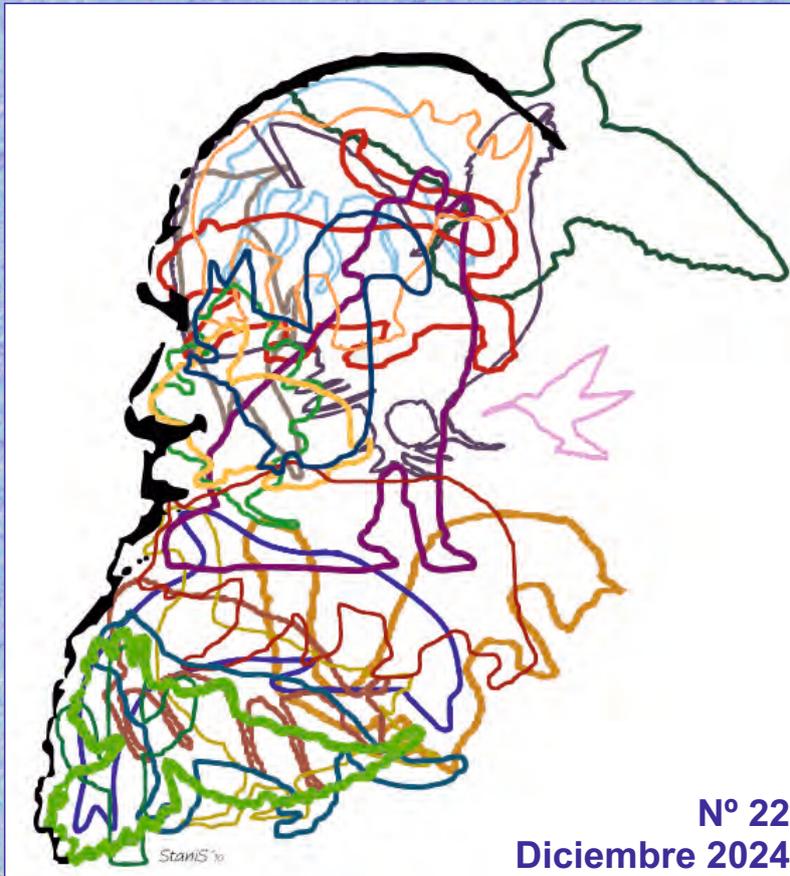


Ambio ciencias



REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA E INNOVACIÓN DOCENTE



Nº 22
Diciembre 2024

★ 1968 ★



★ 2024 ★

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES. UNIVERSIDAD DE LEÓN



Consejo de Redacción

Directora:

Sara del Río González

Catedrática de Universidad del Área de Botánica

Secretaria:

Ana Isabel González Cordero

Vice-Decana de la Facultad de CC. Biológicas y Ambientales

Miembros:

Estanislao de Luis Calabuig

Catedrático de Universidad del Área de Ecología

José Luis Acebes Arranz

Catedrático de Universidad del Área de Fisiología Vegetal

María Paz Herráez Ortega

Catedrática de Universidad del Área de Biología Celular

Luis Mariano Mateos Delgado

Catedrático de Universidad del Área de Microbiología

Luis E. Sáenz de Miera Carnicer

Catedrático de Universidad del Área de Genética

Daniela Canestrari

Profesora Titular de Universidad del Área de Zoología

Gracia Merino Pélaez

Profesora Titular de Universidad del Área de Fisiología

Laura Rodríguez García

Profesora Titular de Universidad del Área de Antropología Física

Andrés Merino Suances

Profesor Titular de Universidad de Área de Física Aplicada

Giovanni Breogán Ferreiro Lera

Alumno de Doctorado

Edita: Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales de la Universidad de León

Colabora: Servicio de Publicaciones de la Universidad de León.

Maquetación: David Aller Llamera

© **Universidad de León**

© **Los autores**

ISSN: 1988-3021 (edición digital)

Dep. Legal: LE-903-07



EN PORTADA:

Logotipo diseñado por el Dr. Estanislao de Luis Calabuig inspirado en la figura de Sir Charles Darwin.

ÍNDICE

EDITORIAL

Tenacidad o inspiración ¿qué importa más en la investigación científica?

José Luis Acebes Arranz.....

A FONDO

¿Es posible reparar el cerebro?

Isabel Fariñas

PONIENDO EN CLARO

La arena como recurso: aplicaciones en la industria de la construcción e impactos ambientales derivados

June Fernández de Monje, Elena Colmenero Hidalgo y Juncal Altagracia Cruz Martínez.....

Mecanismos moleculares del ejercicio físico en la enfermedad de Alzheimer: revisión sistemática

Marina Redondo Cadenas, M^a José Cuevas y Brisamar Estébanez.....

SIGUIENDO LA PISTA

Bioclimatología de la provincia de Cuenca y su relación con la vegetación potencial

Beatriz López Medina, Alejandro González-Pérez y Sara del Río González



Tras los rastros del lobo ibérico: dieta y marcaje territorial de la especie en León

María Mallo Robla.....

Estudio del mucílago de semillas mutantes para conocer el papel de la arabinosa en la pared celular

Paula Gómez de Agüero y Asier Largo-Gosens.....

BAÚL DE LA CIENCIA

Sistemas bioelectroquímicos. Electrificando microorganismos

Raúl Mateos González.....

Selección de hábitat: comprendiendo las causas del movimiento animal

Zaida Ortega.....

UNO DE LOS NUESTROS

Barbara McClintock

Luis E. Sáenz de Miera.....

AMBIÓLOGOS DE AQUÍ

Bióloga, empresaria, investigadora y panadera

María Franco.....

MI PROYECTO DE TESIS

Desentrañando el papel de p73 en la adhesión celular y sus implicaciones en contextos sanos y tumorales

Nicole Martínez-García.....

EDUCANDO EN LO NUESTRO

Biometac: proyectos para aprender y enseñar Biología fuera del aula

Esperanza Fernández Martínez, Margarita M. Marqués, Iván Prieto Aguilar y Rosa María Valencia Barrera.....

DE TODO UN POCO.....

EDITORIAL

Tenacidad o inspiración ¿qué importa más en la investigación científica?

¿Por qué las investigaciones de algunos científicos se difunden con gran rapidez y dejan una huella persistente, mientras que las de muchos otros pasan casi inadvertidas? ¿Qué es más importante en la investigación: el trabajo concienzudo o la inspiración? O, dicho de otro modo, ¿qué vale más en el desarrollo de la ciencia: la tenacidad, la paciencia y la persistencia, o el ingenio, la imaginación y la inventiva?

Según Thomas Alva Edison, el inventor de la bombilla incandescente de alta resistencia, el éxito de la investigación se cimienta en la tenacidad ante las dificultades y los fracasos. Aseguraba que el genio está hecho de un 1 % de inspiración y un 99 % de esfuerzo. Se cuenta que cuando Edison acumulaba ya más de 800 experiencias fracasadas en sus ensayos con filamentos de diferentes tipos, un colaborador le preguntó si no habría llegado ya el momento de renunciar. «Todo lo contrario –objetó Edison–, precisamente ahora es cuando poseo una información muy valiosa, pues ya conozco más de 800 materiales que no sirven para el objetivo». Cuando finalmente divulgó el proceso de investigación que había seguido concluyó: «No fueron mil intentos fallidos, fue un invento de mil pasos».

Por otro lado, el testimonio de muchos investigadores refleja que en sus descubrimientos han experimentado instantes de inspiración en los cuales todo encaja de repente. Son los denominados «momentos eureka»: un problema que se resistía y parecía incomprensible, se ilumina repentinamente, de forma sencilla, con el convencimiento de que la solución es correcta, y acompañado de una gran satisfacción (son las cuatro características del momento eureka, según Topolinski y Rebel, 2010). A menudo el hallazgo va acompañado de una exclamación del estilo: ¡eureka! o ¡ajá!, ¡por fin! –de ahí su nombre, en honor de Arquímedes. Señalemos dos de estos momentos estelares de la Biología.

Alec Jeffreys, el descubridor de la «huella genética», describe así este momento eureka singular. Eran las 9:05 h del lunes 10 de septiembre de 1984. Se encontraba en su laboratorio de Leicester, comparando las bandas de ADN de diferentes miembros de una misma familia. De repente, en menos de treinta segundos, descubrió que aparecían similitudes y diferencias inesperadas, a modo de patrones de bandas, como si se tratara de códigos de barras que identificaban a cada individuo. Tan solo media hora después ya había vislumbrado el alcance del descubrimiento de la huella genética: se podía identificar cada individuo, así como reconocer su parentesco con otros, mediante un simple análisis de su perfil de ADN, y resolver con ello querellas de paternidad, crímenes policíacos, relacio-

nes familiares, etc., además de otras aplicaciones de lo más variadas en el campo de la biología.

Y Melvin Calvin, que hacia 1954 cerró su famoso ciclo de la ruta de fijación fotosintética del CO₂ (el célebre ciclo de Calvin) de forma repentina. Disponía de datos recientes de su laboratorio, pero parecía como si a este puzzle le faltara una pieza y hubiera otras que no encajaban. Dejemos que cuente él mismo cómo fue ese momento: «Un día me encontraba esperando en el coche, probablemente aparcado en una zona prohibida, mientras mi mujer hacía un recado (...) Mientras estaba sentado al volante, el reconocimiento del compuesto que faltaba se produjo de forma bastante repentina. De repente, también, en cuestión de segundos, se me hizo evidente el carácter cíclico completo de la ruta del carbono (...) Todo ocurrió en cuestión de 30 segundos» (Calvin, 1989).

También podríamos traer aquí otros momentos eureka que han transformado la investigación en biología ya para siempre, como los asociados a los descubrimientos de la penicilina por Alexander Fleming en 1928, de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) por Kary Mullis en 1983, o de las «tijeras mágicas» del CRISPR por Francis Mojica en 2001.

¿Se cumple en todos estos casos que la inspiración ha valido más que el trabajo? No está claro. Ya Albert Einstein afirmaba que «la imaginación es más importante que el conocimiento». Pero analicemos los descubrimientos anteriores. Podría parecer que se alcanzaron por serendipia (según el diccionario de la RAE: «hallazgo valioso que se produce de manera accidental o casual»). Pero todos ellos fueron precedidos de observación, un conjunto de conocimientos previos y un concienzudo trabajo (de laboratorio, en todos estos casos). Como se atribuye a Pablo Picasso (y a otros): «la inspiración existe, pero te debe encontrar trabajando». Y Melvin Calvin concluye su relato de esta manera: «Así que supongo que existe algo así como la inspiración, pero uno tiene que estar preparado cuando llega».

¿Y si resulta que lo decisivo en la investigación científica es precisamente la combinación de un trabajo riguroso –basado en observaciones y conocimientos previos– e inspiración?

