

El destino de la reina: epigenética en la colmena

The fate of the queen: epigenetics in the hive

Omar Ernesto Galaviz-Silva¹; Nuria Areli Marquez-Perez¹

¹ Maestría en Ciencias Médicas, Departamento de Ciencias Médicas, División de Ciencias de la Salud, Campus León, Universidad de Guanajuato. oe.galavizsilva@ugto.mx, na.marquezperez@ugto.mx

Resumen

Todas las larvas tienen el mismo código genético, no se sabe cuál será la reina, las obreras o los zánganos. Entonces, ¿cómo es que cada larva adquiere su papel en la colmena? ¿qué determina su destino? La magia la lleva a cabo la jalea real, un alimento que, sin alterar el ADN, que puede activar o desactivar genes específicos mediante diferentes mecanismos. Este fenómeno es estudiado por la epigenética, una ciencia emergente que estudia cómo el ambiente influencia la expresión de genes. Estos mecanismos son los responsables de los distintos tipos de abejas, modificando desde su desarrollo hasta su longevidad.

Palabras clave: abejas, epigenética, jalea real, metilación del ADN, modificaciones de histonas, DOHaD.

Abstract

All bee larvae share the same genetic code; no one knows which will become the queen, workers, or drones. So how does each larva acquire its role in the hive? What determines its destiny? The magic lies in royal jelly, a food that, without altering DNA, can activate or silence specific genes through different mechanisms. This phenomenon is studied by epigenetics, an emerging science that examines how the environment influences gene expression. These mechanisms are responsible for the different types of bees, shaping everything from their development to their longevity.

Keywords: epigenetics, honeybee, royal jelly, DNA methylation, histone modifications, DOHaD.

Somos gemelos, ¿somos idénticos?

Imaginemos por un momento el nacimiento de dos hermanas gemelas, ambas son genéticamente idénticas. A los 3 años, es prácticamente imposible distinguir las entre sí, pero al pasar el tiempo van apareciendo diferencias sutiles entre ambas: estatura, tono de piel, timbre de voz, comportamiento y salud en general. Al paso del tiempo una de ellas desarrolla diabetes y muere a una edad temprana mientras que la otra vive con buena salud hasta los 90 años. ¿Por qué pasaría esto si tienen exactamente el mismo código genético? ¿Injusticia genética? En absoluto.

Es el ambiente, nuestro estilo de vida: los hábitos alimenticios, el estrés, calidad del sueño, incluso el lugar en el que vivimos. Todo aquello puede influir en el organismo y definir nuestra salud futura. Pero ¿cómo puede el ambiente modificar nuestro organismo sin modificar el ADN?

El secreto está en la epigenética

Diferentes estímulos pueden añadir o borrar marcas químicas en el ADN o en las proteínas que lo mantienen empaquetado. Uno de estos mecanismos clave es la metilación del ADN, que funciona como interruptor: que pueden apagar los genes, o encenderlos (4). Un gen activo suele encontrarse desmetilado (con moléculas de CH₃ pegadas encima de él). Cuando el gen comienza a adquirir grupos metilos (CH₃) este se vuelve inactivo. Sería el equivalente a un tren viajando sobre las vías del tren. En esta analogía, las vías del tren son el ADN y los metilos (CH₃) son señales de paro en la vía. Así, un ADN metilado (con muchos metilos) tendrá muchas señales alto y por ende mantendrá esas instrucciones apagadas (1).

Otro mecanismo, son las modificaciones de histonas, que aflojan o aprietan el ADN que, está empaquetado para facilitar o imposibilitar su lectura. Por ejemplo, el ADN de una sola célula humana mide alrededor de 2 m, que es enorme considerando el tamaño microscópico de la célula. Para dimensionar la longitud del ADN, si se tomara el ADN de todas las células que forman a un solo ser humano y se estirara como una cuerda, esta podría llegar al sol y regresar a la Tierra sin problemas. Entonces, ¿Cómo es que el ADN puede mantenerse en un espacio microscópico como el núcleo? Gracias a las histonas. Las histonas enrollan el ADN de forma equivalente a la cuerda de un yoyo y de esta manera es que se puede ir compactando la información genética, así que sin las histonas sería imposible contener el ADN al interior del núcleo. Esta interacción ADN-histonas es dinámica, de forma que se puede modificar que tan compacto se encuentra el ADN y por ende qué tan disponible está la información genética para ser leída (1).

Estos procesos son estudiados por la epigenética, que viene del griego y significa “sobre” o “encima de”, porque se trata de los mecanismos que actúan sobre el ADN sin modificar su código (1, 3). En el sentido que la genética estudia el conjunto de instrucciones necesarias para formar a un individuo, la epigenética se encarga más de entender el instructivo, para ver cuáles cosas serán utilizadas y cuáles no. Así es como se explican fenómenos como las diferencias entre gemelos o la transformación de una larva en una abeja reina (1, 4).

