

Genes on the move:
migration and gene flow as drivers of genetic diversity

Genes en movimiento: la migración y el flujo génico como motores de diversidad genética

Marlen Sabina Alvarado-Cárdenas¹, Juan Pablo Enríquez-Ruíz¹,
Jesús Hiram Otero-Campa¹, Jonatan Hiram Pallanes-Dávila¹,
Andrea Estefanía Vázquez-Puebla¹, Alejandro Varela-Romero¹,
Nohelia Guadalupe Pacheco-Hoyos¹ y José Manuel Grijalva-Chon^{1*}

Resumen

El flujo genético es un proceso evolutivo que permite el intercambio de variantes de genes entre distintas poblaciones de una especie, modificando su diversidad y volviéndolas similares. Este fenómeno puede ocurrir de forma natural, pero también puede ser inducido artificialmente por los seres humanos. En el presente ensayo se exploran sus mecanismos, las barreras que pueden limitarlo, así como sus efectos en la variabilidad genética en la población receptora. También se abordan sus aplicaciones en conservación y los posibles riesgos ecológicos cuando no se regula adecuadamente. Se concluye que, aunque el flujo génico puede ser beneficioso, requiere regulación y análisis ético cuando es inducido artificialmente, debido a sus posibles consecuencias ambientales.

Palabras clave: Migración, flujo genético, evolución, rescate genético, variabilidad genética.

¹ Universidad de Sonora. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Laboratorio de Ecología Molecular. Ave. Colosio s/n, Col. Centro. Hermosillo, Sonora, México CP 83000.

* Autor de correspondencia: manuel.grijalva@unison.mx Cel: 662-4000390



Abstract

Gene flow is an evolutionary process that enables the exchange of genetic variants between different populations of a species, thereby modifying their genetic diversity and increasing their similarity to one another. Although this phenomenon can occur naturally, humans can artificially induce it. This essay examines its mechanisms, the barriers that can limit its effectiveness, and its impact on genetic variability in the recipient population. It also addresses its applications in conservation and the potential ecological risks associated with inadequate regulation. It concludes that, although gene flow can be beneficial, it requires regulation and ethical analysis when artificially induced, due to its potential environmental consequences.

Keywords: Migration, gene flow, evolution, genetic rescue, genetic variability.

Introducción

La increíble biodiversidad presente en nuestro planeta es un fenómeno que desde los tiempos de Charles Darwin y hasta la fecha ha impresionado a comunidades enteras de científicos y filósofos. Cuando pensamos en diversidad de especies vivientes, tenemos que recordar que ésta se ha ido formando a partir de los cambios graduales a los que las poblaciones están sujetas (Benton, 2015). Estos cambios hoy en día son atribuidos a diversas fuerzas que los impulsan, conocidas como fuerzas evolutivas y actualmente se conocen cuatro: mutación, deriva genética, migración y selección natural.

Gran parte de los enfoques en evolución se centran en la selección natural, la cual es el proceso evolutivo que favorece a los organismos mejor adaptados a su entorno, aumentando sus posibilidades de sobrevivir y reproducirse. Sin embargo, los avances científicos en técnicas moleculares han permitido medir de manera cualitativa y cuantitativa el peso que tienen las demás fuerzas evolutivas, como la migración, sobre los diferentes efectos de cambio en las poblaciones (Araujo-Soto, 2020). La migración, entendida como un fenómeno de desplazamiento de individuos de un lugar a otro, tiene un impacto sobre los ecosistemas y para los individuos de una especie puede ser un mecanismo de supervivencia. El impacto de la migración sigue siendo relevante en campos como la conservación biológica, la agricultura y la biotecnología. De esta forma, la migración, junto a la mutación, son fuerzas que propician directamente la diversidad genética en las poblaciones. Muchas especies silvestres, desde aves

y peces hasta mamíferos e insectos, realizan migraciones periódicas que les permiten sobrevivir y prosperar en diferentes entornos. Estos desplazamientos no solo tienen un impacto profundo en los individuos que migran, sino que también influyen significativamente en la estructura genética, la dinámica poblacional y la ecología de los lugares a los que migran.

