



Ecología del Movimiento: del análisis individual a la provisión de servicios ecosistémicos

Zaida Ortega^{1,*} , Eneko Arrondo¹ , Juan Manuel Pérez-García²

(1) Departamento de Zoología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Avenida de Fuente Nueva, s/n, 18071 Granada, España.

(2) Área de Ecología, Departamento de Biología Aplicada. Universidad Miguel Hernández, Avda Universidad sn, 03202 Elche, España.

* Autor de correspondencia: Zaida Ortega [zaidaortega@usal.es; zaidaortega@ugr.es]

> Recibido el 17 de julio de 2023 - Aceptado el 17 de julio de 2023

Como citar: Ortega, Z., Arrondo, E., Pérez-García, J.M. 2023. Ecología del Movimiento: del análisis individual a la provisión de servicios ecosistémicos *Ecosistemas* 32(2): 2608. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2608>

El movimiento —es decir, el cambio de localización espacial— es una de las principales características de la vida, cuyas consecuencias marcan el destino de los individuos, poblaciones, comunidades y ecosistemas (Turchin 1998; Hooten et al. 2017). La ecología del movimiento se ocupa de comprender los factores, mecanismos y procesos que condicionan este fenómeno a diferentes escalas espaciales, temporales y ecológicas, así como de aplicar esta comprensión para resolver problemas (p.ej., Nathan et al. 2008).

El marco teórico de la ecología del movimiento considera que la trayectoria o camino realizado por un organismo es el resultado de la interacción entre factores externos (p. ej., factores climáticos o paisajísticos) y factores relacionados con el propio individuo. Entre estos últimos, diferenciamos las variables que definen el estado interno del organismo (p.ej., hambre, frío) y que determinarían por qué moverse; la capacidad de navegación (p.ej., capacidad sensorial, cognición), que afectaría a dónde moverse; y la capacidad motriz (p.ej., medio de desplazamiento, tamaño), que condicionaría cómo moverse (Nathan et al. 2008; Fig.1). Habitualmente, partimos de localizaciones geográficas del organismo a lo largo del tiempo y de la cuantificación de covariables externas e internas para —mediante las cada vez más sofisticadas herramientas de análisis— responder a un sin número de cuestiones sobre ecología y comportamiento. Por ejemplo, podemos extender el marco teórico desde el nivel individual para considerar las interacciones entre el movimiento de los diferentes organismos que forman una población, comunidad o ecosistema, e incluso considerar el movimiento de los seres humanos o nuestros medios de transporte en la ecuación (Miller et al. 2019). De esta forma podemos responder a preguntas básicas —relacionadas con las causas próximas del comportamiento animal— pero también abordar interacciones entre especies como los patrones de dispersión de semillas, e incluso comprender y predecir la provisión de servicios ecosistémicos en diferentes escenarios actuales y futuros. Las aplicaciones de este conocimiento son múltiples, desde conocer y mitigar los impactos del cambio climático, hasta gestionar la transición a las energías renovables o controlar la transmisión de enfermedades. No obstante, a medida que escalamos de nivel ecológico, la complejidad (de obtener los datos, analizarlos e interpretarlos) aumenta, siendo este uno de los aspectos a mejorar en el futuro próximo.

¿Dónde nos encontramos?

La ecología del movimiento ha crecido de la mano de los desarrollos tecnológicos que permiten obtener la localización de los organismos —desde la comunicación por sistemas de radio VHF hasta los dispositivos satelitales ARGOS y GPS, pasando por sensores acústicos o cámaras trampa— y los aparatos que registran otras variables de interés, conocidos generalmente como *biologgers*, como acelerómetros, sensores térmicos o registradores de variables fisiológicas (Williams et al. 2020). Estas nuevas mejoras técnicas nos han llevado de trabajar con unos pocos datos al mes a tener casi millones de datos al día, lo que implica un cambio de paradigma en el estudio y en la metodología utilizada para responder a las diferentes cuestiones (López-López 2018).

