2010. Oxford University Press.
4. Spratt, Rachel M., Lisiecki, Lorraine E. A late Pleistocene Sea level stack. *Climate of the past*, 2016.
5. Thomaz, Andréa T., Knowles L. Lacey. Flowing into the unknown: inferred paleodrainages for studying the ichthyofauna of Brazilian coastal rivers. *Neotropical Ichthyology*, 2018.
6. Wang, J., Church, J.A., Zhang, X. et al. Reconciling global mean and regional sea level change in projections and observations. *Nature Communication*, 2021.
7. Martins, A. (2011). Calculan en 8,7 millones el número de especies del planeta. BBC News Mundo. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2011/08/110824_especies_censo_am

Edición: Rosa Maria Dias, David González

Colaboración: Alfonso Pineda, Edna Liliana Amórtegui Rodríguez,
Isabela Machado, Ángela Gutiérrez C

Cítese como: Ciccheto, J, Boeger, W. 2023. *La fluctuación del mar y su efecto en la biodiversidad de ambientes de agua dulce*. Revista Bioika, edición 10. Disponible en: <https://revistabioika.org/es/palabra-de-especialista/post?id=146>