En un mundo donde la intervención humana en los ecosistemas aumenta de forma continua, ya sea a través de organismos genéticamente modificados, reproducción asistida o modificaciones del entorno natural, es esencial entender cómo funciona la migración y el flujo genético, así como sus efectos. Por lo tanto, surge la siguiente interrogante: ¿qué impacto tiene este proceso, ya sea natural o artificial, en la diversidad genética de las especies? Este ensayo tiene como propósito examinar cómo ocurre el flujo genético, sus implicaciones en la diversidad genética y los desafíos que surgen cuando este proceso es alterado o inducido por intervención humana. Comprender su funcionamiento es crucial, ya que, si bien puede ser una herramienta para la adaptación y la supervivencia, también puede representar un riesgo para los ecosistemas cuando se produce de manera artificial, no controlada o con efectos no previstos. Esta doble cara del flujo genético lo convierte en un tema central para el diseño de estrategias de conservación.

¿Son la migración y flujo genético lo mismo?

Abordemos primero la migración considerando dos categorías. Una de ellas se refiere a las migraciones periódicas o estacionales, que implican la participación de todos o casi todos los individuos de la especie en un tránsito de ida y vuelta y acoplado en muchos casos a los ciclos de reproducción, por ejemplo, México recibe cada invierno a varias especies, entre las que podemos mencionar están la ballena gris (*Eschrichtius robustus*), la mariposa monarca (*Danaus plexippus*), los pelícanos blancos (*Pelecanus erythrorhynchos*) y el colibrí rufo (*Selasphorus rufus*) (Fig. 1), entre otros. La otra categoría de migración ocurre cuando la distribución de una especie se divide en varias poblaciones separadas y bajo ciertas circunstancias algunos individuos de una población pueden moverse a otra. Esta separación poblacional puede deberse a la fragmentación del área de distribución original de la especie debido a la intervención humana, como la ocupación urbana, el establecimiento de áreas agrícolas, la deforestación o la destrucción de hábitat por varios motivos. Si esta distribución fragmentada de la especie se mantiene sin migrantes entre las poblaciones, entonces cada una de las poblaciones se diferenciará del resto de manera independiente. Esta diferenciación generada paulatinamente a través de generaciones puede interrumpirse cuando los individuos de una población migran a otra.



Ahora bien, el flujo genético es el movimiento exitoso de genes entre las poblaciones, ya sea por migración o por el traslado de gametos. Por lo tanto, este proceso y la migración no son lo mismo, debido a que la migración es simplemente el movimiento de individuos de un lugar a otro, mientras que el flujo genético requiere la reproducción exitosa entre los individuos migrantes y las poblaciones a las que se unen o visitan, por lo que, si un individuo migrante no procrea en la población a la que llega, no habrá impacto genético. El flujo genético puede ocurrir sin migración directa de organismos, como sucede en muchas plantas donde los gametos masculinos (granos de polen) se dispersan sin que los individuos se desplacen.