Si esto es así, **AmbioCiencias** participa con su granito de arena, sumando trabajo e inspiración, en el desarrollo de la investigación, mediante la apuesta por una divulgación científica de calidad:

1) Genera una red de conocimientos valiosos. En este número cabe destacar el artículo de la sección **A fondo**, aportado por la Dra. Isabel Fariñas, catedrática de Biología Celular de la Universidad de Valencia y Premio Nacional de Investigación 2024 –uno de los reconocimientos principales en España en el campo de la investigación científica–, sobre la capacidad de reparación del cerebro. (Agradecemos a la Dra. Isabel Fariñas el esfuerzo realizado, ya que ha tenido que compatibilizar la elaboración del artículo con las actividades ligadas a la recepción del premio y las dificultades sobrevenidas por la devastadora DANA).

2) Expone la biografía de un científico destacado en la sección **Uno de los nuestros**. En este número, la doctora Barbara McClintock, presentada por Luis Sáenz de Miera. Esta «mujer solitaria entre el maíz» también podría confirmar con su experiencia que la investigación científica proviene de una conjunción de tenacidad e ingenio.

3) Sirve de cauce para la difusión de las investigaciones de profesores de reciente incorporación, como las publicadas en la sección **Baúl de la Ciencia**, en este caso tan variadas como la etología del movimiento animal y los sistemas bioelectroquímicos.

4) Promueve la publicación de colaboraciones científicas de investigadores noveles. En este sentido son una buena prueba de ello los cinco artículos de las secciones **Poniendo en claro** y **Siguiendo la pista**, que abordan campos tan diversos como la geología, las fisiologías animal y vegetal, la botánica y la zoología. Para muchos de los autores estas publicaciones constituyen la primera plataforma rigurosa para divulgar sus resultados.

5) Expone las experiencias de investigadores singulares. Destacamos el artículo de la sección de **Ambiólogos de aquí**, en el que María Franco –actualmente en la Universidad de Arhus (Dinamarca)– nos relata con gran vitalidad los proyectos que ha ido emprendiendo, al ritmo de las oportunidades que se le han ido abriendo de forma inesperada a lo largo de su trayectoria. También resaltamos el artículo de Nicole Martínez, dentro de la sección **Mi proyecto de tesis**, en el que expone sus trabajos relacionados con las investigaciones oncológicas.

6) Por último, refleja el compromiso de nuestra Facultad por la enseñanza de calidad, como lo muestran las secciones **De todo un poco** y **Educando en lo nuestro**. Así, el grupo de innovación docente Biometac relata los últimos proyectos que ha emprendido con el fin de difundir la enseñanza de la Biología fuera de las aulas universitarias. Sus iniciativas son también el resultado de un trabajo muy bien programado, unido a un notable grado de inventiva orientada a la práctica docente.

En conclusión, esta red de artículos que tejen el número 22 de **AmbioCiencias** permite afirmar que el desarrollo tanto de la divulgación científica como de la innovación docente –independientemente del campo científico concreto en el que se enmarquen y el tipo de proyecto que persigan– se basan en la sinergia entre el trabajo riguroso (cimentado en observaciones y conocimientos previos) y la inspiración propia de quienes miran la realidad con los ojos bien abiertos.

José Luis Acebes

Referencias:

Calvin, M. 1989. Forty years of photosynthesis and related activities. *Photosynthesis Research*, 21:3-16.

Topolinski, S. y Rebel, R. 2010. Gaining insight in the “Aha” experience. *Current Directions in Psychological Science*, 19(6):402-405.

A FONDO

¿Es posible reparar el cerebro?

Isabel Fariñas¹

¹ Centro de Investigación Biomédica en Red de Enfermedades Neurodegenerativas (CIBERNED), Spain.

Departamento de Biología Celular, Biología Funcional y Antropología Física, Universidad de Valencia, Burjassot, Spain.

Instituto de Biotecnología y Biomedicina (BioTecMed), Universidad de Valencia, Burjassot, Spain.

Isabel.Farinas@uv.es

Resumen

El cerebro humano, con su intrincada red de 86.000 millones de neuronas y trillones de contactos sinápticos entre ellas, es el órgano más complejo de nuestro cuerpo. Este sofisticado órgano es la base de nuestra identidad, coordina funciones vitales, nos permite razonar y nos da la capacidad de adaptarnos a un mundo en constante cambio. Sin embargo, también es sorprendentemente vulnerable a daños. Lesiones traumáticas, enfermedades neurodegenerativas y el envejecimiento pueden afectar su funcionamiento, causando pérdidas de memoria, déficits motores y cambios en nuestra personalidad. Durante décadas, se consideró que las neuronas del cerebro adulto no podían regenerarse y que cualquier daño era permanente. Descubrimientos recientes han demostrado que el cerebro posee una notable capacidad de adaptación y reorganización a lo largo de la vida, pero está en discusión qué posibilidades hay para su reparación cuando impacta una enfermedad neurodegenerativa que causa la muerte de innumerables neuronas. Este artículo explora los avances científicos que pueden acercarnos a terapias regenerativas en el sistema nervioso, como son la reprogramación celular y la neurogénesis adulta. Las posibilidades son aún remotas, pero las ideas de futuro inspiran algunos de los trabajos en la investigación fundamental actual.

Desarrollo del cerebro y plasticidad neural

Los miles de millones de neuronas que forman el sistema nervioso central de los humanos tienen su origen en un pequeño tubo, compuesto por apenas unos miles de células, ubicado en la región dorsal del embrión en desarrollo. Estas células, denominadas neuroepiteliales, constituyen la pared del tubo y actúan como células progenitoras, dando lugar tanto a las neuronas, como a las células gliales que cumplen funciones de soporte (astrocitos y oligodendrocitos). Resulta asombroso que de este diminuto tubo surja todo el sistema nervioso, al punto de que, durante algunas etapas de la gestación, pueden generarse hasta 250.000

nuevas neuronas por minuto. Aunque todavía no se comprende completamente qué factores regulan esta impresionante capacidad proliferativa de las células progenitoras para la generación de neuronas, proceso conocido como neurogénesis, este fenómeno ha sido clave para la extraordinaria expansión del cerebro a lo largo de la evolución, que culmina en el nuestro. Una vez generadas, las neuronas no vuelven a dividirse, lo que lleva a los neurobiólogos a describir poéticamente su formación como un “nacimiento” (Lemke *et al.*, 2009).

Cabe destacar que casi todas las neuronas con las que vivimos a lo largo de nuestra vida se producen durante el desarrollo fetal, ya que las células progenitoras desaparecen, en general, al final de la etapa prenatal. Parece sorprendente que el órgano que nos permite reconocer nuestro entorno y adaptarnos a él se construya casi enteramente en ausencia de estímulos del exterior. Pero nuestra capacidad de adaptación depende realmente de un fenómeno que llamamos **plasticidad neural**, que tiene lugar después del nacimiento en respuesta a los estímulos (von Bernhardi *et al.*, 2017). Esta plasticidad se fundamenta en cambios en la extensión de las dendritas y axones de las neuronas y en las conexiones sinápticas entre ellas, así como en cambios moleculares que aún no comprendemos del todo. Estos cambios permiten que circuitos más utilizados se refuercen mientras que aquellos menos usados se debiliten, configurando la singularidad del conexionado de cada individuo en función de sus experiencias. La plasticidad neural es esencial para el aprendizaje y la memoria a la vez que nos hace únicos. El cerebro es más plástico durante la infancia y la juventud, cuando las experiencias tienen un impacto profundo y duradero en su organización. Sin embargo, los estudios en neurociencia de las últimas décadas han demostrado que la plasticidad neural no desaparece con la edad. Aunque se reduce, persiste en la edad adulta y puede ser estimulada por el aprendizaje, el ejercicio físico o la rehabilitación cognitiva.

La plasticidad celular: ¿nuevas neuronas en un cerebro maduro?

Durante décadas se consideró que las neuronas del cerebro adulto no podían regenerarse. Esto significaba que, a lo largo de la vida, no habría una ganancia neta de neuronas, sino únicamente pérdidas, las cuales aumentarían con la edad o se acelerarían por traumatismos y enfermedades neurodegenerativas asociadas al envejecimiento. Se consideraba que las vías nerviosas establecidas eran inmutables y que cualquier daño era permanente. Así, el mismo Santiago Ramón y Cajal expresaba en su obra “Estudios sobre la degeneración y regeneración del sistema nervioso” que “*Los circuitos nerviosos son algo fijo, cerrado e inmutable. Todo puede morir, pero nada puede regenerarse...*” (Ramón y Cajal, 1913). Sin embargo, uno de los descubrimientos más sorprendentes de la neurociencia de la segunda mitad del siglo XX ha sido el de la **neurogénesis adulta**, el proceso mediante el cual se generan nuevas neuronas en los cerebros de los vertebrados adultos. Aunque podría pensarse que Cajal, que nunca se equivocó en ninguna de sus interpretaciones sobre el sistema nervioso como refrendaron

los estudios funcionales posteriores, no consideró esta posibilidad, lo cierto es que la frase anteriormente citada continuaba con “...Será tarea de la ciencia del futuro cambiar, si es posible, este duro decreto” (Ramón y Cajal, 1913).

Este fenómeno, que desafió el dogma establecido durante décadas, se ha convertido en un área de intensa investigación por su potencial terapéutico y por la información que puede aportar a nuestra comprensión sobre la formación de algunos tipos de memoria y fenómenos plásticos en nuestro cerebro. El proceso consiste en la formación de nuevas neuronas funcionales a partir de células madre neurales (CMN) que permanecen, desde el desarrollo embrionario, en regiones específicas del cerebro adulto y que actúan como células progenitoras. Aunque inicialmente se documentó en animales, como roedores y aves, se ha demostrado que la neurogénesis adulta también ocurre en humanos (Moreno-Jiménez *et al.*, 2021).

En los roedores adultos, donde la neurogénesis adulta está más estudiada, la producción de neuronas se concentra en dos regiones específicas del cerebro: la zona subgranular del giro dentado del hipocampo, en la que se producen nuevas neuronas que se integran en el propio giro dentado y participan en la formación de recuerdos a corto plazo y en el aprendizaje espacial, y la zona subventricular, localizada en la pared que recubre los ventrículos laterales, donde se producen neuronas que migran al bulbo olfatorio y participan en el procesamiento de olores (Bond *et al.*, 2015; Chaker *et al.*, 2024). Aunque en mamíferos se ve reducida a estas dos áreas concretas principalmente, en peces, reptiles y aves, la neurogénesis adulta está más extendida, sugiriendo que el proceso de adición de nuevas neuronas en cerebros adultos se ha ido restringiendo a lo largo de la escala evolutiva (Kempermann, 2015). En humanos se reconocen las mismas dos zonas neurogénicas que en otros mamíferos, aunque está en discusión durante cuántas décadas tendría lugar la producción de nuevas neuronas (Moreno-Jiménez *et al.*, 2021). Esta última incertidumbre, junto con el hecho de que la localización de estos nichos productores de nuevas neuronas es muy restringida, sugiere que las CMN presentes en los nichos neurogénicos puedan no ser suficientes para regenerar neuronas perdidas en procesos neurodegenerativos.