Los temas de estudio pueden clasificarse según la escala spatiotemporal. La escala más amplia incluye estudios sobre distribución de especies y patrones de movimiento amplios (migraciones, dispersión, nomadismo, especies sedentarias). A una escala más detallada, se incluyen los patrones de movimiento dentro del área de campeo y, normalmente a mayor detalle, los análisis de trayectorias, incluyendo la clasificación de comportamiento. También aquí se incluye una cuestión importante en los estudios de ecología como es la selección de recursos —es decir, el uso desproporcionado de los diferentes recursos en comparación con su disponibilidad en el ambiente— que puede estudiarse a diferentes escalas, desde el área de distribución de una población o especie, a la selección de microhábitat (Mayor et al. 2009; Hooten et al. 2017). Otra forma de clasificar/estudiar el movimiento es el nivel de organización, desde el individuo a población, comunidad y ecosistema. En este sentido, aumentar de escala depende de nuestra capacidad de elaborar herramientas matemáticas que permitan estudiar los patrones de movimiento de diferentes organismos de forma conjunta, así como extraer las propiedades que emergen de los mismos.

En este monográfico hemos intentado aportar una perspectiva diversa del estado actual de la ecología del movimiento en el ámbito geográfico iberoamericano. Como resultado, presentamos tres trabajos de revisión y siete de investigación que abordan desde los métodos clásicos más utilizados en el estudio de los patrones