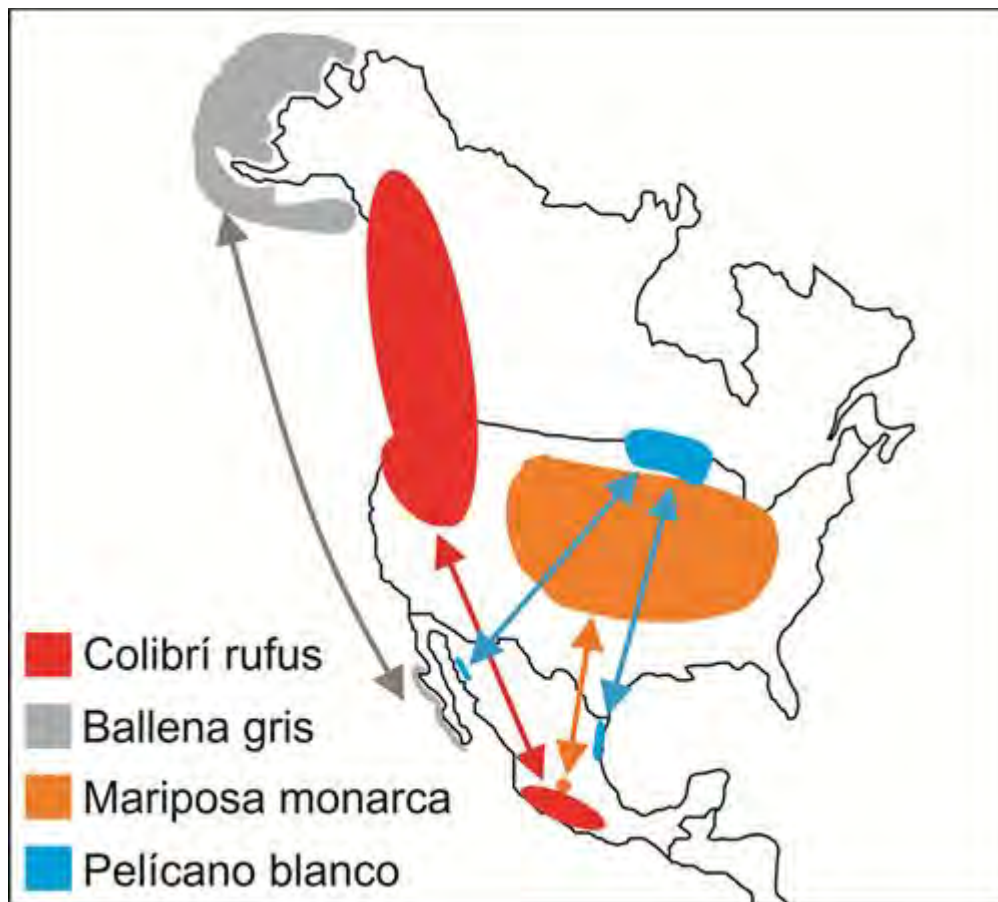


Figura 1. Distribución aproximada de algunas especies que realizan grandes migraciones hacia México.

En ocasiones una especie habita un área amplia y aparentemente continua, sin embargo, puede haber parches poblacionales diferenciados. Dentro de cada uno de estos parches, las probabilidades de que dos individuos se reproduzcan depende de su ubicación dentro de la población. En esto influyen dos aspectos: la extensión del área de distribución de la especie y la capacidad de desplazamiento de los individuos ya que la distancia puede ser un reto a vencer. Ejemplo de esto es una especie con limitadas capacidades de desplazamiento, como lo puede ser el camarón hada (*Branchipodopsis wolffi*), un pequeño crustáceo que vive en pozas o charcas efímeras en zonas rocosas del sur de África. Su área de distribución geográfica es muy amplia pero los organismos se reproducen con individuos de la misma poza o con los que viven en pozas

cercanas si hay desbordamiento debido a fuertes lluvias torrenciales. Una característica del ciclo reproductivo de esta especie es que puede depositar huevecillos que se enquistan para resistir largos períodos de desecación. Hulsmans *et al.* (2007) comprueban con un análisis genético que este crustáceo tiene la oportunidad de reproducirse con otros de su especie en pozas tan alejadas como 50 km ya que sus huevecillos enquistados pueden ser transportados por fuertes viento o por las patas de aves que se posan en el área de la poza (Fig. 2). En ese estudio se puso en evidencia que la distancia determina el grado de similitud genética entre las poblaciones que tienen una distribución geográfica fragmentada: a mayor distancia geográfica, menor oportunidad de reproducirse y por lo tanto menor similitud genética. A este fenómeno se le conoce como aislamiento por distancia, lo que provoca que se formen pequeñas subpoblaciones con características genéticas propias (Hamilton, 2009). Además, el aislamiento por distancia también puede ocurrir como resultado de relaciones complejas como una competencia interespecífica, es decir, competencia entre dos especies. Borzée *et al.* (2016) demostraron que dos especies de rana (*Hyla japonica* y *Hyla suweonensis*) pueden distribuirse de una manera no homogénea debido a la competencia por los espacios, lo que fragmenta la distribución y por lo tanto las probabilidades de encuentros reproductivos.