Es así como la epigenética permite comprender fenómenos como las diferencias entre los gemelos al nacer o la transformación de una larva en abeja reina. Una de sus herramientas es la adición de “interruptores” o “marcas químicas” al ADN, provocando así el encendido y apagado de genes. Hoy en día, se sabe que esos “interruptores” cambian la manera en que se leen los genes, lo que tiene el potencial de perdurar en el tiempo y pasar a la descendencia, de manera que el ambiente y hábitos de una generación podrían afectar a su progenie (1, 6).

Actualmente sabemos que esas marcas pueden ser tan fuertes que perduran y se heredan por las siguientes generaciones (6). El estudio de estos fenómenos en humanos es complicado por la duración de nuestros ciclos de vida. Afortunadamente, la naturaleza tiene un modelo fascinante que permite demostrar cómo los hábitos y el ambiente durante las primeras etapas de vida son cruciales para el futuro. Ese modelo son las abejas (4).

Lo que hace ideal a las abejas para el estudio de la epigenética son sus ciclos de vida cortos (semanas), su enorme número de individuos genéticamente idénticos y la facilidad con la que se puede controlar su alimentación. En un laboratorio, es posible criar cientos de abejas en poco tiempo y observar directamente cómo la dieta va moldeando su desarrollo. Esto en humanos es más complejo, porque estos estudios toman décadas, además de que existen dilemas éticos que, en una colmena no. Las abejas son, una ventana a la epigenética (1, 4).

La epigenética en la colmena

Cada colmena funciona de manera cooperativa y coordinada como una empresa. Dentro de ese sistema jerárquico, la abeja reina juega un papel esencial: es la única capaz de poner huevos y garantizar el nacimiento de nuevas abejas. En tiempos favorables (primavera y verano) llegan a poner ¡hasta 2,000 huevos por día! Estos, eclosionan 3 días después de la puesta, y darán origen a las larvas (4).

En una colmena sana, cada año nacen entre 175,000 y 200,000 abejas nuevas. Para la abeja mielífera (*Apis mellifera*) existen tres roles: obrera, zángano y reina (3). Entonces surge la pregunta: ¿quién elige a la futura reina? ¿Qué la vuelve distinta a las obreras y los zánganos?

Recordemos que, aunque la estructura de una colmena se asemeja a los sistemas de organización humana, aquí no existen votaciones ni exámenes para decidir el rol de cada larva. El secreto está en la alimentación (4).

Cada uno de estos roles son indispensables. Las obreras mantienen la colmena limpia, alimentan a las crías, recolectan el néctar y el polen, además de que ¡cuidan la entrada de la colmena! Los zánganos, por otro lado, tienen únicamente funciones reproductivas. Y la reina, que, con su cuerpo alargado y abdomen lleno de huevos, es la que producirá a las siguientes generaciones de abejas.

El misterio de la reina

La diferencia entre una abeja reina del resto, es que la abeja reina se alimenta exclusivamente de jalea real durante toda su vida, mientras que las demás abejas solo consumen jalea real los primeros 3 días de vida. Esto extiende su periodo de vida a hasta 5 años, en contraste con las cuatro a seis semanas de vida de las abejas obreras (4). Pero ¿cómo es que la alimentación define el destino de una abeja?

Las abejas reinas, son las de mayor tamaño y longitud, esto se debe a que ellas si desarrollan ovarios y glándulas capaces de producir feromona, a comparación de las obreras que son estériles y pequeñas (2). Además, las abejas reinas son más longevas, llegando a vivir hasta 5 años.



Figura 1. (*Apis mellifera*) abeja reina (centro, la más grande y larga) rodeada de abejas obreras. Fotografía de Scott Bauer, USDA Agricultural Research Service (dominio público).

Jalea real: la pócima que te convierte en reina

Contrario de lo que se creía antes, el origen de este fenómeno no está únicamente en las instrucciones del ADN, sino en si son o no son leídas (4). Aunque el ADN es prácticamente idéntico en todas las abejas dentro de una colmena, lo que determina cuál larva será la próxima reina no es el ADN en sí, sino cómo es que se interpretan sus instrucciones (1, 5).

Todos los seres vivos están hechos de células. En su interior existe una bóveda donde se conserva su bien más preciado: el ADN. Este código contiene todas las instrucciones para que la célula funcione, si se daña o degrada, la célula muere. Podríamos imaginarlo como un libro de recetas de cocina, donde cada receta sería un gen y el conjunto de recetas es la manera en que organismo debe funcionar (3).