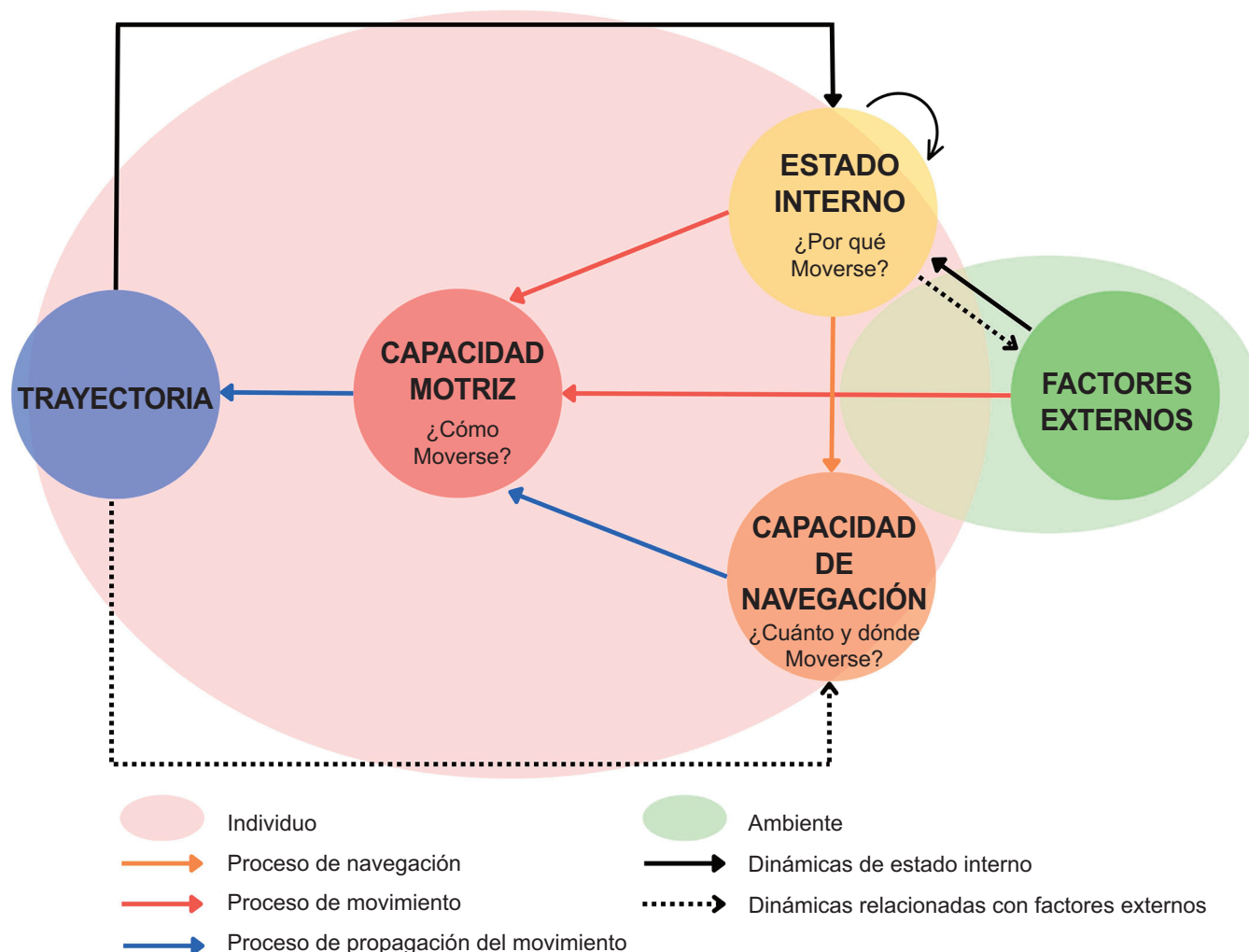


Figura 1. Adaptación del marco conceptual de la ecología del movimiento propuesto por Nathan et al. (2008).

Figure 1. Adaptation of the conceptual framework of the movement ecology proposed by Nathan et al. (2008).

de movimiento a escala individual de especies poco estudiadas, hasta modelos de simulaciones teóricas que escalan los patrones de movimiento del individuo a la población. Para este número hemos intentado incluir estudios de diferentes taxones, desde aquellos menos estudiados como los artrópodos hasta grandes vertebrados. Así mismo hemos tratado no sólo de incluir trabajos teóricos, metodológicos, o de ecología básica, sino también estudios aplicados que muestren la potencialidad de la aplicación de esta disciplina en la gestión o resolución de algunos grandes retos de coexistencia entre humanos y animales, como la ganadería sostenible o el control de plagas.

Revisando nuestro conocimiento actual

Este monográfico comienza con tres revisiones que aportan perspectivas muy diferentes. La primera (Alves-Eigenheer et al. 2023) pone el foco en Brasil, el país que alberga más biodiversidad y cuyo desarrollo científico –al igual que ocurre con la propia área de ecología del movimiento– ha experimentado un rápido crecimiento en las últimas décadas. El trabajo analiza la literatura científica publicada sobre ecología del movimiento en Brasil y una encuesta a expertos en el área. Integrando los resultados de ambas partes se logra retratar el estado de esta disciplina, identificando fortalezas y desafíos, y proponiendo acciones futuras para impulsar el área de estudio y sus aplicaciones en materia de conservación. Uno de los sesgos taxonómicos generales en la ecología del movimiento –que también revela la investigación brasileña (Alves-Eigenheer et al. 2023)– es la escasa atención que se ha dado a los

animales invertebrados (Nathan et al. 2022). Siguiendo esta línea, Álvarez y Clemente-Orta (2023) presentan una revisión del estado de conocimiento sobre movimiento en artrópodos terrestres, y más en concreto, de su aplicación para el control biológico de plagas, enfatizando la importancia de estudiar el movimiento de artrópodos que consuman o parasiten a otros artrópodos. Al mismo tiempo, señalan la falta de estudios a escala de paisaje y recomiendan que los futuros estudios integren diferentes escalas espaciotemporales. Los avances que proponen para futuros estudios, eminentemente prácticos, podrían mejorar sustancialmente la producción responsable de alimentos recogida en el ODS12 (Álvarez y Clemente-Orta 2023).