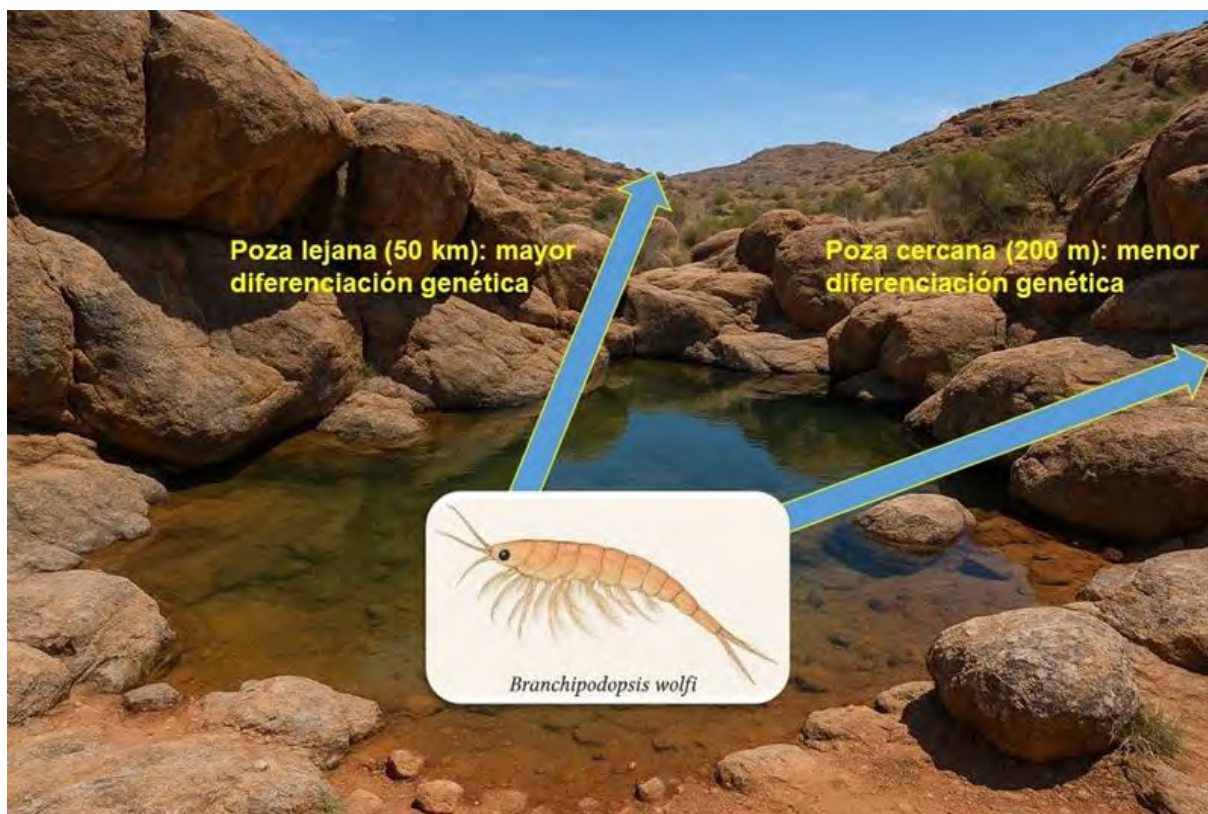


Figura 2. El crustáceo hada (*Branchipodopsis wolfi*) vive en pequeñas charcas efímeras en el sur de África y es más probable que se cruce con organismos de charcas cercanas que con organismos de charcas lejanas.



Relación entre flujo génico y diversidad genética

El flujo genético tiene dos efectos principales en las poblaciones involucradas, siendo el primero el aumento de la diversidad genética, ya que cada población puede generar diferentes características que se comparten mediante el flujo, enriqueciendo así la diversidad genética de la población que las recibe (Pierce, 2005). La diversidad genética es esencial para la supervivencia de una población, debido a que aumenta las probabilidades de que algunos individuos posean combinaciones genéticas que les permitan adaptarse a cambios ambientales. En este contexto, el flujo genético cumple una función clave: introduce nuevas formas alternativas de los genes, lo que se conoce como alelos, que enriquecen el acervo genético de una población, contrarrestando los efectos de procesos que tienden a reducir la diversidad (Pierce, 2005; Hamilton, 2009). Esto es particularmente relevante en poblaciones pequeñas o aisladas, donde los individuos suelen compartir un alto grado de parentesco que puede provocar la acumulación de alelos que afectan la salud y la fertilidad del grupo. El ingreso de nuevas alternativas genéticas, a través del flujo genético, puede restaurar parte de la variabilidad genética perdida y mejorar la viabilidad del conjunto (Pierce, 2005). Sin embargo, si el flujo genético se define como la introducción de alelos de diferentes poblaciones, puede implicar la dispersión de alelos asociados a enfermedades hereditarias. No siempre “adquirir” genes aumenta las probabilidades de adaptarse a cambios ambientales. Si se tiene la fortuna de que se introduzcan genes “buenos” se puede tener éxito, pero en la “ruleta genética” también se pueden “adquirir” genes defectuosos que induzcan efectos no benéficos. Pero el beneficio neto del flujo genético es que proporciona el “material” sobre el cual puede actuar la selección natural, favoreciendo a aquellos individuos que portan alelos más adaptativos en determinados contextos ambientales (Hamilton, 2009).