La crisis global de las enfermedades neurodegenerativas y la terapia celular

Las enfermedades neurodegenerativas representan uno de los mayores desafíos de salud pública del siglo XXI. Estas afecciones, como el Alzheimer o el Parkinson, se caracterizan por la pérdida progresiva de neuronas y sus conexiones, lo que conduce a un deterioro irreversible de las funciones cognitivas, motoras y emocionales (Wilson *et al.*, 2023). El Alzheimer, la forma más común de demencia, afecta a más de 55 millones de personas en todo el mundo. Esta enfermedad destruye lentamente las neuronas del hipocampo, responsables de la memoria y el aprendizaje, y eventualmente se propaga a otras áreas del cerebro, causando confusión, cambios de personalidad y pérdida de independencia.

La acumulación de agregados proteicos (placas de beta-amiloide y ovillos neurofibrilares de tau) son características patológicas del Alzheimer. Estas proteínas anómalas interrumpen la comunicación entre las neuronas y activan procesos inflamatorios que aceleran su muerte.

La enfermedad de Parkinson (PD, por sus siglas en inglés), la afección neurodegenerativa motora más común, afecta a 10 millones de personas en todo el mundo, con una prevalencia también en aumento, debido al envejecimiento de la población en los países desarrollados. Aunque existen casos hereditarios asociados a mutaciones genéticas específicas, la mayoría de los casos son de origen desconocido, posiblemente influenciado por factores genéticos y ambientales. Los síntomas principales incluyen temblores en reposo, lentitud de movimientos (bradicinesia), rigidez muscular e inestabilidad postural, todo resultado de la degeneración de las neuronas dopaminérgicas de la sustancia negra del cerebro, que inervan los núcleos motores del estriado. Estos síntomas aparecen tras décadas de pérdida gradual de estas neuronas, cuando ya se ha reducido en más del 50 % su número y en más del 70 % los niveles de dopamina (DA) que estas neuronas producen y liberan en el estriado. El tratamiento con L-DOPA, un precursor de la DA que cruza la barrera hematoencefálica, mejora temporalmente los síntomas al aumentar los niveles de DA en las neuronas supervivientes. En casos avanzados o cuando la respuesta a L-DOPA disminuye, se utiliza la estimulación cerebral profunda mediante electrodos implantados en el núcleo subtalámico, que restablecen en parte la función motora al crear un “bypass” en los circuitos afectados. Sin embargo, no existe una cura definitiva y la enfermedad progresa (Obeso *et al.*, 2017).

Estas enfermedades no solo afectan la calidad de vida de los pacientes, sino que también imponen una carga significativa a las familias y los sistemas de salud. Dada la magnitud de este problema, es urgente desarrollar terapias que no solo mitiguen los síntomas, sino que también aborden las causas subyacentes de estas enfermedades. La forma ideal de abordar estas patologías, todas caracterizadas por acumulaciones anómalas de proteínas y pérdida progresiva de neuronas, sería identificar las causas que las originan y proteger a las neuronas vulnerables. Sin embargo, actualmente el diagnóstico suele realizarse en fases avanzadas, cuando ya se ha perdido un número muy significativo de neuronas. Se están dedicando muchos esfuerzos a identificar indicios tempranos que permitan detectar la enfermedad en etapas iniciales (Tolosa *et al.*, 2019). Esta búsqueda se centra en el ámbito de los biomarcadores de patología en sangre y en la mejora de las técnicas de imagen no invasiva que permitan analizar con más detalle el conexionado cerebral. Una detección precoz permitiría actuar con estrategias de neuroprotección. En ausencia de avances decisivos en este ámbito, la restitución neuronal mediante trasplantes de células emerge como una estrategia alternativa para recuperar función a partir del aporte de nuevas neuronas.

El trasplante celular en la PD ha demostrado ser seguro y factible. Los primeros ensayos, realizados hace más de 30 años en diversos países, involu-

craron a unos 400 pacientes y consistieron en implantar neuronas dopaminérgicas obtenidas de fetos de 6 a 10 semanas de gestación en el estriado (Lindvall, 2015). Aunque las neuronas trasplantadas sobrevivían y liberaban DA, mitigando los síntomas motores, el proceso requería entre 4 y 6 fetos por paciente, lo que generaba importantes limitaciones éticas y prácticas. Este escenario impulsó la búsqueda de fuentes celulares alternativas, especialmente con el auge de la investigación en células madre o células troncales (SCs, del inglés *Stem Cells*).

Medicina regenerativa basada en el uso de células madre pluripotenciales

La biología del desarrollo intenta comprender cómo se construye un organismo completo a partir de un cigoto, célula totipotente que, en mamíferos, da lugar a todas las células del organismo adulto y de los tejidos extraembrionarios de conexión con la madre (Gilbert, 2010). La segmentación del cigoto para dar más células va acompañada de una pérdida progresiva de potencial de cada una de ellas. Cuando el embrión tiene 128 células es cuando se implanta en la pared uterina y, en ese momento ya se observa una especialización de las células. Unas, más externas, ya solo pueden dar lugar a tejidos extraembrionarios y serán las responsables de la implantación. Las otras, una docena de células de localización más interna, forman la masa celular interna y serán las responsables de generar todas las células del organismo. Estas células, denominadas células madre embrionarias (ES, de *Embryonic Stem Cell*), son, por tanto, consideradas pluripotenciales. El desarrollo de métodos para cultivar células ES de embriones preimplantacionales humanos (hES) en 1998 marcó un gran avance (Thompson *et al.*, 1998). Estas células pueden expandirse indefinidamente en condiciones que preservan su pluripotencialidad y la comunidad científica ha establecido protocolos de cultivo que nos permiten inducir de manera controlada la diferenciación de estas células en tipos celulares concretos, como puedan ser neuronas dopaminérgicas (Kriks y Studer, 2009). Esto abrió la posibilidad de obtener neuronas dopaminérgicas sin limitación de número para trasplantes en PD, salvando los problemas inherentes al uso de neuronas dopaminérgicas fetales ya ensayado.

A pesar del enorme potencial para la medicina regenerativa, las células hES presentaban el problema del crecimiento ilimitado si no se diferenciaban completamente en la placa de cultivo, algo esperable ya que ningún proceso en biología es 100 % eficaz. Esto podía conllevar la generación de tumores y, por ello, aún no se han extendido las terapias basadas en el uso de estas células. Por otro lado, existía, como en cualquier trasplante, la preocupación del rechazo de células que, por no ser del propio paciente (trasplante heterólogo), podían ser inmunológicamente incompatibles. Al tener en cuenta esta consideración, los investigadores del ámbito consideraron que existía la posibilidad de generar células pluripotenciales idénticas a las del paciente que recibiría el trasplante, mediante lo que se denominó clonación terapéutica. Esta estrategia se fundamentaba en las metodologías de clonación. La clonación reproductiva, como la utilizada para generar

la famosa oveja Dolly (Campbell *et al.*, 1996), consiste en transferir el núcleo de una célula somática (una epitelial de glándula mamaria, en el caso de Dolly) a un óvulo al que se le ha extirpado el núcleo. El citoplasma del óvulo “reprograma” el núcleo de la célula adulta para convertirlo en totipotente y, por tanto, es capaz de dar lugar a un organismo completo genéticamente idéntico a aquel del que se obtuvo el núcleo. La clonación reproductiva en humanos está prohibida en todos los países del mundo. Pero algunos se plantearon la posibilidad de aplicar la técnica de transferencia de núcleo somático en óvulos a fin de generar un embrión hasta la fase de 128 células del cual obtener células ES que serían idénticas al individuo que habría donado las células somáticas (generalmente fibroblastos dérmicos, obtenidos de manera sencilla en cirugías ambulatorias).

Las dos primeras publicaciones describiendo la obtención de células ES pluripotenciales de embriones generados de esta manera aparecieron en la revista *Science* (Hwang *et al.*, 2004; Hwang *et al.*, 2005) y fueron retractadas un año más tarde por fraude. Esto constituyó un duro golpe a la medicina regenerativa basada en células ES. Y entonces se publicaron dos trabajos que yo considero de los más espectaculares en la biología del desarrollo, por parte del investigador Shinya Yamanaka (Takahashi y Yamanaka, 2006; Takahashi *et al.*, 2007), que lo cambiaron todo.

Reprogramación celular: ¿el futuro de la reparación cerebral?

Los estudios de Yamanaka demostraron que cualquier célula diferenciada, como un fibroblasto de la piel, podía reprogramarse al estado pluripotencial mediante la introducción de tan solo cuatro genes específicos (Sox2, Oct4, Klf4 y c-myc), el llamado desde entonces cóctel de Yamanaka. Esto significaba que para “reprogramar” el núcleo de una célula somática de cualquier individuo al estado pluripotencial bastaba con una sencilla manipulación, factible en cualquier laboratorio de biología molecular, consistente en introducir estos cuatro genes. Este hallazgo revolucionario, que dio lugar a las denominadas células iPS (células madre pluripotentes inducidas), abrió la puerta a una medicina regenerativa personalizada, y era merecedor del Premio Nobel en 2012, tan solo 5 años más tarde.

Tanto las hES como las iPS pueden diferenciarse en neuronas DA en la placa de cultivo, pero su uso clínico enfrenta desafíos importantes, como el riesgo de proliferación descontrolada de células indiferenciadas antes mencionado, que podría derivar en la formación de tumores. Por ello, no se han aprobado ensayos clínicos con células pluripotentes para la PD u otras enfermedades. Mientras se llega a ese punto, estas células han captado el interés de la industria farmacéutica, que busca utilizarlas como modelos personalizados de enfermedad a partir de conseguir fibroblastos dérmicos de pacientes con una enfermedad, inducción de pluripotencia y diferenciación de las células IPs personalizadas al tipo celular deseado en el que ensayar medicamentos.

Los experimentos de Yamanaka han tenido una enorme trascendencia en cómo comprendemos el desarrollo humano. Siempre habíamos considerado

que el potencial de las células se iba restringiendo a lo largo del desarrollo, de la totipotencia del cigoto, a la pluripotencia de la masa celular interna, a la multipotencia de otros tipos celulares y a la especialización terminal de las células diferenciadas de nuestros tejidos adultos. La clonación indicaba que el proceso podía ser reversible y los experimentos de Yamanaka indicaban que, además, la reversibilidad era fácilmente controlable (Yagi *et al.*, 2024). Todo un hito.

En este nuevo contexto, en el cual es posible reprogramar, de manera sencilla, una célula especializada en una célula pluripotencial, parecía razonable pensar que seríamos capaces de reprogramar una célula desde un estado diferenciado a otro estado diferenciado distinto, lo que denominamos reprogramación directa o transdiferenciación (Yagi *et al.*, 2024). La primera demostración de reprogramación directa a neuronas en cultivo se llevó a cabo con adipocitos de la grasa (Yang *et al.*, 2013). La posibilidad de reprogramación directa o transdiferenciación mediante la introducción de genes específicos ha llevado a explorar la posibilidad de reprogramar astrocitos, presentes en abundancia en el cerebro y resistentes a los procesos neurodegenerativos, hacia un estado neurogénico capaz de producir las neuronas necesarias para reemplazar a las que se pierden, en cualquier área cerebral (Barker *et al.*, 2018). Este proceso eliminaría la necesidad de pasar por un estado pluripotencial, reduciendo los riesgos asociados, como la formación de tumores. Si bien esta idea aún está en desarrollo, ya es factible en ratones, y su potencial a futuro para abordar enfermedades neurodegenerativas difusas, como la PD en etapas avanzadas, es notable (Wei y Shetty, 2021). La reprogramación celular *in situ* evita el trasplante, ya que las células reprogramadas se generan directamente en el cerebro, eliminando la necesidad de cirugías invasivas. Reduce el riesgo de rechazo, dado que las células reprogramadas provienen del propio paciente, evitando reacciones inmunológicas adversas. Y, además, ofrece especificidad si se averigua cómo controlar la producción de tipos específicos de neuronas.

