

Toma de decisiones en la tarea de forrajeo de las hormigas

Maricruz Rangel-Galván^{1*} y Violeta Rangel-Galván²

¹ SECIHTI - Dirección de Innovación y Transferencia de Conocimiento, BUAP

² Facultad de Enfermería, Complejo Regional Centro, BUAP

* Dirección para correspondencia: maricruz.rangel@viep.com.mx

La tarea de forrajeo en una colonia de hormigas consiste en buscar, recolectar y transportar alimento o materiales desde el exterior hasta el nido. El éxito de esta actividad depende en gran medida de la coordinación colectiva y de la capacidad de las hormigas para interactuar con su entorno. Durante la búsqueda de alimento o materiales, las hormigas emplean diversos mecanismos sensoriales que les permiten detectar, interpretar y transmitir señales químicas, visuales y táctiles. Este proceso se realiza de manera organizada y eficiente, y es importante notar que no existe una figura central que regule las acciones de la colonia. Aunque haya castas, como la reina, esta no dirige el forrajeo ya que su función principal es la reproducción y no la organización de las labores. Así, cada hormiga actúa de forma autónoma siguiendo reglas simples y locales, como el seguimiento de las veredas de feromona dejadas por otras hormigas.

Aunque solemos asociar la toma de decisiones con procesos conscientes o racionales, en las hormigas este fenómeno se basa en reglas de comportamiento relativamente simples. En el contexto del forrajeo, la toma de decisiones se refiere al proceso mediante el cual una colonia selecciona colectivamente una entre varias

opciones disponibles, como elegir una ruta, explotar una fuente de alimento o redistribuir a sus forrajeras. Cada individuo responde únicamente a señales locales, como feromonas, contactos físicos o experiencias previas. Sin embargo, la suma de miles de interacciones individuales da lugar a decisiones colectivas altamente eficientes a nivel de colonia. En este sentido, la tarea de forrajeo constituye uno de los mejores modelos biológicos para estudiar cómo surge la inteligencia colectiva en sistemas descentralizados, donde la organización emerge sin necesidad de un líder que coordine las acciones del grupo. Pero ¿cómo logran miles de individuos coordinarse y seleccionar colectivamente las mejores alternativas sin que exista una autoridad central que dirija sus actividades?

Algunos aspectos generales del forrajeo comienzan cuando un grupo de exploradoras exitosas regresa al nido con alimento para reclutar a otras compañeras. En su camino de regreso, dejan un rastro de feromonas que debe reforzarse en cada viaje para que no desaparezca. El reclutamiento puede entenderse como un proceso de retroalimentación positiva, ya que amplifica la señal inicial (feromona) y favorece que más individuos utilicen la misma ruta. Una vez establecido el camino de feromonas, puede producirse el abandono de la tarea. El abandono puede deberse a que la concentración de feromonas sature la sensibilidad de las hormigas o a un congestionamiento en las fuentes de alimento. En consecuencia, el abandono actúa como un mecanismo de retroalimentación negativa que contribuye a regular la actividad colectiva. La evidencia experimental sugiere que estas tres características —exploración, reclutamiento y abandono—

constituyen elementos fundamentales para comprender la organización de la búsqueda de alimento. Desde el punto de vista biológico, las hormigas toman decisiones a partir de distintos tipos de información. Algunas señales provienen del entorno o de otras compañeras (información social), mientras que otras dependen de la experiencia individual (información privada). La forma en que ambas fuentes se combinan influye directamente en la eficiencia de la respuesta colectiva de la colonia.

El forrajeo de las hormigas en el contexto de los sistemas complejos

Los sistemas complejos se consideran un conjunto de múltiples elementos que interactúan entre sí generando comportamientos colectivos, no predecibles a partir de sus partes individuales, que son muy sensibles a las condiciones iniciales. Son sistemas dinámicos y adaptativos, caracterizados por interacciones no lineales, es decir, por situaciones en las que pequeñas acciones individuales pueden producir efectos colectivos de gran magnitud. El forrajeo de las hormigas constituye un ejemplo clásico de este tipo de sistemas. La aparición espontánea de caminos organizados, la coordinación de numerosas forrajeras y la capacidad de ajustar colectivamente la explotación de recursos son comportamientos emergentes que surgen de múltiples interacciones locales entre los individuos. Ninguna hormiga conoce el "plan completo", pero mediante interacciones simples la colonia resuelve problemas complejos como: seleccionar la mejor fuente, reorganizar rutas o