Ahora bien, el segundo de los efectos principales del flujo es la similitud u homogeneización entre las características genéticas de la población a la que se migró (Pierce, 2005). Imaginemos tres poblaciones separadas y aisladas entre sí y que se han diferenciado en el porcentaje o la frecuencia de individuos que son portadores de la variante A de un gen. En la figura 3A, la población 1 se caracteriza porque el 40% de la población es portadora de la variante genética A, mientras que en la población 2 el 80% son portadores y en la población 3 el 20% son portadores. En un momento dado se establece un puente migratorio de la población 1 hacia la 2 y 3 de tal forma que un 10% de la población 1 migra anualmente hacia las otras dos poblaciones. Mientras el flujo migratorio continua constante a través de las generaciones, las poblaciones 2 y 3 pasan a ser poco a poco más parecidas genéticamente a la población 1. Además, mientras más grandes sean inicialmente las diferencias genéticas entre las poblaciones, el efecto de la migración será mayor, pero irá decayendo poco a poco conforme las poblaciones se vayan haciendo similares

(Pierce, 2005). Los genetistas han desarrollado ecuaciones para calcular el número de generaciones necesarias para alcanzar una homogenización poblacional manteniendo un flujo migratorio constante a través de las generaciones. En nuestro ejemplo, después de 45 generaciones con una tasa migratoria del 10% generacional, las poblaciones 2 y 3 son prácticamente idénticas a la población 1 (Fig. 3B).