En definitiva, aunque los retos son considerables, el progreso en terapias celulares y neuroprotectoras, junto con avances en biotecnología y reprogramación celular, está trazando el camino hacia nuevas estrategias para tratar enfermedades neurodegenerativas. La combinación de enfoques regenerativos y protectores podría revolucionar el tratamiento de estas patologías, siempre que se logre su detección precoz y un mejor entendimiento de sus mecanismos subyacentes. Eso sí, todavía hace falta mucha investigación y ninguna de estas intervenciones está a la vuelta de la esquina. Las nuevas tecnologías nos permiten, eso sí, soñar.

Conclusión

La idea de reparar el cerebro ha pasado de ser un sueño lejano a un objetivo alcanzable gracias a avances como la plasticidad neural, la neurogénesis adulta y la reprogramación celular. La medicina regenerativa, que incluye enfoques como la neurogénesis inducida y la reprogramación celular, se ha convertido

en una esperanza para tratar enfermedades neurodegenerativas. A diferencia de las terapias tradicionales, que se centran en aliviar los síntomas, estas tecnologías buscan restaurar las funciones cerebrales mediante la regeneración de neuronas y la reparación de circuitos dañados. Aunque la medicina regenerativa ofrece un gran potencial, también plantea desafíos técnicos, científicos y éticos. Desde un punto de vista técnico, garantizar que las nuevas neuronas se integren correctamente en los circuitos existentes sin causar disfunciones es un reto importante. Además, la proliferación incontrolada de células reprogramadas podría aumentar el riesgo de tumores. Aunque todavía enfrentamos desafíos científicos y éticos significativos, cada descubrimiento nos acerca más a un futuro en el que enfermedades neurodegenerativas, lesiones cerebrales y el envejecimiento puedan ser tratados de manera efectiva. Este avance no solo transformará la medicina, sino que también redefinirá lo que significa ser humano.

Referencias

- Barker, R. A., Götz, M. y Parmar, M. 2018. New approaches for brain repair-from rescue to reprogramming. *Nature*, 557(7705):329-334.
- Bond, A. M., Ming, G. L. y Song, H. 2015. Adult mammalian neural stem cells and neurogenesis: five decades later. *Cell Stem Cell*, 17(4):385-95.
- Campbell, K. H., McWhir, J., Ritchie, W. A. y Wilmut, I. 1996. Sheep cloned by nuclear transfer from a cultured cell line. *Nature*, 380(6569):64-66.
- Chaker, Z., Makarouni, E. y Doetsch, F. 2024. The organism as the niche: Physiological states crack the code of adult neural stem cell heterogeneity. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 40(1):381-406.
- Gilbert, S. F. 2010. *Developmental Biology*. Sinauer Associates, Sunderland, 9ª edición.
- Hwang, W., Roh, S., Lee, B., Kang, S., Kwon, D. *et al.* 2005. Patient-specific embryonic stem cells derived from human SCNT blastocysts. *Science*, 308:1777-1783. RETRACTADO
- Hwang, W., Ryu, Y., Park, J., Park, E., Lee, E. *et al.* 2004. Evidence of a pluripotent human embryonic stem cell Line derived from a cloned blastocyst. *Science*, 303:1669-1674. RETRACTADO
- Kempermann, G. 2015. Adult neurogenesis: An evolutionary perspective. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 18;8(2):a018986.
- Kriks, S. y Studer, L. 2009. Protocols for generating ES cell-derived dopamine neurons. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 651:101-111.
- Lemke, G. 2009. *Developmental Neurobiology*. Academic Press; 1ª edición.
- Lindvall, O. 2015. Treatment of Parkinson's disease using cell transplantation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 370(1680):20140370.

- Moreno-Jiménez, E. P., Terreros-Roncal, J., Flor-García, M., Rábano, A. y Llorens-Martín, M. 2021. Evidences for adult hippocampal neurogenesis in humans. *Journal of Neuroscience*, 41(12):2541-2553.
- Obeso, J. A., Stamelou, M., Goetz, C. G., Poewe, W., Lang, A. E. *et al.* 2017. Past, present, and future of Parkinson's disease: A special essay on the 200th anniversary of the shaking palsy. *Movement Disorders*, 32(9):1264-1310.
- Ramón y Cajal, S. 1913. Estudios sobre la degeneración y regeneración del sistema nervioso. Tomo I, Degeneración y regeneración de los nervios. Madrid: Imprenta de Hijos de Nicolás Moya.
- Takahashi, K., Tanabe, K., Ohnuki, M., Narita, M., Ichisaka, T., Tomoda, K. y Yamanaka, S. 2007. Induction of pluripotent stem cells from adult human fibroblasts by defined factors. *Cell*, 131(5):861-872.
- Takahashi, K. y Yamanaka, S. 2006. Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibroblast cultures by defined factors. *Cell*, 126(4):663-676.
- Thomson, J. A., Itskovitz-Eldor, J., Shapiro, S. S., Waknitz, M.A., Swiergiel, J. J., Marshall, V.S. y Jones, J. M. 1998. Embryonic stem cell lines derived from human blastocysts. *Science*, 282(5391):1145-1147.
- Tolosa, E., Garrido, A., Scholz, S. W. y Poewe, W. 2021. Challenges in the diagnosis of Parkinson's disease. *The Lancet Neurology*, 20(5):385-397.
- von Bernhardt, R., Bernhardt, L. E. y Eugén, J. 2017. What is neural plasticity? *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1015:1-15.
- Wei, Z. D. y Shetty, A. K. 2021. Treating Parkinson's disease by astrocyte reprogramming: Progress and challenges. *Science Advances*, 7(26):eabg3198.
- Wilson, D. M. 3rd, Cookson, M. R., Van Den Bosch, L., Zetterberg, H., Holtzman, D. M. y Dewachter, I. 2023. Hallmarks of neurodegenerative diseases. *Cell*, 186(4):693-714.
- Yagi, M., Horng, J. E. y Hochedlinger, K. 2024. Manipulating cell fate through reprogramming: approaches and applications. *Development*, 151(19):dev203090.
- Yang, Y., Jiao, J., Gao, R., Yao, H., Sun, X. F., Gao, S. 2013. Direct conversion of adipocyte progenitors into functional neurons. *Cellular Reprogramming*, 15(6):484-489.

PONIENDO EN CLARO

La arena como recurso: aplicaciones en la industria de la construcción e impactos ambientales derivados

June Fernández de Monje¹, Elena Colmenero Hidalgo², Juncal Altagracia Cruz Martínez³.

¹ Graduada en Ciencias Ambientales (Curso 2019-2024) jfernu01@estudiantes.unileon.es

² Tutora del Departamento de Geografía y Geología e.colmenero@unileon.es

³ Cotutora del Departamento de Geografía y Geología jcrum@unileon.es
Facultad de C.C. Biológicas y Ambientales, Universidad de León. Campus de Vegazana, 24071, León.

Resumen

A partir de mediados del siglo XX, motivado por el aumento exponencial de la población urbana mundial, el consumo de arena y grava para construcción ha experimentado un crecimiento más acelerado y a mayor escala que cualquier otro grupo de recursos. La arena constituye uno de los recursos básicos de la sociedad actual, al ser el principal componente del hormigón con el que se construyen infraestructuras y proyectos de gran envergadura. Sin embargo, es un recurso cada vez más limitado. La extracción descontrolada a nivel mundial pone en evidencia los efectos significativos de su explotación sobre el medio ambiente y la sociedad. Mediante este trabajo se realiza un análisis integral de dicha problemática a través de una revisión de fuentes bibliográficas y se plantean cuatro líneas principales de acciones para paliar el daño ambiental derivado de la explotación de este recurso. La gravedad de los impactos estudiados subraya la urgente necesidad de actuación de los poderes políticos frente a la crisis de escasez de la arena, así como la necesidad de establecer políticas restrictivas para regular su extracción.

Palabras clave

“crisis de la arena”, dragado, extracción, hormigón y ganancia de tierras

Introducción y objetivo

La arena, un recurso mineral aparentemente inagotable, desempeña un papel crucial en las industrias de la construcción y tecnológica. La extracción de áridos de construcción (arena y grava), impulsada por el aumento de la población mundial y la necesidad de mayor cantidad de terrenos urbanizables, ha crecido exponencialmente en las últimas décadas y en mayor escala que cualquier otro grupo de recursos, lo que los convierte en el mayor recurso mineral consumido

actualmente a nivel mundial (Bisht, 2021). El Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, *United Nations Environment Programme*) (2022) señala que la arena es, después del agua, el recurso natural más extraído y comercializado por volumen. Peduzzi (2014) estima que anualmente se extraen $5 \cdot 10^{10}$ toneladas de agregados (arena y grava) a nivel mundial.

Son múltiples los usos que tiene la arena en distintos sectores, destacando su función en la fabricación de hormigón y vidrio, ambos imprescindibles para el desarrollo urbano y la construcción de infraestructuras. Peduzzi (2014) sostiene que la demanda de hormigón por parte de China ha experimentado un aumento del 437,5 % en 20 años, mientras que su uso en el resto del mundo ha aumentado un 59,8 %. Así mismo, el vidrio está presente en la vida diaria de todos, desempeñando un papel fundamental en diversos aspectos cotidianos.

Las elevadas cantidades de arena extraída, los incontables puntos de extracción existentes y el comercio global de este recurso para su uso en la realización de megaproyectos de construcción, conllevan múltiples impactos ambientales significativos y alejan a la industria de la extracción de arena de la sostenibilidad.

Así lo expuesto, el **objetivo principal** de este trabajo consiste en realizar un análisis integral de la problemática medioambiental vinculada a la extracción de arena para su uso en la industria de la construcción y, en concreto, en la edificación de megaproyectos, a través de una revisión bibliográfica exhaustiva.

Metodología

El análisis bibliográfico llevado a cabo en este trabajo se ha fundamentado en la revisión de estudios publicados con temática relacionada con la extracción de arena y su relevancia a escala mundial, junto con el análisis de las implicaciones de esta actividad en el entorno ambiental. Para ello, se ha llevado a cabo una recopilación exhaustiva de estudios cuantitativos y cualitativos en español y en inglés referentes al tema mediante la búsqueda en línea a través de bases de datos científicas y el empleo de diversas palabras clave.

Las bases de datos y plataformas de publicaciones científicas utilizadas han sido “Scopus”, “Scencedirect” y “Researchgate”, de uso común en Ciencias Experimentales. También se han realizado búsquedas en revistas científicas específicas como “Nature Sustainability” o “Scientific Reports”. También se ha extraído información del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y de organizaciones como International Association of Dredging Companies (Asociación Internacional de Empresas de Dragado), entre otros.