adaptarse a cambios en el ambiente. Estos fenómenos constituyen la emergencia, una propiedad clave de los sistemas complejos. Estudiar la toma de decisiones durante el forrajeo colectivo permite entender cómo los individuos siguiendo reglas locales, y utilizando información limitada, generan patrones organizados a nivel de colonia. La capacidad de las hormigas para generar respuestas colectivas a partir de interacciones simples ha motivado el desarrollo de sistemas bioinspirados con aplicaciones en logística, optimización de rutas e inteligencia artificial. En este contexto, resulta interesante explorar distintas estrategias de forrajeo y la diversidad de interacciones locales que emplean algunas especies para organizarse y tomar decisiones colectivas.

Cuando el desorden se convierte en organización: la hormiga del faraón

La hormiga del faraón, *Monomorium pharaonis*, es una especie pequeña (1.5 a 2.5 mm) y altamente adaptable que habita en numerosas regiones del mundo. Sus colonias son numerosas y pueden albergar múltiples reinas. En esta especie, el comportamiento de búsqueda de alimento difiere según el tamaño de la colonia. Mientras que las colonias pequeñas exploran el entorno de manera relativamente desorganizada, las colonias grandes se organizan y forman veredas de feromonas que permiten coordinar el desplazamiento de numerosas forrajeras. La evidencia experimental sugiere que las colonias con menos de 600 individuos tienen

dificultades para establecer estas rutas químicas, mientras que las más grandes sí logran utilizarlas de manera eficiente.

Uno de los aspectos más interesantes es que el comportamiento colectivo puede transitar desde un estado desordenado, dominado por la exploración individual (sin vereda), hacia otro más organizado caracterizado por la formación espontánea de caminos de feromonas (con vereda) (Beekman *et al.*, 2001). Este estudio reportó por primera vez una transición de fase observada experimentalmente en un colectivo biológico, de manera análoga a los cambios de estado de la materia, como la transición del agua de estado líquido a vapor. En estas transiciones de fase, pequeñas variaciones en el sistema pueden producir cambios aleatorios abruptos de gran amplitud en el comportamiento colectivo.

La organización de la colonia también puede observarse cuando las hormigas deben elegir entre varias fuentes de alimento. Los estudios muestran que el número de forrajeras de *M. pharaonis* no aumenta al presentar una o dos fuentes de alimento, e incluso la asignación inicial de individuos es similar independientemente de la calidad de los recursos. Sin embargo, cuando las hormigas deben elegir entre dos fuentes de distinta calidad (1.0 M frente a 0.1 M de jarabe de azúcar), tienden a concentrar su actividad en la fuente más rica. En contraste, cuando ambas fuentes poseen la misma calidad, pequeñas diferencias iniciales en el número de exploradoras pueden determinar qué recurso se explotará preferentemente (Sumpter y Beekman, 2003). Esto sugiere que decisiones colectivas aparentemente complejas pueden originarse a partir de fluctuaciones

simples, amplificadas mediante el reclutamiento, y que estas decisiones emergen sin planificación centralizada. La selección de una fuente de alimento también implica un equilibrio entre costos y beneficios: reclutar demasiadas hormigas puede generar congestión o un gasto energético innecesario, mientras que movilizar pocas puede disminuir la eficiencia de la colonia. En resumen, en este caso el forrajeo puede entenderse como un equilibrio dinámico entre los mecanismos de reclutamiento y de abandono de la vereda de seguimiento, cuyas interacciones permiten a la colonia organizarse y adaptarse continuamente a las condiciones cambiantes del entorno.