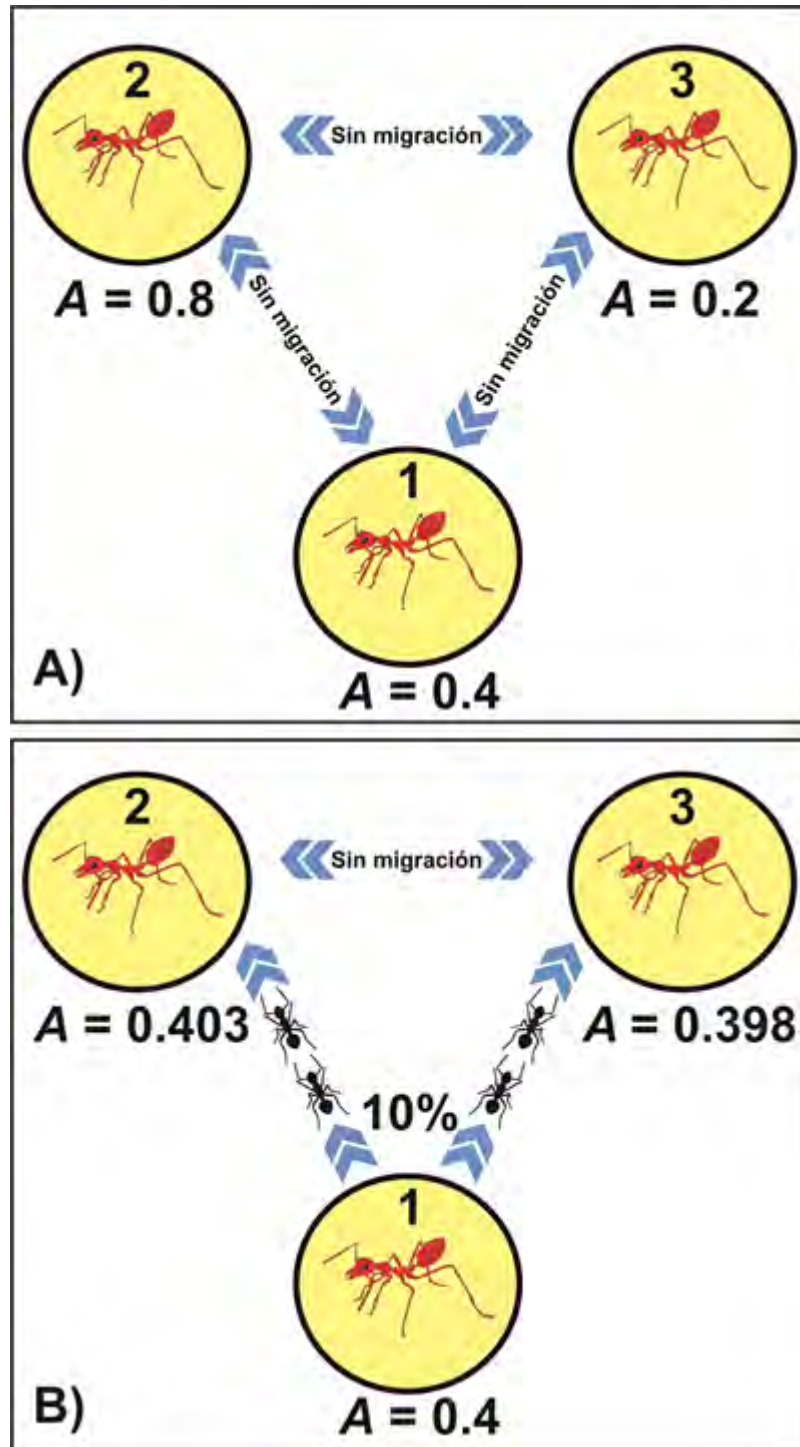


Figura 3. Efecto homogeneizador de la migración. En A) se muestran tres poblaciones aisladas y diferenciadas. En B) hay un flujo constante a una tasa del 10% por generación de la población 1 hacia las poblaciones 2 y 3. Después de 45 generaciones las tres poblaciones son prácticamente iguales si no hay alguna otra fuerza evolutiva que intervenga.



Causas e individuos que participan

Madrigal (2004) define la migración como *un fenómeno orientado principalmente en la búsqueda de sitios ideales de apareamiento y anidación, donde la cantidad de alimento es suficiente para mantener a toda la población e incluso a los nuevos miembros*. Ocurre en respuesta a un cambio en las condiciones físicas, químicas y biológicas, tanto del medio externo como de la fisiología del animal. De esta manera, las especies han logrado adaptarse a diferentes hábitats (que son ideales) que ocupan, y esto a su vez impide de cierto modo que las poblaciones se mantengan aisladas unas de otras durante largos periodos de tiempo por la reunión periódica en los sitios de apareamiento y anidación. Otro punto importante es que este proceso ayuda en gran medida al control de las poblaciones de depredadores por la fluctuante disponibilidad de las presas migrantes y también de las especies que sirven de alimento para los grupos que migran.

Implicaciones ecológicas y evolutivas

La importancia ecológica más importante es posiblemente la polinización y dispersión de semillas que algunas de las especies realizan durante su traslado migratorio. Por ejemplo, los murciélagos frugívoros que se alimentan de néctar y frutas realizan importantes funciones de polinización y dispersión de semillas de varias especies de plantas (Fig. 4). Villalobos-Chaves y Rodríguez-Herrera (2021) reportaron que los murciélagos *Artibeus phaeotis* y *Uroderma convexum* dispersaron 2,310 semillas en sus áreas de influencia y que, de éstas, 118 sobrevivieron para convertirse en plántulas. Si bien eso representa sólo un 5.1% de sobrevivencia de las semillas, los autores resaltan la importancia de los murciélagos en la dispersión y éxito reproductivo de las especies vegetales. Los colibríes también desempeñan un papel fundamental en el equilibrio biológico de los ecosistemas, especialmente como agentes polinizadores (Ruiz-Márquez, 2018). Muchos ciclos de migración en algunas especies están en coordinación con ciclos de floración de las plantas. El colibrí rufo viaja 6,300 kilómetros desde Alaska a México a finales del verano, después, migran hacia el norte a lo largo de la ruta migratoria del Pacífico. Este movimiento puede sincronizarse con el florecimiento de las flores y el brote de hojas nuevas en la primavera, que generalmente comienza a principios de marzo. Además, esta migración está también acoplada con la disponibilidad de insectos, que constituyen una importante fuente de alimento para estas aves durante su viaje migratorio (Welch y Suarez, 2008).