Las referencias reunidas se han agrupado de la siguiente manera: artículos en revistas científicas, libros especializados e informes de organizaciones internacionales. Todas ellas han permitido a su vez, a través de citas y enlaces web, ampliar la información y trabajar con una extensa literatura científica.

Arena como recurso: aplicación y extracción

¿Qué es la arena?

En **Geología** la arena viene definida por ser el conjunto de fragmentos de rocas y minerales disgregados con un tamaño comprendido entre 0,0625 y 2 milímetros. Así mismo, atendiendo a la Clasificación granulométrica de materiales sedimentarios de Wentworth (1922) es posible clasificar la arena en cinco tipos: muy gruesa, gruesa, media, fina y muy fina. Una partícula que se encuentra dentro de este rango se denomina grano de arena.

La arena se puede formar a partir de varios procesos: erosión hídrica o glacial, erosión eólica o ciclos de congelación-descongelación, entre otros. Los sedimentos sólidos que se forman tras dichos procesos son transportados por el agua, el viento o el hielo mientras se continúan fragmentando. La arena puede depositarse en numerosos entornos, como en lechos de ríos, lagos, playas, lechos marinos y desiertos. Se estima que el proceso de formación de los granos de arena dura aproximadamente 200 millones de años, lo que convierte la arena en un recurso no renovable en la escala temporal humana.

En contraposición a lo mencionado hasta ahora, en el ámbito de la **Minería** la arena es un tipo de árido empleado en la construcción. Los áridos resultan necesarios en la fabricación de hormigón y de cemento, en obras de construcción de infraestructuras y edificaciones de cualquier país, entre otros.

La arena como recurso

En el siglo XXI la arena se ha convertido en un recurso imprescindible para la sociedad y el desarrollo económico de la misma. La arena es esencial para la construcción y equipamiento de edificaciones y obras civiles, ya que se emplea tanto en la fabricación de hormigón, de cemento necesario para construir edificios y pavimentar carreteras, como en la producción de vidrio, televisores, paneles solares o espejos que los revistan. Debido a la creciente digitalización de la sociedad, su uso como materia prima en la fabricación de chips de ordenadores, teléfonos móviles y otros aparatos electrónicos es vital.

Atendiendo a las distintas aplicaciones de la arena, Beiser (2019) la separa en dos grupos: la arena industrial y la arena marina.

La arena industrial (riberas, playas, lagos y arroyos), engloba a todas aquellas arenas empleadas en la fabricación de vidrio y la elaboración de hormigón para el sector de construcción.

La arena marina (playas y zonas costeras) se emplea para la construcción de islas artificiales, recuperación de tierras o alimentación de playas, entre otros.

Debido a que la arena se considera un recurso no renovable, surge la siguiente duda: ¿es posible emplear la arena del desierto en construcción? A día de hoy la respuesta es negativa. La mayoría de los granos encontrados en los de-

siertos son demasiado redondeados para ser utilizados en la construcción, ya que su forma redonda no proporciona la misma adherencia que los granos angulares (Beiser, 2019; Bisht, 2021).

Utilización en construcción

El auge de la urbanización del territorio, motivado por el rápido aumento de la población mundial y el éxodo rural de las últimas décadas, va de la mano con el incremento de la necesidad de arena en el sector de la construcción. Cuantos más edificios y carreteras se precisan, más hormigón es necesario. El hormigón se obtiene mediante la mezcla de agregados (gravas y arena) con cemento y agua. De acuerdo con Beiser (2019), en el siglo XXI China se ha convertido en el principal consumidor de hormigón a nivel mundial y en el mayor consumidor de arena en la historia de la humanidad. En China hay más 113 ciudades que superan el millón de habitantes, y en todas ellas son necesarios edificios, puertos, carreteras, aeropuertos etc., construido todo ello con hormigón.

Fabricación de vidrio

La fabricación de vidrio es una de las aplicaciones de la arena que más ha influenciado la configuración de la sociedad moderna. En la actualidad el vidrio forma parte de cada aspecto de la vida cotidiana: las ventanas que aíslan los hogares, forma parte de las pantallas de los teléfonos móviles, relojes y televisores, etc. Es importante destacar que el descubrimiento del vidrio ha permitido grandes avances para la humanidad y ha jugado un papel importante en la revolución científica, ya que ha permitido el desarrollo del microscopio y el telescopio.

Ganancia de terreno al mar (land reclamation)

Numerosas ciudades en todo el planeta están viendo incrementada su población a una velocidad vertiginosa, haciendo necesaria una expansión urbana sin precedentes. Como resultado, ciudades costeras como Singapur o Dubái han optado por expandirse ganando territorio al mar (*land reclamation*). Todo ello requiere de millones de toneladas de arena, que en su mayoría provienen del dragado de fondos marinos, siendo también útil la arena de lechos de río o lagos.

Actualmente, la ciudad que más arena importa para su expansión costera es Singapur (Peduzzi, 2014). Desde su independencia en 1965 hasta 2017, la ciudad aumentó su superficie en 129,5·10⁵ m² (Figura 1). La gran remodelación de la costa de Singapur ha sido posible gracias a la importación de arena desde diferentes países, en los que ha llegado a agotar reservas de arena en playas y lechos de ríos (Beiser, 2019).

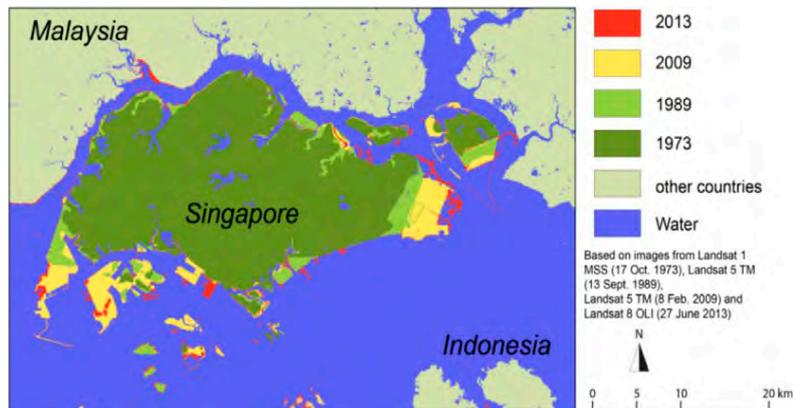
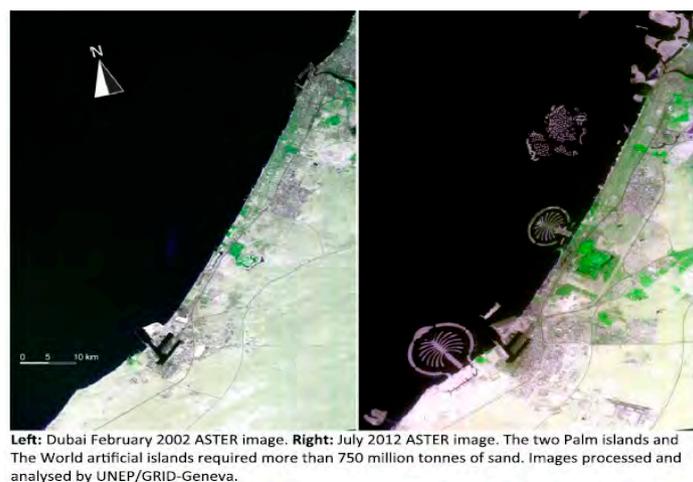


Figura 1. Mapa de Singapur realizado mediante análisis de teledetección por GRID-Ginebra (ONU), en el que se muestran los terrenos ganados al mar entre 1973 y 2013: Fuente: Peduzzi (2014).

En Dubái, la ciudad con más habitantes de los Emiratos Árabes Unidos, se han llevado a cabo numerosos proyectos de ganancia de tierras, entre los que se encuentran las Islas Palmera o las Islas del Mundo, entre muchos otros (**Figura 2**). Por ejemplo, el proyecto denominado Islas Palmera o “Palm Islands” consiste en la construcción de tres islas artificiales: Palm Jumeirah, Palm Deira y Palm Jebel Ali. Beiser (2019) afirma que la construcción de la isla supuso el dragado de $12 \cdot 10^7$ m³ de arena marina y la excavación de más de 200.000 perforaciones en el Golfo Pérsico. Así mismo, en 2005 comenzó a construirse el proyecto “The World” cerca de la costa de Dubái, que representa los continentes y países del planeta en forma de islas artificiales, construidas con arena dragada del Golfo Pérsico.



Left: Dubai February 2002 ASTER image. **Right:** July 2012 ASTER image. The two Palm islands and The World artificial islands required more than 750 million tonnes of sand. Images processed and analysed by UNEP/GRID-Geneva.

Figura 2. Izquierda: Dubái en febrero de 2002. Derecha: Dubái en julio de 2012, tras la construcción de las dos Palm Islands y la isla artificial “The World”. Imágenes satelitales ASTER. Fuente: Peduzzi (2014).

En España, los proyectos de “*land reclamation*” están más enfocados a la defensa contra la erosión costera, y a la creación de terrenos artificiales sobre los que ampliar puertos y aeropuertos. Ejemplo de ello, es el conocido “Plan Delta”, diseñado en 1994 para la construcción y ampliación de nuevas infraestructuras en la ciudad de Barcelona. Según Sanz Moliner (2002), el plan implica la reorganización de las infraestructuras de transporte y comercio de Barcelona, requiriendo la desviación del río Llobregat y la ganancia de terreno al mar.

Alimentación de playas

Tanto para la protección costera como para frenar su retroceso, en muchas playas se ha impulsado la estrategia conocida como alimentación de playas. *Climate ADAPT* (2023) define esta práctica como la distribución artificial de arena en la costa con el objetivo de subsanar la erosión de las playas y de mejorar su resistencia frente a las mareas. El proceso implica el dragado de arena marina o terrestre para alimentar la playa que está perdiendo terreno debido a la erosión (*Climate ADAPT*, 2023). A día de hoy, miles de playas alrededor del mundo son alimentadas con arena importada de otros lugares.

Extracción de la arena

En función de su uso final existen múltiples fuentes de las que es posible obtener arena. La arena de mar, tras un tratamiento de lavado de la sal, puede ser empleada en la edificación de infraestructuras y carreteras, además de ser importante en la recuperación de tierras y alimentación de playas (Beiser, 2019).

“Puntos calientes” de extracción de arena

Un ejemplo de la extracción de arena en lechos de ríos o lagos es la llevada a cabo en el río Yangtze, en el sudeste asiático. En China preocupa la extracción de arena y sus efectos sobre los ecosistemas. El río Yangtze, el principal río del país, vital para su economía y desarrollo, fue objeto de extracción de arena llevada a Shanghai (de Leeuw *et al.*, 2010), donde se necesitaban millones de toneladas para la construcción de edificios y carreteras. En el año 2000, debido a los efectos significativos sobre el medio ambiente, se prohibió la extracción de arena de este río, lo que supuso la búsqueda de nuevos puntos de extracción.