Uno de los grandes retos de la ecología del movimiento es el de escalar de nivel organizativo. En la última revisión presentada en esta monográfico, Graciá y colaboradores (2023) muestran la importancia de integrar los modelos de movimiento individual para evaluar a escala poblacional diferentes cuestiones, como los efectos de la pérdida y la fragmentación del hábitat o los patrones genéticos resultantes de los cambios de distribución. Para ello utilizan métricas de ecología del movimiento –área de campeo, parámetros dispersivos y selección de hábitat– de individuos de tortuga mora (*Testudo graeca*) del sudeste de España para obtener, mediante simulación, parámetros poblacionales que permitan proyectar la distribución futura de las poblaciones en diferentes escenarios. Concluyen que seguir progresando en estudios que tengan esta línea de trabajo es imprescindible para poder aplicar la ecología del movimiento a la comprensión de poblaciones, comunidades y ecosistemas, así como mejorar su gestión y conservación.

De áreas de campeo a estudios de mortalidad

Aunque los trabajos de ecología espacial básica, tales como áreas vitales y de campeo, movimientos migratorios y dispersivos, etc., han supuesto la base de conocimiento de esta disciplina durante las últimas décadas, su progresión tanto entre taxones como geográficamente no ha sido equilibrada. Los datos muestran que grupos como las aves o los mamíferos en el hemisferio norte han concentrado los trabajos de investigación (Holoak et al. 2008), mientras que grandes áreas como Latinoamérica han recibido una escasa atención. Dentro de nuestras posibilidades, en este monográfico hemos incluido tres estudios que analizan el área de campeo o el uso del espacio de tres especies muy diferentes, un anfibio, un mamífero y una rapaz. En el primer trabajo Wachlevski y colaboradores (2023) analizan el uso del espacio de una especie de ranita, denominada *Crossodactylus trachystomus*, endémica de las selvas montañas de Minas Gerais, en Brasil. Sus resultados mostraron que esta especie –que habita en arroyos– tiene una de las áreas de campeo más pequeñas jamás registradas en anuros, y además con un tamaño muy consistente (ni el sexo ni el tamaño corporal le afectaron) y una gran superposición entre conoespecíficos (Wachlevski et al. 2023). Además de la importancia para el conocimiento y conservación de esta rana endémica, hay que resaltar que los anfibios son uno de los taxones menos estudiados desde la perspectiva del movimiento (Holoak et al. 2008) por lo que trabajos como estos son particularmente necesarios. En esta misma línea de aumentar el conocimiento de las especies más rara, esquivas o amenazadas en Latinoamérica, Aguiar-Silva y colaboradores (2023) presentan un estudio sobre selección de hábitat de la esquivia y amenazada águila arpía mayor (*Harpia harpyja*). Sus resultados resaltan la importancia de favorecer la conectividad de los fragmentos de bosque para conservar el águila de mayor tamaño que habita en centro y sur América.

La aplicación de nuevos avances tecnológicos está abriendo nuevos horizontes de conocimiento sobre el comportamiento animal, de inestimable valor para el estudio y manejo de especies amenazadas o cuyo seguimiento detallado en campo es muy complicado (Brown et al. 2013; Nathan et al. 2022). En concreto hablamos de sistemas como los acelerómetros, que permiten registrar el comportamiento en periodos determinados. En este monográfico contamos con dos trabajos que utilizan acelerómetros para estudiar cuestiones muy útiles para la conservación de especies amenazadas o con posibilidades de observación directa limitadas. En el primer estudio, Abril-Colón y colaboradores (2023) integrando el uso de acelerómetros y localizaciones GPS, fueron capaces de identificar con gran precisión cuándo y dónde las avutardas hubaras (*Chlamydotis undulata*) de las Islas Canarias realizaban diferentes comportamientos, como carreras de exhibición, vocalizaciones, vuelo, alimentación o descanso (Abril-Colón et al. 2023). En el segundo trabajo, Iglesias-Lebrija et al. (2023), estudian los patrones gráficos de los acelerómetros para identificar los comportamientos de águilas de Bonelli (*Aquila fasciata*) en la península ibérica. Estos investigadores relacionaron los patrones específicos de las gráficas de acelerometría con determinados comportamientos característicos de esta rapaz, pudiendo determinar en qué momentos y lugares vuelan, se alimentan, pelean, descansan, incuban, ceban a sus polluelos o incluso poder determinar la causa de mortalidad (Iglesias-Lebrija et al. 2023). Obviamente, esta información –además de permitirnos conocer mucho mejor el comportamiento de animales tan fascinantes– va a permitir mejorar los programas de gestión y conservación de ambas especies, por ejemplo, con una aplicación directa a la planificación territorial o persecución de las causas de mortalidad no natural.