El entorno también influye en las decisiones colectivas: la hormiga roja europea

La hormiga roja europea, *Myrmica rubra* (4-6 mm), es una especie común en ambientes húmedos y templados. Su búsqueda de alimento es principalmente individual y exploratoria: las obreras recorren los alrededores del nido en solitario, aunque pueden usar señales químicas para marcar rutas si encuentran una fuente abundante. Además de las características del alimento, la estructura física del nido también puede influir en las decisiones colectivas. Experimentos con dos fuentes de distinta calidad (1.0 M frente a 0.1 M) muestran que la movilización de forrajeras se duplicó en nidos con dos entradas en comparación con los de una entrada. Además, la selección colectiva de la mejor fuente fue menos marcada en nidos con dos

accesos, ya que las forrajeras tendieron a distribuirse de manera más uniforme entre ambas opciones. En conjunto, estos resultados sugieren que los nidos con múltiples entradas reducen la eficiencia en la explotación del recurso más favorable (Lehue y Detrain, 2020).

La importancia de las entradas del nido radica en que sirven como zonas de intercambio de información entre las hormigas que permanecen dentro del nido y las que regresan del exterior. En esta frontera se producen numerosas interacciones que influyen en la probabilidad de que nuevas obreras abandonen el nido en busca de alimento. Por ello, modificaciones aparentemente irrelevantes en la estructura del nido pueden alterar el flujo de información dentro de la colonia y, en consecuencia, la organización de las actividades de búsqueda de alimento. Así, las decisiones colectivas dependen no solo de las características del alimento o de las señales químicas entre individuos, sino también de factores físicos del entorno, como la estructura del nido. En otras palabras, este ejemplo muestra que pequeños cambios espaciales pueden modificar significativamente el comportamiento colectivo de toda la colonia, lo que resalta la estrecha relación entre la organización colectiva y la estructura del ambiente en la toma de decisiones de la colonia.

Experiencia y estado fisiológico: la hormiga de la roca

La hormiga *Temnothorax albipennis* (2–3 mm) vive en colonias pequeñas que suelen establecerse en huecos de rocas, madera o corteza de árboles. Se alimenta

principalmente de insectos pequeños y residuos vegetales. Su forrajeo es muy eficiente y organizado, usando un comportamiento llamado "carrera en tándem", donde una obrera experta guía a otra obrera inexperta hacia la fuente de recursos como alimento o un nuevo nido (Figura 1).

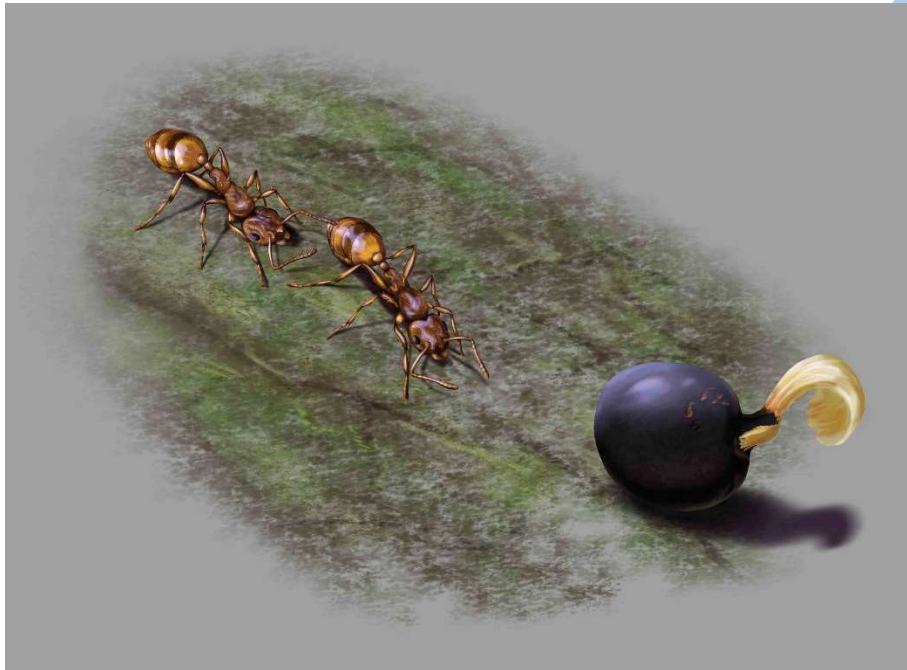


Figura 1. Reclutamiento en tándem en la hormiga *Temnothorax albipennis*. Ilustración de Evaristo Hernández Fernández.