Legislación nacional e internacional

La descontrolada y creciente extracción de arena se ve favorecida por la escasa gobernanza de las naciones sobre esta actividad y la falta de legislación que regule esta práctica.

En cuanto a la legislación nacional, la Ley 22/1973 de Minas, es la encargada en España de establecer unas normas sobre la regulación de recursos minerales en el país. De acuerdo con esta ley, todos los yacimientos naturales y otros recursos geológicos presentes en el territorio nacional, mar territorial y platafor-

ma continental son de propiedad pública. Igualmente, la Ley 22/1988 de Costas establece en su artículo 63 que, para conceder las autorizaciones de extracciones de áridos y dragados, se requiere de la evaluación de sus efectos en el dominio público marítimo-terrestre, tanto en el área de extracción o dragado como en el lugar de descarga.

Comercio de arena

La industria del dragado es una industria con ganancias económicas muy elevadas, y a su vez, básica para el desarrollo económico de la sociedad actual. Todo ello ha impulsado las exportaciones e importaciones de arena en todo el mundo. De acuerdo con los datos del Observatorio de Complejidad Económica (OEC), entre los años 2020 y 2021 las exportaciones de arena aumentaron un 19,7 %, siendo Estados Unidos el mayor exportador de la misma (OEC, s. f.).

Principales impactos derivados de la extracción de arena

La Ley 21/2013 de evaluación ambiental, define “impacto o efecto significativo” como la alteración de carácter permanente o de larga duración de uno o varios factores. Entre los factores que se pueden ver alterados se encuentran: la salud humana, la flora, la fauna, el suelo, el subsuelo, el aire, el agua, el clima y los bienes materiales, entre otros.

Impacto ambiental de la extracción en ríos

Impacto en el lecho del río

Ashraf *et al.* (2011) sostienen que el incremento de la erosión del lecho fluvial y de las orillas, producto de la extracción de arena en los ríos, aumenta la cantidad de los sólidos en suspensión tanto en el punto de excavación, como aguas abajo. Esto puede derivar en cambios en la morfología del río, en la dinámica de sedimentos y en la ecología del río.

Impacto en el agua

La extracción de agregados puede resultar en impactos significativos en los sistemas hídricos, ya que dicho proceso tiene el potencial de modificar los patrones de flujo del agua subterránea y superficial, lo que a su vez puede tener consecuencias sustanciales en la calidad y cantidad de agua disponible (Bendixen *et al.*, 2021). De acuerdo con Ashraf *et al.* (2011), la actividad extractiva profundiza el nivel del lecho del río, lo que reduce la elevación del flujo de la corriente y el nivel freático de la llanura de inundación.

Impacto en la biodiversidad

La actividad de dragado da lugar a perturbaciones físicas, como la generación de ruido, que puede interferir con las actividades de anidación y reproduc-

ción de las especies (Ashraf *et al.*, 2011). Según Beiser (2017), se ha observado que el sedimento removido y el ruido producido por las embarcaciones que extraen y transportan la arena perturban de manera significativa la visión y el sonar de la marsopa, lo que dificulta su búsqueda de peces y camarones para alimentarse.

Impacto ambiental del dragado marino

De acuerdo con la Asociación Internacional de Empresas de Dragado (IADC) (2022), como consecuencia de las intervenciones físicas en los hábitats, del incremento de la turbidez del agua y de las modificaciones en la estructura de los ecosistemas, la resiliencia de los ecosistemas costeros se ve reducida.

Impacto en el balance sedimentario costero

La erosión costera puede ser consecuencia del dragado marino de agregados en depósitos próximos a la costa (Kondolf, 1997; Peduzzi, 2014). La extracción de arena en las zonas costeras frecuentemente provoca déficit sedimentario y la consiguiente erosión y desestabilización de costas y ríos, lo que disminuye la capacidad de las comunidades para hacer frente al aumento del nivel del mar e inundaciones de la franja costera (Anthony *et al.*, 2015; Torres *et al.*, 2017).

Impacto en la biodiversidad

La extracción de arena y agregados es una práctica que supone una importante amenaza para la biodiversidad de los fondos marinos en los que se lleva a cabo. Según la UNEP FI (2022), la remoción de material del lecho marino conlleva la pérdida directa de hábitats bentónicos. Los impactos pueden tener lugar directamente en las zonas de dragado o eliminación de sedimentos, o de forma indirecta a través de cambios en la calidad del agua (Erftemeijer y Lewis, 2006; Fraser *et al.*, 2017).

Contaminación atmosférica

El dragado marino tiene una significativa huella de carbono. Esto se debe a las elevadas emisiones de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de azufre (SOx) y óxidos de nitrógeno (NOx) generadas durante esta actividad. Igualmente, el procesamiento del cemento es una actividad que también genera grandes cantidades de gases como el CO₂ (Peduzzi, 2014).

Impacto ambiental de la alimentación de playas y la ganancia de tierras al mar

Los procesos de alimentación de playas, construcción de islas artificiales y ganancia de terrenos al mar, producen efectos significativos como el aumento de la turbidez, la mezcla de sedimentos de diferentes características y las perturbaciones en el hábitat físico de numerosas especies, entre otros. Por un lado, en cuanto a las playas alimentadas, la maquinaria pesada encargada de repartir la arena comprime los sedimentos y produce cambios en el hábitat físico de nume-

rosas especies. Un caso representativo es el de las tortugas marinas, las cuales precisan de unas características particulares en su zona de anidación.

Por otro lado, los proyectos de ganancia de terreno al mar pueden tener impactos como la degradación de hábitats, la explotación de humedales costeros y la alteración de la morfología del lecho, entre otros. En Dubái, millones de toneladas de arena se arrojaron sobre tres millas cuadradas de arrecife de coral designado como área protegida, como consecuencia de los complejos proyectos de ganancia de terreno al mar (Krane, 2009; Beiser, 2019).

Discusión: arena y sostenibilidad

A partir de la investigación expuesta en los apartados anteriores, las posibles soluciones a la problemática ambiental derivada de la extracción de arena se centran en 4 líneas principales: reducción del consumo y búsqueda de materiales alternativos, reducción de las consecuencias negativas de su extracción, mayor control de la industria y comercio extractivo, y búsqueda de fuentes de arena alternativas.

Reducción del consumo

Es urgente reducir el consumo innecesario y excesivo de arena e impulsar en su lugar materiales reciclados y alternativos. Mediante la reutilización, el reciclaje y la renovación de los productos y materiales se consigue cerrar sus ciclos, lo que a su vez conlleva una reducción en la extracción de arena y en los consecuentes impactos ambientales. En España, normas como el RD 105/2008, promueven el uso de áridos reciclados en proyectos de construcción públicos. Fijar impuestos para la extracción de arena, puede ser un incentivo para impulsar el uso de tecnologías y alternativas nuevas que sean económicamente viables.

Reducción de las consecuencias negativas de la extracción

Urge la instauración de normas restrictivas a nivel local y global, para lograr mejoras en la gestión de la arena y alcanzar la sostenibilidad en el sector de extracción de la misma. Además, es fundamental regular la extracción de arena tanto en aguas nacionales como internacionales, y que los líderes políticos agreguen la “crisis de la arena” a su agenda política. Entre otras medidas políticas, se propone la implementación de operaciones mineras basadas en enfoques científicos, seguidas de procesos de restauración ecológica, y el impulso e incentivos para motivar el uso de materiales alternativos, reciclados y sostenibles en sustitución de la arena.

Sistema global para monitorear y gestionar la industria

Los insuficientes sistemas de monitorización, políticas regulatorias y evaluaciones de impacto ambiental han propiciado una extracción indiscriminada de este recurso. Por ello, para lograr un consumo de arena sostenible, es fundamen-

tal establecer un sistema global con el objetivo final de supervisar y gestionar la industria de la extracción. Esto se puede lograr a través de la producción cartográfica, la monitorización y el intercambio de información acerca de los recursos de arena existentes, con el fin de mejorar la toma de decisiones de manera transparente y basada en la ciencia.

Extracción de arena en Groenlandia

La decreciente disponibilidad local de arena en las regiones en desarrollo ha impulsado la búsqueda de nuevos depósitos. Tras un estudio de Bendixen *et al.* (2019), se valora la posibilidad de obtener arena de los extensos depósitos de grava, arena y limo hallados en la zona costera de Groenlandia. Anualmente el deshielo de los glaciares groenlandeses aporta grandes cantidades de sedimentos al océano, siendo las costas groenlandesas una reserva potencial para la extracción de agregados. El desarrollo de una industria extractiva en Groenlandia puede generar prosperidad, siempre y cuando se gestione con una estricta legislación que salvaguarde al medio ambiente y a la sociedad de posibles efectos significativos.

Conclusiones

El resultado del estudio bibliográfico llevado a cabo para este trabajo ha permitido hacer un análisis exhaustivo de este recurso y las problemáticas asociadas a esta actividad. La extracción de arena y grava representa el segundo mayor volumen de materia prima utilizado en el planeta, superado únicamente por el agua. En las últimas décadas, el auge de los proyectos de urbanización unido a la revolución digital, han impulsado una extracción sin precedentes y desmesurada de arena en incontables ubicaciones en todo el planeta, lo que supone un impacto devastador en el medio ambiente, la economía y la población humana. Destaca la problemática ambiental surgida de la extracción de arena en cauces fluviales, que provoca un déficit sedimentario que resulta en el retroceso de la costa y la pérdida de ecosistemas costeros, aumentando así la vulnerabilidad de la costa frente a la subida del nivel del mar y a los efectos de fenómenos extremos. Por consiguiente, es imperativo establecer un sistema de monitorización transparente que proporcione datos cuantitativos sobre extracción, localización de zonas, importación, exportación y transporte de arena para facilitar la estimación del alcance de los impactos ambientales, sociales y económicos. Asimismo, es fundamental priorizar la reducción del consumo de arena, mediante la implementación de materiales reciclados y alternativos, y mediante políticas restrictivas que respalden la limitación de megaproyectos y el excesivo crecimiento urbano.

Bibliografía

Anthony, E. J., Brunier, G., Besset, M., Goichot, M. *et al.* 2015. Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities. *Scientific Reports*, 5(1):1-12. doi: 10.1038/srep14745.