Considerando otra escala de tiempo, el flujo génico no es un fenómeno neutro: puede tener efectos tanto positivos como negativos en la dinámica evolutiva. Por un lado, facilita la adaptación al introducir nuevas variantes genéticas que podrían ser útiles; por otro, puede impedir la diferenciación genética necesaria para la especiación. Los modelos evolutivos han

mostrado que, incluso en presencia de flujo genético moderado, las poblaciones pueden divergir si hay una presión de selección lo suficientemente fuerte. Esto sucede, por ejemplo, cuando dos ambientes diferentes favorecen distintas combinaciones genéticas, lo que lleva a una evolución divergente a pesar del intercambio de genes (Hamilton, 2009), incluso en escenarios donde las poblaciones se adaptan de manera convergente, pero mediante rutas genéticas diferentes, pueden surgir descendientes híbridos inviables o estériles, reforzando así la separación evolutiva (Porter y Johnson, 2002).

Las consecuencias de la migración en las regiones de origen son muchas y muy variadas. La migración es uno de los componentes de cambio demográfico que, junto con la mortalidad y la fecundidad, puede afectar el crecimiento natural y la estructura por sexo y edades de la población, ya sea por sus efectos directos o indirectos, pues la población emigrante suele ser joven (potencialmente reproductiva) aumentando la natalidad y disminuyendo la mortalidad en la región de destino (CONAPO, 2010).



Figura 4. Los murciélagos frugívoros son importantes vehículos para la dispersión de semillas.



Implicaciones para la conservación

En el ámbito de la conservación biológica, el flujo genético puede ser una herramienta muy valiosa. Por ejemplo, en especies amenazadas cuyas poblaciones están fragmentadas, facilitar la migración entre estos fragmentos poblacionales, lo que se conoce como rescate genético, puede aumentar la viabilidad genética en las poblaciones pequeñas que estén en peligro de extinción (Pierce, 2005). Sin embargo, esta estrategia requiere un diseño cuidadoso ya que introducir individuos de poblaciones genéticamente muy diferentes podría causar desequilibrios como la eliminación de adaptaciones locales, que pueden ser contraproducentes en ambientes extremos o únicos (Hamilton, 2009). Además, otro posible riesgo de los migrantes rescatistas puede ser el éxito reproductivo extremo.

Hay dos ejemplos emblemáticos del éxito reproductivo extremo de migrantes rescatistas. Uno de ellos se dio en los Países Bajos, donde en la primera mitad de la década del 2000 se introdujeron nutrias para reestablecer una población extinta, sin embargo, después de unos años resultó que dos machos paternizaron dos tercios de la población, incrementando los niveles de endogamia (Koelewijn *et al.*, 2010). Otro ejemplo es de una población aislada de lobos en la Isla Royale del Lago Superior. Esa población aislada estaba en crisis genética por su reducido tamaño, situación que mejoró al principio por la introducción de un individuo macho, sin embargo, su extremo éxito reproductivo provocó que 10 años después se convirtiera en el ancestro de todos los lobos de la isla (Adams *et al.*, 2011).

Conclusión

La migración es un fenómeno esencial que impacta profundamente no solo a las poblaciones silvestres, sino también tiene fuertes repercusiones ecológicas de gran importancia. A través del aumento de la diversidad genética, la mejora de la conectividad poblacional y el desarrollo de adaptaciones especializadas, la migración contribuye a la salud y sostenibilidad de muchas especies, sobre todo cuando sus distribuciones geográficas están muy fragmentadas. Aún con lo anterior, cabe la posibilidad de generar riesgos ecológicos con la introducción de variantes genéticas que afecten las adaptaciones locales o al dificultar la especiación. Sin embargo, las amenazas actuales destacan la importancia de los esfuerzos de conservación para proteger a estos viajeros incansables y los ecosistemas que dependen de ellos. Comprender estos efectos es crucial para la conservación y el manejo de las especies migratorias.