Escalando patrones de individuo a población

Como ya hemos comentado, sin duda uno de los retos más importantes a los que se enfrenta la ecología del movimiento es el de escalar de nivel organizativo. Poder trasladar el conocimiento de los patrones de movimiento individual a escalas superiores como

población o comunidad. En esta línea, Saraiva de Menezes (2023) investiga si es posible obtener modelos de selección de hábitat similares comparando dos metodologías diferentes, una basada en modelos de datos de movimiento *Step Selection Function* (Fortin et al. 2005) y otra basada en modelos de distribución de especies MaxEnt (Elith et al. 2011). Los *Step Selection Function* son modelos muy potentes que calculan los puntos de disponibilidad para cada paso de una trayectoria, pero su análisis es complejo, mientras que los modelos MaxEnt son más sencillos y flexibles. Para ello, analiza una base de datos de movimiento de jaguares (*Panthera onca*) en cinco países de América Latina (Morato et al. 2018), comparando el rendimiento de ambos métodos, lo que le lleva a concluir que los modelos MaxEnt podrían ser más útiles en estudios de selección de hábitat con objetivos predictivos (Saraiva de Menezes 2023). Este estudio resulta interesante por servir de punto de encuentro, ya que en ecología del movimiento se suelen utilizar las funciones de selección de recursos y en macroecología el modelado de distribución de especies, y lo cierto es que son dos herramientas con bastantes semejanzas, cuya comparativa y puesta en común podría fomentar el avance de estas dos áreas de la ecología y sus aplicaciones prácticas.

Gestión y manejo de ecosistemas

La integración de la ecología del movimiento en la gestión de fauna es una línea que genera mucho interés por su potencial aplicación en conflictos humano – vida silvestre. Así lo muestra otro de los estudios incluidos en este monográfico, que también aborda el control biológico, pero en este caso desde la perspectiva de los vertebrados. Pascual-Rico y colaboradores (2023) analizan el proyecto experimental de translocación de zorros rojos (*Vulpes vulpes*) destinado a reducir la población de conejos de monte en áreas agrícolas del Sureste Ibérico. Para ello analizaron la actividad, el área de campeo y uso del hábitat de los zorros translocados y concluyeron que, aunque la medida no funcionó asentando los ejemplares en el lugar de liberación y por lo tanto no cumplió con el objetivo del experimento, sí proporcionó información novedosa sobre el comportamiento de zorros en zonas altamente modificadas por la acción humana. Pero las aplicaciones de esta disciplina no sólo abarcan problemas de gestión de fauna silvestre, sino que también se pueden aplicar a otros manejos como, por ejemplo, muestra Urkijo y colaboradoras (2023). En este trabajo se muestra cómo el uso de los dispositivos de GPS en diferentes tipos de ganado permite estudiar la selección de hábitat de alimentación y descanso en un parque natural del País Vasco. Sus resultados muestran que conocer los movimientos diarios del ganado y las zonas que selecciona permitiría establecer mejores medidas de gestión de los usos ganaderos en zonas forestales y agrícolas.