- Ashraf, M. A., Maah, M. J., Yusoff, I. B., Wajid, A. *et al.* 2011. Sand mining effects, causes and concerns: A case study from Bestari Jaya, Selangor, Peninsular Malaysia” *Scientific Research and Essays*, 6(6):1216-1231.
- Asociación Internacional de Empresas de Dragado. 2022. *Dredging in figures 2022: An annual review of the global dredging market*. Disponible en: <https://www.iadc-dredging.com/publication/dredging-in-figures-2022/> (Accedido: 12 de enero de 2024).
- Beiser, V. 2017. *Sand mining: the global environmental crisis you’ve probably never heard of*, *The guardian*. Disponible en: <https://www.theguardian.com/cities/2017/feb/27/sand-mining-global-environmental-crisis-never-heard> (Accedido: 4 de enero de 2024).
- Beiser, V. 2019. *The world in a grain: The story of sand and how it transformed civilization*. Nueva York, Estados Unidos de América: Penguin Putnam.
- Bendixen, M., Iversen, L. L., Best, J. L., Franks, D. M. *et al.* 2021. Sand, gravel, and UN sustainable development goals: Conflicts, synergies, and pathways forward. *One Earth*, 4(8):1049-1186. doi: 10.1016/j.oneear.2021.07.008.
- Bendixen, M., Overeem, I., Rosing, M. I. y Bjork, A. A. 2019. Promises and perils of sand exploitation in Greenland. *Nature sustainability*, 2(2):98-104. doi: 10.1038/s41893-018-0218-6.
- Bisht, A. 2021. Conceptualizing sand extractivism: Deconstructing an emerging resource frontier. *The extractive industries and society*, 8(2):100904. doi: 10.1016/j.exis.2021.100904.
- Climate ADAPT. 2023. *Alimentación de playas y costas*. Disponible en: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/es/metadata/adaptation-options/beach-and-shoreface-nourishment> (Accedido: 29 de noviembre de 2023).
- de Leeuw, J., Shankman, D., Wu, G. y de Boer, W. F. 2010. Strategic assessment of the magnitude and impacts of sand mining in Poyang Lake, China. *Regional Environmental Change*, 10(2):95-102. doi: 10.1007/s10113-009-0096-6.
- Erfteimeijer, P. L. A. y Lewis III, R. R. R. 2006. Environmental impacts of dredging on seagrasses: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 52(12):1553-1572. doi: 10.1016/j.marpolbul.2006.09.006.
- España. 1973. Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas, *Boletín Oficial del Estado*, 24 de julio de 1973, (176).
- España. 1988. Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas, *Boletín Oficial del Estado*, 29 de julio de 1988, (181).
- España. 2008. Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. *Boletín Oficial del Estado*, 13 de febrero de 2008, (38).
- España. 2013. Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental”. *Boletín Oficial del Estado*, 11 de diciembre de 2013, (296).

- Fauna & Flora International. 2020. *An Assessment of the Risks and Impacts of Seabed Mining on Marine Ecosystems*. Disponible en: www.fauna-flora.org (Accedido: 13 de diciembre de 2023).
- Fraser, M. W., Short, J., Kendrick, G. A., Mclean, D. L. *et al.* 2017. Effects of dredging on critical ecological processes for marine invertebrates, seagrasses and macroalgae, and the potential for management with environmental windows using Western Australia as a case study. *Ecological Indicators*, 78(3):229-242. doi:10.1016/j.ecolind.2017.03.026
- Ghosh, D. 2012. *Sand Mafia truck Mows Down Cop*, *The Times of India*. Disponible en: http://articles.timesofindia.indiatimes.com/2012-06-12/india/32194116_1_pcr-van-dumper-sand-mafia (Accedido: 11 de diciembre de 2023).
- Kondolf, G. M. 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels, *Environmental Management*, 21(4):551-553. doi: 10.1007/s002679900048.
- Krane, J. 2009. *City of Gold: Dubai and the Dream of Capitalism*. 1ª ed. St. Martin's Publishing Group.
- Observatorio de Complejidad Económica (sin fecha) *Arena, Oec.world*. Disponible en: <https://oec.world/es/profile/hs/sand?yearSelector1=2021&disaggregationValue=valueo> (Accedido: 22 de enero de 2024).
- Peduzzi, P. 2014. Sand, rarer than one thinks. *Environmental Development*, 11:208-218. doi: 10.1016/j.envdev.2014.04.001.
- Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 2022. *Sand and sustainability: 10 Strategic Recommendations to Avert a Crisis*, *UNEP - UN Environment Programme*. Disponible en: <https://www.unep.org/resources/report/sand-and-sustainability-10-strategic-recommendations-avert-crisis> (Accedido: 7 de diciembre de 2023).
- Sanz Moliner, N. 2002. *Impactos territoriales y socio-ambientales del Puerto de Barcelona y de las infraestructuras de acceso*. Tesina. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Torres, A., Brandt, J., Lear, K. y Liu, J. 2017. A looming tragedy of the sand commons. *Science*, 357(6355):970-971. doi: 10.1126/science.aa00503.
- Wentworth, C. K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30:377-392.

Mecanismos moleculares del ejercicio físico en la enfermedad de Alzheimer: revisión sistemática

Marina Redondo Cadenas¹, María José Cuevas² y Brisamar Estébanez³

- ¹ Graduada en Biotecnología (curso 2020-2024) Facultad de C.C. Biológicas y Ambientales. Universidad de León. mredoco2@estudiantes.unileon.es
- ² Instituto de Biomedicina (IBIOMED), Dpto. Ciencias Biomédicas, Universidad de León, 24071, León. mjcueg@unileon.es
- ³ Instituto de Biomedicina (IBIOMED), Dpto. Ciencias Biomédicas, Universidad de León, 24071, León. besteg@unileon.es

Resumen

La enfermedad de Alzheimer (EA), una de las patologías neurodegenerativas más prevalentes a nivel global, se caracteriza por un deterioro progresivo de la memoria y las funciones cognitivas, y carece actualmente de terapias curativas. Esta revisión tuvo como objetivo investigar sistemáticamente la evidencia sobre el impacto de la actividad física en los mecanismos moleculares de la EA y su influencia en el deterioro cognitivo. De los 229 artículos obtenidos en la búsqueda, se incluyeron 8 estudios en base a los criterios de elegibilidad. Los estudios evaluaron diversos protocolos de ejercicio y su efecto en procesos clave, como la acumulación de placas beta-amiloides, la formación de ovillos neurofibrilares, la neuroinflamación, el estrés oxidativo, y las alteraciones sinápticas y mitocondriales. A lo largo de la revisión, se examinaron las interacciones entre estas vías, ofreciendo una visión integral de los mecanismos patológicos subyacentes a la enfermedad y evidenciando que la actividad física ayuda a mitigar dichos procesos. Los resultados de esta revisión ponen de manifiesto el ejercicio como una intervención no farmacológica prometedora para ralentizar el avance de la EA.

Palabras clave

Alzheimer, ejercicio físico, patología tau, placas beta-amiloides

Introducción

El cerebro humano contiene una compleja red neuronal crucial para funciones cognitivas, como la memoria y el lenguaje. En la enfermedad de Alzheimer (EA), una de las enfermedades neurodegenerativas más comunes, se produce un deterioro progresivo de estas funciones, afectando a millones de personas en todo el mundo (Siddappaji y Gopal, 2021). Se estima que para 2050 el número de personas con EA superará los 150 millones (Nichols *et al.*, 2022).

La EA se desarrolla en diferentes estados sintomáticos en los que se observa un deterioro cognitivo y funcional progresivo. Inicialmente, el impacto en la vida diaria es mínimo, manifestándose en pérdidas de la memoria reciente, desorienta-

ción, o cambios de comportamiento y humor. A medida que la enfermedad avanza, el deterioro cognitivo y funcional se intensifica. Las pérdidas de memoria se vuelven más significativas, surgen dificultades en el habla, y se presentan trastornos del sueño y de personalidad, hasta que la persona llega a requerir asistencia constante y alcanza una dependencia total (Jack *et al.*, 2018). A nivel molecular, la EA se caracteriza por la acumulación de placas de péptidos beta-amiloide ($A\beta$) y la formación de ovillos neurofibrilares de proteína tau, lo que desencadena procesos como la neuroinflamación crónica y la pérdida de sinapsis, que agravan la degeneración neuronal (Guo *et al.*, 2020; Siddappaji y Gopal, 2021). Este enfoque permite identificar cuatro estados: 1) estado preclínico, caracterizado por una captación anormal de péptidos $A\beta$, pero sin presencia de tau; 2) demencia leve o temprana, donde tau comienza a acumularse en la región temporal medial; 3) demencia moderada, con una captación media de tau en el neocórtex; 4) demencia grave o tardía con una alta acumulación de tau en el neocórtex (Therriault *et al.*, 2022).

Dado que actualmente no existe un tratamiento curativo para la EA, se ha propuesto el ejercicio físico como una alternativa no farmacológica de gran interés con efectos protectores o beneficiosos en la prevención o progresión de la EA (Hao *et al.*, 2023). Diversos estudios destacan el papel protector del ejercicio físico en la EA, tanto a nivel molecular, disminuyendo la acumulación de péptidos tóxicos y mejorando funciones sinápticas, como en el deterioro cognitivo, mejorando funciones como la memoria y la atención (Jia *et al.*, 2019). Además, el ejercicio reduce síntomas depresivos y de ansiedad, mejora la calidad del sueño y disminuye la agitación, contribuyendo a una mejor calidad de vida para los pacientes y sus cuidadores (Wu *et al.*, 2020).

El objetivo de esta revisión sistemática fue evaluar la evidencia científica disponible sobre los efectos del ejercicio físico en los mecanismos moleculares implicados en la EA, así como en los aspectos cognitivos y conductuales asociados con su progresión.

Material y métodos

Esta revisión sistemática se realizó siguiendo el *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis* (PRISMA). Entre marzo y junio de 2024, se realizó una búsqueda bibliográfica en las bases de datos electrónicas PubMed, Scopus y Web of Science (WOS). La selección de artículos se basó en los siguientes criterios de inclusión: (1) investigaciones en humanos diagnosticados con EA o modelos animales y (2) estudios que evaluaron los diferentes mecanismos moleculares en respuesta al ejercicio agudo y crónico. Los criterios de exclusión utilizados fueron: (1) investigaciones sobre tipos de demencia distintos al alzhéimer, (2) estudios que abordan entrenamientos cognitivos o de memoria, y que no consistan en entrenamientos físicos, (3) estudios que no evaluaran cambios en mecanismos moleculares clave, (4) artículos de revisión, correcciones, libros y otros textos diferentes a estudios clínicos, (5) estudios en un idioma distinto del inglés y (6) estudios publicados hace más de 10 años.

Resultados y discusión

Se identificaron un total de 229 artículos usando las bases de datos Pubmed (47), SCOPUS (107) y WOS (75), tal y como se observa en la **Figura 1**. Tras eliminar los 46 duplicados, se hizo un cribado de los artículos restantes mediante sus títulos y resumen, observando variabilidad en la cantidad de estudios dedicados a los diferentes mecanismos moleculares en relación con el ejercicio. Tras leer los resúmenes, aplicar los criterios de exclusión e inclusión, y hacer una revisión más profunda de los estudios restantes, se seleccionaron los más adecuados para evaluar la relación entre el ejercicio físico y los mecanismos moleculares implicados en la progresión de la EA. Se redujeron a 8 los estudios incluidos en esta revisión, los cuales fueron analizados y sus características se ven sintetizadas en la **Tabla 1**.



Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de selección de estudios, basado en los criterios de inclusión y exclusión.