Así como en una cocina no todas las recetas se preparan de forma simultánea, los genes también pueden expresarse solo en ocasiones especiales. Por ejemplo, si tengo antojo de alguna comida caliente, probablemente no elegiría una ensalada. Asimismo, si la instrucción de un gen no es necesaria en un momento específico, esta no será utilizada (se dice que el gen está inactivo). Para este fin, el ADN tiene “interruptores químicos” que encienden o apagan genes (5).

¿Y esto qué tiene que ver con la aparición de la abeja reina? La clave está en la composición de la jalea real. Todas las abejas contienen en su ADN los genes con las instrucciones para convertirse en reina, aunque estos genes están apagados. Es hasta que “algo” enciende estos genes que una abeja puede convertirse en la líder suprema de la colmena (4, 6).

El detonante de este encendido de genes de la realeza en la futura abeja reina es la molécula 10HDA (ácido 10-hidroxi-2-decenoico), también conocido como “el ácido de la abeja reina” ya que se encuentra exclusivamente en la jalea real (6). Así, mientras la futura abeja reina se alimenta de la jalea real, el 10HDA inhibe una enzima que añade grupos metilo al ADN, permitiendo que los genes de la realeza permanezcan activados. Además, la jalea real contiene royalactina, una proteína que estimula el crecimiento y la maduración de los ovarios, y flavonoides, que tienen efectos antioxidantes que favorecen la longevidad. Las larvas que no reciben la jalea real después del tercer día mantienen sus genes de la realeza silenciados y su desarrollo se orienta hacia la función de obrera o zángano (4, 6).

Esta diferencia sutil lleva a cambios en el comportamiento, la forma del cuerpo y el tiempo de vida. Las obreras se desarrollan más rápido, tienen el cuerpo pequeño y ovarios inmaduros, lo que las hace estériles (2). De manera que la única diferencia entre la abeja reina de las demás, es la alimentación que han recibido.

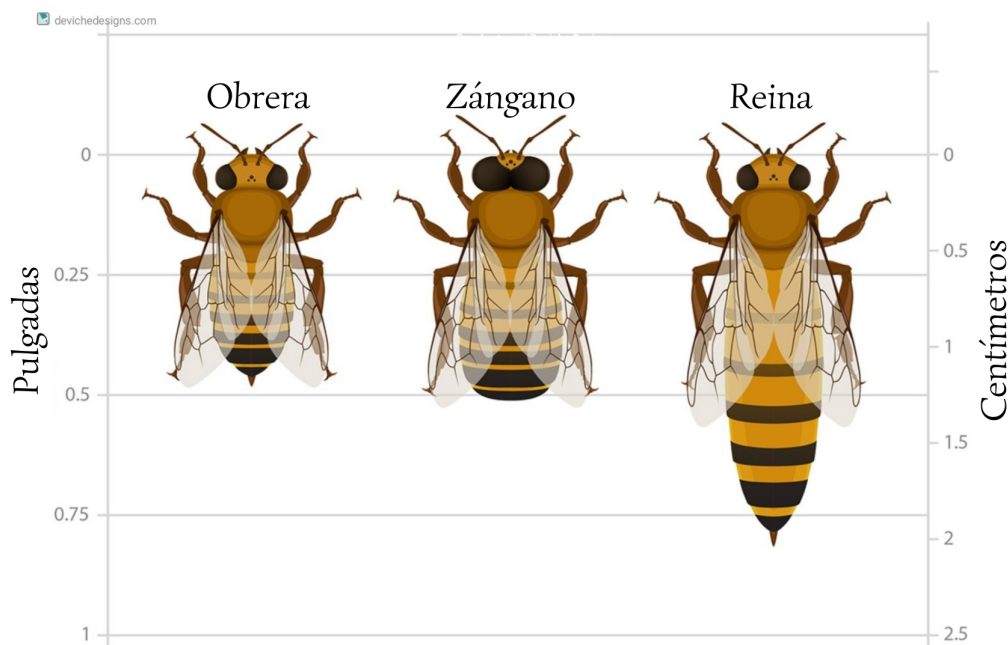


Figura 2. Tipos de abejas de la miel presentes en una colmena. Deviche Designs. [Ilustración vectorial; versión modificada con traducción de etiquetas al español]. Arizona State University.

La vida de las abejas obreras

Después de tres días de larva nutriéndose a partir de jalea real, las abejas obreras cambian su alimentación por néctar y polen. Esta dieta mantiene silenciados los genes de la realeza (4). Las abejas obreras representan cerca del 90% de la población de la colmena y pasan sus pocas semanas de vida al servicio de la colmena. Ellas, pueden desempeñar diferentes roles como de nodriza, limpiadora, cerera, guardiana o recolectora (1). A diferencia de las abejas reina, estas se desarrollan más rápido, por lo que tienen un cuerpo más pequeño y carecen de ovarios maduros, esto las hace estériles (2).