La salida del nido representa una decisión importante para las forrajeras, ya que las expone a depredadores, a condiciones ambientales adversas y a otros riesgos asociados a la exploración del entorno. Por ello, no todas las obreras tienen la misma probabilidad de participar en la búsqueda de alimento. En este sentido, las diferentes técnicas de reclutamiento sugieren que esta decisión depende tanto de factores inmediatos como de las características fisiológicas de cada individuo.

Algunos experimentos realizados con *T. albipennis* muestran que las hormigas basan su participación en la búsqueda de alimento en dos aspectos: su propia experiencia (éxito al encontrar alimento, factor a corto plazo) y su corpulencia (factor a largo plazo). Las hormigas que recientemente hayan tenido éxito tendrán mayor probabilidad de salir a forrajear que las que hayan fracasado en sus búsquedas. Sin embargo, las que fracasaron saldrán en mayor proporción si su corpulencia es menor (Robinson *et al.*, 2012). Estos resultados sugieren que las decisiones individuales integran información de corto plazo, como el éxito reciente, y de largo plazo, como el estado fisiológico del individuo. En otras palabras, el comportamiento colectivo emerge cuando la interacción de numerosas obreras, con distintas probabilidades de participar en la búsqueda de alimento, le permiten a colonia ajustar su esfuerzo dinámicamente ante condiciones cambiantes internas y externas al nido.

Memoria contra feromonas: la hormiga negra de jardín

La hormiga *Lasius niger*, conocida como hormiga negra común (5–10 mm), forma colonias numerosas y es ampliamente conocida por su asociación con los áfidos, insectos de los que obtiene sustancias azucaradas a cambio de protección (Figura 2). Su técnica de búsqueda consiste en que las forrajeras exploran en busca de alimento y, al encontrar una fuente, dejan un rastro de feromonas que guía a otras hormigas. A medida que más obreras se suman, el rastro se intensifica y refuerza

el recorrido. Sin embargo, los estudios muestran que las feromonas no siempre constituyen la principal fuente de información. En esta especie, la memoria individual también desempeña un papel importante.



Figura 2. Comportamiento de forrajeo en la hormiga *Lasius niger*. Ilustración de Evaristo Hernández Fernández

La feromona constituye una forma de información social, mientras que la memoria representa información privada adquirida mediante la experiencia. Cuando ambos tipos de información entran en conflicto, las forrajeras experimentadas suelen confiar en los recursos que ya conocen. Experimentos realizados en laberintos con forma de T, con fuentes de alimento en cada extremo, muestran que las forrajeras aprenden rápidamente a usar la rama que conduce al alimento. Las

veredas de feromonas tienen un efecto débil en hormigas novatas: solo el 62 % y 70 % eligen ramas marcadas por una o veinte forrajeras, respectivamente. La mayoría (82-100 %) elige la rama que lleva a la fuente que ya visitaron, haciendo poco uso de la feromona incluso si está bien reforzada. Así, en *L. niger*, la información privada domina sobre la información social (Grüter *et al.*, 2011). La memoria podría estar relacionada de manera importante con el tipo de recursos que esta especie explota. Las colonias de áfidos constituyen fuentes de alimento relativamente estables, por lo que recordar su ubicación puede resultar más eficiente que depender exclusivamente de señales químicas temporales. En este sentido, el comportamiento de *L. niger* muestra que la organización colectiva no depende únicamente de las interacciones entre individuos. La experiencia acumulada por ciertas forrajeras también forma parte del sistema de toma de decisiones de la colonia. Así, la búsqueda de alimento puede apoyarse tanto en la exploración y en las veredas de feromonas como en la memoria individual, cuya importancia varía según las condiciones del entorno y el tipo de recursos disponibles.

La importancia de las interacciones locales: la hormiga argentina

La hormiga argentina, *Linepithema humile* (2–3 mm), es una especie invasora reconocida por su capacidad para formar supercolonias, su gran competitividad la lleva a desplazar a otras especies. Su forrajeo, que es altamente eficiente y