Referencias

- Adams, J.R., L.M. Vucetich, P.W. Hedrick, R.O. Peterson y J.A. Vucetich. 2011. *Genomic sweep and potential genetic rescue during limiting environmental conditions in an isolate wolf population*. Proceedings of the Royal Society Biological Sciences 278: 3336-3344.
- Araujo Soto, A. 2020. *Migración y biología*. Universitaria 3(23): 28-29.
- Benton, M.J. 2015. *Exploring macroevolution using modern and fossil data*. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 282(1810): 20150569.
- Borzée, A., J.Y. Kim y Y. Jang. 2016. Asymmetric competition over calling sites in two closely related treefrog species. Scientific Reports 6: 32569.
- CONAPO. 2010. *Algunos efectos de la migración internacional en los lugares de origen y destino*. http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/intensidad_migratoria/pdf/Efectos.pdf (consultado el 04/02/2025).
- Hamilton, M.B. 2009. *Population Genetics*. Wiley-Blackwell. Chichester, UK. 407 pp.
- Hulsmans, A., K. Moreau, L. De Meester, B.J. Riddoch y L. Brendonck. 2007. *Direct and indirect measures of dispersal in the fairy shrimp Branchipodopsis wolffi indicate a small-scale isolation-by-distance pattern*. Limnology and Oceanography 52: 676-684.
- Koelewijn, H., M. Perez-Haro, H.A.H. Jansman, M.C. Boerwinkel, J. Bovenschen, D.R. Lammertsma, F.J.J. Niewold y A.T. Kuiters. 2010. *The reintroduction of the Eurasian otter (Lutra lutra) into the Netherlands: hidden life revealed by noninvasive genetic monitoring*. Conservation Genetics 11: 601-614.
- Madrigal, Á. 2004. *Migración y emigración de especies*. Revista de Ciencias Ambientales 28(1): 3-12.
- Pierce, B.A. 2005. *Genética. Un enfoque conceptual*. Editorial Médica Panamericana. Madrid, España. 806 pp.
- Porter, A.H. y N.A. Johnson. 2002. *Speciation despite gene flow when developmental pathways evolve*. Evolution 56: 2103-2111.
- Ruiz-Márquez, A.A. 2018. *Importancia ecológica y estrategias de protección de los murciélagos migratorios de México con algún estatus de riesgo*. Tesis de Maestría. Colegio de la Frontera Sur. México. 78 pp.
- Villalobos-Chaves, D. y B. Rodríguez-Herrera. 2021. *Frugivorous bats promote epizootic seed dispersal and seedling survival in a disturbed Neotropical forest*. Journal of Mammology 102: 1507-1513.



Welch, K.C. y R.K. Suarez. 2008. *Altitude and temperature effects on the energetic cost of hover-feeding in migratory rufous hummingbirds, *Selasphorus rufus**. Canadian Journal of Zoology 86: 161-169.

Semblanzas de los autores

- **Marlen Sabina Alvarado-Cárdenas.** Estudiante de la Licenciatura en Biología de la Universidad de Sonora.
- **Juan Pablo Enríquez-Ruíz.** Estudiante de la Licenciatura en Biología de la Universidad de Sonora.
- **Jesús Hiram Otero-Campa.** Estudiante de la Licenciatura en Biología de la Universidad de Sonora.
- **Jonatan Hiram Pallanes-Dávila.** Estudiante de la Licenciatura en Biología de la Universidad de Sonora.
- **Andrea Estefanía Vázquez-Puebla.** Estudiante de la Licenciatura en Biología de la Universidad de Sonora.
- **Alejandro Varela-Romero.** Doctor en Ciencias por el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) y Profesor-Investigador (SNII 2) en el Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora, interesado principalmente en la filogenética y conservación de los peces nativos de agua dulce del noroeste de México.
- **Nohelia Guadalupe Pacheco-Hoyos.** Maestra en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México y Técnico Académico en el Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora.
- **José Manuel Grijalva-Chon.** Doctor en Ciencias por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y Profesor-Investigador (SNII 2) en el Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora, interesado principalmente en la descripción de la estructura genética poblacional de especies marinas.

Cita

Alvarado-Cárdenas, M.S., J.P. Enríquez-Ruíz, J.H. Otero-Campa, J.H. Pallanes-Dávila, A.E. Vázquez-Puebla, A. Varela-Romero, N.G. Pacheco-Hoyos y J.M. Grijalva-Chon. Genes en movimiento: la migración y el flujo génico como motores de diversidad genética. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (3): 240-252. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.03.0014>.

Sometido: 23 de mayo de 2025

Aceptado: 02 de octubre de 2025

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Francisca Elizabeth Villegas Carrazco