El futuro de la ecología del movimiento

Aunque en este monográfico se ha logrado incluir una representación variada de diferentes taxones y temas de investigación incluidos en la ecología del movimiento, el trabajo que queda por hacer en las próximas décadas es inmenso. Entre los principales huecos de conocimiento queremos destacar particularmente la ausencia de estudios a nivel de ecosistema, en que se combinen diferentes taxones y áreas geográficas o incluso periodos de tiempo diferentes. Estos trabajos permitirían entender de una forma más profunda los procesos que sostienen los ecosistemas, como por ejemplo las redes de interacciones entre especies, permitiendo comprender mejor su dinámica espaciotemporal. Así mismo, entender los cambios espaciotemporales en las especies de los ecosistemas nos permitirá determinar cómo varía la provisión de los servicios ecosistémicos de los mismos. Pero acometer estos trabajos de investigación va a necesitar del esfuerzo y la colaboración de muchos investigadores e investigadoras que permitan cerrar el puzle de las diferentes piezas que conforman el ecosistema. Sin el estudio detallado de cada una de las piezas será muy complicado entender el funcionamiento de los procesos más complejos.

Animados por este reto, los editores de este monográfico, junto a otros colegas que investigan en este ámbito, hemos creado un grupo de trabajo específico dentro de la AEET (<https://www.aeet.org/es/gruposdetrabajo/eco-mov.html>) para seguir avanzando de forma conjunta en este ámbito de estudio. El objetivo de este grupo es fomentar la colaboración científica, la formación y la transferencia del conocimiento en el ámbito de la ecología del movimiento, así como su aplicación a resolver cuestiones prácticas sobre gestión y conservación de la biodiversidad. Y, por último, esperamos que este número especial motive a colegas con interés en este campo a seguir profundizando en diferentes líneas de trabajo o despierte la curiosidad por investigar nuevas cuestiones.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos la invitación del equipo editorial de *Ecosistemas* y su constante asistencia durante la edición de este monográfico. Además, agradecemos la inestimable contribución de todos los autores y autoras, así como de quienes han revisado sus manuscritos: muchas gracias. Este monográfico ha recibido financiación de la Junta de Andalucía y el Fondo Social Europeo (contrato postdoctoral de Zaida Ortega), y del Ministerio de Ciencia e innovación (contrato postdoctoral de J.M. Pérez-García y de E. Arrondo).

Contribución de autores

Zaida Ortega: conceptualización, redacción borrador inicial, edición; Eneko Arrondo: conceptualización, edición; Juan Manuel Pérez-García: conceptualización, edición.