La vida de los zánganos

Los zánganos, son las abejas macho, cuya única función es la reproducción. Al igual que las obreras, los zánganos consumen jalea real solamente durante sus primeros tres días de vida larvaria (4). Los zánganos representan entre el tres y el diez por ciento de la población en una colmena. La abeja reina selecciona

meticulosamente algunos de estos zánganos con el fin de fecundarla y permitir así la formación de nuevas generaciones en la colmena. Minutos después del apareamiento, los zánganos mueren.

DOHaD: cuando el pasado sí importa

Así como el destino de una abeja se define por su dieta, en humanos sucede algo similar. Los científicos han desarrollado estudios sobre el DOHaD, siglas en inglés de "origen y desarrollo de la salud y la enfermedad. Estudios en humanos y modelos animales han demostrado la influencia del estilo de vida de los padres, en su progenie. Por ejemplo, la dieta durante el embarazo y la lactancia pueden modificar la manera en que se leen las instrucciones del bebé, con consecuencias variadas como mayor riesgo de obesidad, diabetes, etc. En cuanto a los padres, sus hábitos pueden dejar marcas en el ADN del espermatozoide, lo suficientemente fuertes para tener efectos en su descendencia (1),

Las consecuencias que el ambiente y la alimentación durante los primeros años de vida no son meras especulaciones. Desde el siglo pasado se han documentado eventos atribuibles al fenómeno DOHaD. Uno de los más conocidos ocurrió en la antigua Holanda (hoy llamada Países Bajos) durante la Segunda Guerra Mundial. A finales de la guerra (1944), se presentó una hambruna en la región y esto afectó a toda su población (incluidas las mujeres embarazadas). Un año después, con el fin del conflicto, volvió la prosperidad a la nación. Décadas después, se observó que los adultos nacidos durante la temporada de hambruna presentaban mayores riesgos de presentar enfermedades metabólicas, es decir, pese a no haber sufrido hambruna después del nacimiento, el que sus madres sí lo hayan vivido los predispuso a desarrollar enfermedades en su vida adulta (1).

Esto es equivalente a lo que sucede con la futura abeja reina: su alimentación con jalea real previo al nacimiento (en la etapa larvaria) modifica la forma en que se leen sus genes, llevándola a convertirse en la reina de la colmena (1, 4).

Conclusiones

Después de este largo viaje por la vida de una reina y su papel en la colmena, aprendimos una lección incómoda: nuestro destino no está escrito en las instrucciones del ADN, sino en cómo son leídas (1).

De este modo, todas las formas de vida (tú, yo, abejas, perros y gatos) somos el resultado de una compleja interacción de nuestros genes, las actividades que realizamos, los alimentos que consumimos y el entorno en que nos desenvolvemos. Con esto nos volvemos los actores principales de nuestra vida y no solo individuos con un destino definido por los genes que nos fueron heredados por nuestros padres.

Referencias

1. Hu, X., Xu, J., & Wang, K. (2025). Epigenetic Mechanisms in *Apis mellifera*: From Development to Environmental Adaptation. *Current Issues in Molecular Biology*, 47(7), 554. <https://doi.org/10.3390/cimb47070554>
2. García-Figueroa, C., Arechavaleta-Velasco, M. E., Ramírez-Ramírez, F. J., Montaña-Bermúdez, M., Vega-Murillo, V. E., & Alvarado-Avila, L. Y. (2021). Efectos epigenéticos para la expresión del peso de las reinas de las abejas melíferas. *LVI Reunión Nacional de Investigación Pecuaria. Memoria. Ciudad de México, 10-12 de nov. 2021*. https://www.researchgate.net/publication/356694349_EFECTOS_EPIGENETICOS_PARA_LA_EXPRESION_DEL_PESO_DE_LAS_REINAS_DE_LAS_ABEJAS_MELIFERAS
3. Maleszka, R. (2024). Reminiscences on the honeybee genome project and the rise of epigenetic concepts in insect science. *Insect Molecular Biology*, 33(5), 444–56. <https://doi.org/10.1111/imb.12888>
4. Chittka, A., & Chittka, L. (2010). Epigenetics of royalty. *PLoS Biol.*, 8(11), e1000532. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000532>
5. Foret, S., Kucharski, R., Pittelkow, Y., Lockett, G. A., & Maleszka, R. (2009). Epigenetic regulation of the honey bee transcriptome: Unravelling the nature of methylated genes. *BMC Genomics*, 10, 472. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-10-472>
6. Alhosin, M. (2023). Epigenetics Mechanisms of Honeybees: Secrets of Royal Jelly. *Epigenetics Insights*, 16. <https://doi.org/10.1177/25168657231213717>