cooperativo, depende de una intensa comunicación social y del uso de feromonas para atraer a otras obreras hacia fuentes favorables. En esta especie, la decisión de abandonar el nido y participar en la búsqueda de alimento está fuertemente influida por las interacciones entre las obreras. Los estudios de la hormiga *L. humile* muestran que el tiempo que las recolectoras pasan en el nido depende principalmente de las interacciones trofalácticas, es decir, del intercambio boca a boca de líquidos nutritivos y sustancias químicas, especialmente con hormigas hambrientas (Figura 3). En contraste, otros tipos de contacto social o la información adquirida individualmente tienen un efecto mucho menor en esta decisión de salir del nido a forrajear. Asimismo, el hambre general de la colonia no parece alterar directamente el comportamiento de las forrajeras (Miller y Pinter-Wollman, 2023). Estos resultados sugieren que la participación en la búsqueda de alimento no depende únicamente de la disponibilidad de recursos, sino que en este caso también depende fuertemente de la información transmitida durante las interacciones entre individuos. El número y el tipo de contactos sociales pueden superar un umbral que incrementa la probabilidad de que una obrera abandone el nido y se incorpore a la tarea de forrajeo. Así, señales aparentemente simples, como el intercambio de alimento, pueden desencadenar respuestas colectivas a nivel de colonia. Este ejemplo muestra cómo la toma de decisiones colectiva puede emerger de múltiples tipos de interacciones locales entre los individuos. Más que responder a una señal centralizada, las hormigas ajustan continuamente su comportamiento a partir de la información que reciben de sus compañeras, lo que permite que la

colonia coordine de manera eficiente sus actividades ante condiciones cambiantes. Sin embargo, hemos visto que existe una gran variedad de tipos de información compartida individualmente entre las hormigas que las impulsa a salir del nido en busca de recursos.



Figura 3. Interacciones trofalácticas en la especie *Linepithema humile*. Ilustración de Evaristo Hernández Fernández

Como conclusión, el éxito de las colonias en el forrajeo radica en su capacidad de coordinación colectiva y en la sofisticación de sus sistemas sensoriales para interactuar con el entorno. Mediante mecanismos sensoriales altamente especializados, las hormigas detectan, interpretan y transmiten señales, logrando una toma de decisiones eficiente a nivel individual y colectivo. Sin embargo, los estudios revisados muestran que estas decisiones no dependen únicamente de señales químicas. La memoria, la experiencia previa, la estructura del nido, el estado fisiológico y las interacciones sociales influyen constantemente

en las elecciones individuales y colectivas, dando lugar a respuestas adaptativas que varían entre especies y condiciones ambientales.

En este punto queda claro que las colonias funcionan como sistemas dinámicos capaces de ajustar su comportamiento ante condiciones cambiantes sin necesidad de un control centralizado, dando lugar a propiedades emergentes que no pueden explicarse únicamente a partir de los comportamientos individuales. Esta capacidad de generar soluciones colectivas, a partir de múltiples interacciones locales, ha inspirado el desarrollo de modelos de sistemas dinámicos no lineales y de algoritmos de inteligencia artificial colectiva. Por ejemplo, los algoritmos de optimización de colonias de hormigas sintéticas (*Ant Colony Optimization*, ACO), son utilizados para resolver problemas relacionados con rutas de transporte, logística y redes de comunicación. Comprender estas dinámicas no solo enriquece nuestro conocimiento sobre la ecología y biología de estos insectos, sino que también proporciona herramientas conceptuales para el diseño de sistemas bioinspirados con aplicaciones en áreas tan diversas como el manejo de plagas, la optimización de procesos y la inteligencia artificial.

Referencias

Beekman M, Sumpter DJ and Ratnieks FL (2001). Phase transition between disordered and ordered foraging in Pharaoh's ants. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98(17):9703-9706.

Grüter C, Czaczkes TJ and Ratnieks FL (2011). Decision making in ant foragers (*Lasius niger*) facing conflicting private and social information. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 65:141-148.

Lehue M and Detrain C (2020). Foraging through multiple nest holes: An impediment to collective decision-making in ants. *PLoS ONE* 15(7):e0234526.

Miller JS and Pinter-Wollman N (2023). Social interactions differ in their impact on foraging decisions. *Animal Behaviour* 203:183-192.

Robinson EJ, Feinerman O and Franks NR (2012). Experience, corpulence and decision making in ant foraging. *Journal of Experimental Biology* 215(15):2653-2659.

Sumpter DJ and Beekman M (2003). From nonlinearity to optimality: pheromone trail foraging by ants. *Animal Behaviour* 66(2):273-280.

Manuscrito aceptado