Referencias

- Abril-Colón, I., Alonso, J.C., Uceró, A., Palacín, C. 2023. Aplicación de tecnologías GSM/GPRS y acelerometría a la ecología espacial de la avutarda hubara. *Ecosistemas* 32(2): 2420. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2420>
- Aguiar-Silva, F.H., Sanaïotti, T.M., Martins Sanches, R., Bicudo, T., Tuyama, C.A., Junqueira, T.G., Albernaz, A.L.K.M. 2023. Flying through the forest canopy: Movement patterns and habitat selection of rescued and wild Harpy Eagles in the Brazilian Amazon. *Ecosistemas* 32(2): 2505. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2505>
- Álvarez, H.A., Clemente-Orta, G. 2023. Ecología del movimiento de artrópodos y el control biológico: desde el laboratorio hasta el paisaje. *Ecosistemas* 32(2): 2500. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2500>
- Alves-Eigenheer, M., Brandão S. Niebuhr, B., Emi de Faria Oshima, J., Zakeran Kanda, C., Christine Tenório Leal Ramos, D., Stefanini Da Silveira, N., Kyoko Honda, L., Kerches-Rogeri, P., Pereira de Souza Salzano, L., Bitencourt Moraes, A. L., Stephan Mokross, K., Ribeiro, M.C. 2023. Challenges and perspectives of movement ecology research in Brazil. *Ecosistemas* 32(2): 2427. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2427>
- Brown, D.D., Kays, R., Wikelski, M., Wilson, R., Klimley, A.P. 2013. Observing the unwatchable through acceleration logging of animal behavior. *Animal Biotelemetry* 1:1-16.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C.J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17(1):43-57.
- Fortin, D., Beyer, H.L., Boyce, M.S., Smith, D.W., Duchesne, T., Mao, J.S. 2005. Wolves influence elk movements: behavior shapes a trophic cascade in Yellowstone National Park. *Ecology* 86(5):1320-1330.
- Graciá, E., Rodríguez-Caro, R.C., Jiménez-Franco, M.V., Sanz-Aguilar, A., Botella, F., Anadón, J.D., García-García, Á.L., Wiegand, T., Giménez, A. 2023. Del movimiento individual a los cambios de distribución: Integración de datos de movimiento en modelos basados en el individuo para evaluar los efectos poblacionales del cambio global. *Ecosistemas* 32(2): 2454. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2454>
- Holyoak, M., Casagrandi, R., Nathan, R., Revilla, E., Spiegel, O. 2008. Trends and missing parts in the study of movement ecology. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(49), 19060-19065.
- Hooten, M.B., Johnson, D.S., McClintock, B.T., Morales, J.M. 2017. *Animal movement: statistical models for telemetry data*. CRC press.
- Iglesias-Lebrija, J.J., García, M., Serrano, J.M., Álvarez, E., de la Fuente, S., Marco, M., Galán, M., Moraleda, V. 2023. Patrones comportamentales y detección de causas de mortalidad en águila perdicera (*Aquila fasciata*) a través del acelerómetro triaxial de emisores GPS-GSM. *Ecosistemas* 32(2): 2506. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2506>
- López-López, P. 2016. Sistemas de seguimiento individual en ornitología: bienvenidos a la era de los datos masivos. *Ardeola* 63(1), 103-136.
- Mayor, S.J., Schneider, D.C., Schaefer, J.A., Mahoney, S.P. 2009. Habitat selection at multiple scales. *Ecoscience* 16(2):238-247.
- Miller, H.J., Dodge, S., Miller, J., Bohrer, G. 2019. Towards an integrated science of movement: converging research on animal movement ecology and human mobility science. *International Journal of Geographical Information Science* 33(5):855-876.
- Morato, R.G., Thompson, J.J., Paviolo, A., de La Torre, J.A., Lima, F., McBride, R.T., et al. 2018. Jaguar movement database: a GPS-based movement dataset of an apex predator in the Neotropics. *Ecology* 99(7):1691.
- Nathan, R., Getz, W.M., Revilla, E., Holyoak, M., Kadmon, R., Saltz, D., Smouse, P.E. 2008. A movement ecology paradigm for unifying organismal movement research. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(49):19052-19059.
- Nathan, R., Monk, C.T., Arlinghaus, R., Adam, T., Alós, J., Assaf, M., et al. 2022. Big-data approaches lead to an increased understanding of the ecology of animal movement. *Science* 375(6582):eabg1780.
- Pascual-Rico, R., Palomar Rodríguez, R., Martínez García, J.A. 2023. Comportamiento espacial de depredadores translocados para control biológico: el caso del zorro rojo en el sureste ibérico. *Ecosistemas* 32(2): 2409. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2409>
- Saraiva de Menezes, J.F. 2023. Comparando las estimaciones de selección de hábitat mediante modelos de distribución de especies y step selection functions. *Ecosistemas* 32(2): 2455. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2455>
- Turchin, P. 1998. *Quantitative Analysis of Movement: Measuring and Modeling Population Redistribution in Animals and Plants*. Sinauer Associates, Sunderland, MA, Estados Unidos
- Urkijo, A., Ametzaga-Arregi, I., Albizu, I. 2023. Silvopastoralismo en la ZEC de Gorbéa (País Vasco): selección espacial y temporal de hábitats forestales. *Ecosistemas* 32(2): 2456. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2456>
- Wachlewski, M., Passos, D., Eterovick, P.C. 2023. Jumping between narrow banks: social spacing of the stream-dwelling montane frog, *Crossodactylus trachystomus* (Hylodidae). *Ecosistemas* 32(2): 2425. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2425>
- Williams, H.J., Taylor, L.A., Benhamou, S., Bijleveld, A.I., Clay, T.A., de Grisac, S., et al. 2020. Optimizing the use of biologgers for movement ecology research. *Journal of Animal Ecology* 89(1):186-206.