Características de los estudios

Los estudios analizados utilizaron modelos transgénicos de ratones y ratas con mutaciones en los genes *APP* y *PSEN1* para emular la patología de la EA, como los ratones *APP/PS1* (Zhang *et al.*, 2019; Xia *et al.*, 2019; Hashiguchi *et al.*, 2020) y las ratas *TgF344 AD* (Yang *et al.*, 2022). Otros incluyen ratones *3xTG*, que además de *APP* y *PSEN1*, presentan mutaciones en el gen *MAPT* para la proteína tau (Liu *et al.*, 2020). Tanto en modelos animales como en humanos, los estudios muestran que el ejercicio físico es efectivo en retrasar o mitigar el daño en diversas fases de la enfermedad, aunque en etapas avanzadas es más difícil revertir el deterioro (Khodadadi *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019).

Tabla 1. Características básicas de los estudios seleccionados. Los resultados principales se refieren a los cambios tras intervenciones de ejercicio físico.

Estudio	Modelo de estudio	Intervención	Resultados principales tras intervenciones de ejercicio
Zhang <i>et al.</i> (2019)	Ratones APP/PS1 y WT	Entrenamiento aeróbico. 5 ses./sem. 12 sem.	(↑) IL-10, TGF-β; SOD, Mn-SOD (↓) TNF-α, IL-1β; Placas y péptidos Aβ; Microglía activada; Polarización hacia M2; MDA
Xia <i>et al.</i> (2019)	Ratones APP/PS1 y WT	Entrenamiento aeróbico. 5 ses./sem. 3 meses	(↓) Placas y péptidos Aβ; BACE1 y PSEN1; GRP78, p-PERK/PERK, p-eIF2α/eIF2α, ATF4
Hashiguchi <i>et al.</i> (2020)	Ratones APP/PS1 y WT	Entrenamiento de fuerza. 5 ses./sem. 4 sem.	(↓) IL-1α, IL-6, IL-4; Placas Aβ (=) IL-10
Delgado-Peraza <i>et al.</i> (2023)	Humanos con EA (50-90 años)	Entrenamiento aeróbico. 3 ses./sem. 16 sem.	(↑) proBDNF, BDNF, humanina
Liu <i>et al.</i> (2020)	Ratones 3xTG y WT	Entrenamiento de fuerza. 3 ses./sem. 4 sem.	(↓) TNF-α, IL-1β; Placas Aβ; P-tau, tau total; Activación de microglía (↑) Sinaptotagmina 1, sinaptobrevina 1; PGC1-α; Akt y GSK-3β (=) IL-10, IL-6; PSD95
Yang <i>et al.</i> (2022)	Ratas TgF344 y WT	Entrenamiento aeróbico. 3 ses./sem. 8 meses	(↓) IL-1α, IL-1β, IL-3, IL-6, TNF-α; Placas y péptidos Aβ; P-tau; Microglía activada; Marcadores de daño neuronal, degeneración, y apoptosis; Pérdida Sináptica; ROS, MDA, carbonilos en proteínas, 8 OHdG; Fis1 (↑) Densidad de espinas dendríticas; Mn-SOD; Mfn1
Khodadadi <i>et al.</i> (2018)	Ratas Wistar con inyección Aβ y WT	Entrenamiento aeróbico. 5 ses./sem. 4 sem.	(↓) Aβ42 (↑) IDE y NEP; LRP-1; Actividad de AMPK
Farias <i>et al.</i> (2021)	Mujeres con EA (media 68 años)	Entrenamiento aeróbico. 2 ses./sem. 11 sem.	(↑) IL-4; Sulfhidrilos, nitritos (=) IL-1β, TNF-α, IL-10 (↓) Carbonilos en proteínas, actividad de la catalasa, ROS

Abreviaturas: =, mantenimiento tras la intervención; ↑, aumento; ↓, disminución; P-tau, tau hiperfosforilado; sem., semana; ses., sesión; WT, Wild Type.

Patología amiloide

La acumulación de péptidos Aβ es uno de los primeros indicadores de EA, y es resultado de un desequilibrio entre su producción y eliminación. Como muestra la **Figura 2**, este péptido, que se agrega formando placas amiloides, es generado a partir de la escisión de la proteína precursora de amiloide (APP, del inglés *Amyloid Precursor Protein*) por la acción de las enzimas β y γ secretasa (Chen *et al.*, 2017). Dichas placas afectan la transmisión sináptica y desencadenan respuestas inflamatorias (Kametani y Hasegawa, 2018). La eliminación de Aβ mediante proteasas o a través de la barrera hematoencefálica permite evitar su acumulación (Storck *et al.*, 2016).

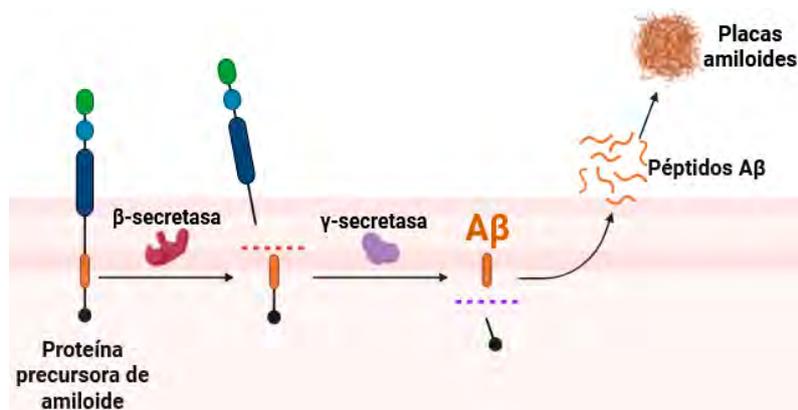


Figura 2. Procesamiento de la APP mediante las secretasas β y γ , que llevan a la patología amiloide. Elaboración propia.

El ejercicio físico reduce las placas de A β en el hipocampo de modelos animales (Khodadadi *et al.*, 2018; Xia *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019; Hashiguchi *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2022), disminuyendo también los niveles alterados de A β 40/42 en el cerebro y plasma (Khodadadi *et al.*, 2018; Xia *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2022). Este efecto protector puede deberse a que el ejercicio restaura los niveles de las enzimas NEP (neprilisina) e IDE (enzima degradadora de insulina) (Khodadadi *et al.*, 2018), y aumenta la expresión de LRP1 (receptor de la apolipoproteína E) en el hipocampo y plasma, facilitando la eliminación de A β . También reduce marcadores de estrés del retículo endoplasmático, disminuyendo así vías que favorecen la actividad de BACE1 (β -secretasa) y PSEN1 (presenilina 1), responsables de la producción de APP (Xia *et al.*, 2019; Nagar *et al.*, 2023).

Patología tau

En la EA la proteína tau, responsable de estabilizar microtúbulos, sufre en hiperfosforilaciones reguladas por quinasas como la GSK-3 β (del inglés, *Glycogen Synthase Kinase 3 beta*). Como muestra la **Figura 3**, esto provoca su disociación de los microtúbulos y la formación de ovillos neurofibrilares, que interrumpen el transporte axonal y el mantenimiento de la estructura celular, agravando la patología (Sinsky *et al.*, 2021). Estos ovillos no solo deterioran la función neuronal, sino que también contribuyen a la neuroinflamación (Maphis *et al.*, 2015).

Los estudios de Xia *et al.* (2019), Liu *et al.* (2020) y Yang *et al.* (2022) mostraron que el ejercicio físico reduce los niveles de tau hiperfosforilado, disminuyendo los ovillos neurofibrilares y ralentizando el avance del alzhéimer. Además, los estudios de Delgado Peraza *et al.* (2023) evidenciaron un aumento de los factores neurotróficos derivados del cerebro BDNF (del inglés, *Brain-derived neurotrophic factor*) y proBDNF, lo que podría estar relacionado con una mejo-

ra en la neuroprotección. El incremento de BDNF puede estar relacionado con la activación de la vía AMPK/PGC-1 α en el hipocampo (Khodadadi *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2020), siendo esta última clave para aumentar la expresión de FNDC5 (Fibronectin type III Domain Containing 5), precursor de la irisina, que a su vez induce la producción de BDNF (Wrann *et al.*, 2013). Además, PGC-1 α (del inglés, *Peroxisome proliferator activated receptor-Gamma Coactivator-1 alpha*) reduce la expresión de BACE1 (Mota y Sastre, 2021) y la irisina puede aumentar la NEP, factores que contribuyen a la eliminación de péptidos A β (Kim *et al.*, 2023). La acumulación de péptidos A β inhibe la vía PI3K/Akt, que lleva a la fosforilación de tau mediante GSK-3 β (Tokutake *et al.*, 2012). Sin embargo, tras el ejercicio, la activación de Akt aumenta, lo que impide la fosforilación excesiva de tau, favoreciendo la reducción de sus agregados y mejorando la cognición (Liu *et al.*, 2020).

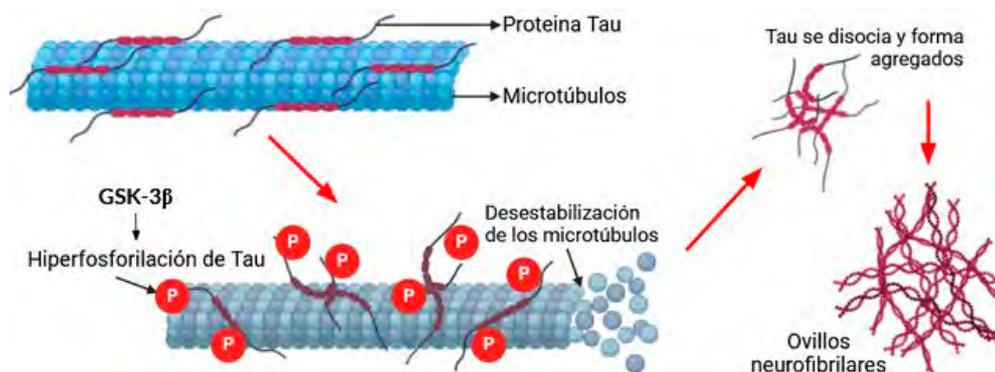


Figura 3. Proceso de hiperfosforilación de la proteína tau y su disociación de los microtúbulos formando ovillos neurofibrilares. Modificada de Siddappaji y Gopal (2021).

Neuroinflamación

Las células microgliales se activan de manera crónica en la EA, pudiendo polarizarse hacia el fenotipo M1 (proinflamatorio) o M2 (antiinflamatorio) (Leng y Edison, 2021; Zhang *et al.*, 2019). Como se ilustra en la **Figura 4**, los receptores TLR (del inglés, *Toll-like receptors*), al reconocer patrones de los agregados de A β , desencadenan la producción de NF- κ B (del inglés, *Nuclear Factor kappa B*), promoviendo una cascada inflamatoria y el predominio del fenotipo M1 (Heneka *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2017). En cambio, el fenotipo M2, inducido por señales antiinflamatorias, favorece la fagocitosis y la eliminación de A β (Zhang *et al.*, 2019).

Los estudios revisados mostraron que el ejercicio físico reduce la activación de la microglía y los astrocitos en la corteza frontal e hipocampo (Liu *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2022). El trabajo de Zhang *et al.*, (2019) reveló que el entrenamiento polariza la microglía hacia el fenotipo M2, reduciendo el M1, lo que sugiere un cambio hacia un estado antiinflamatorio.

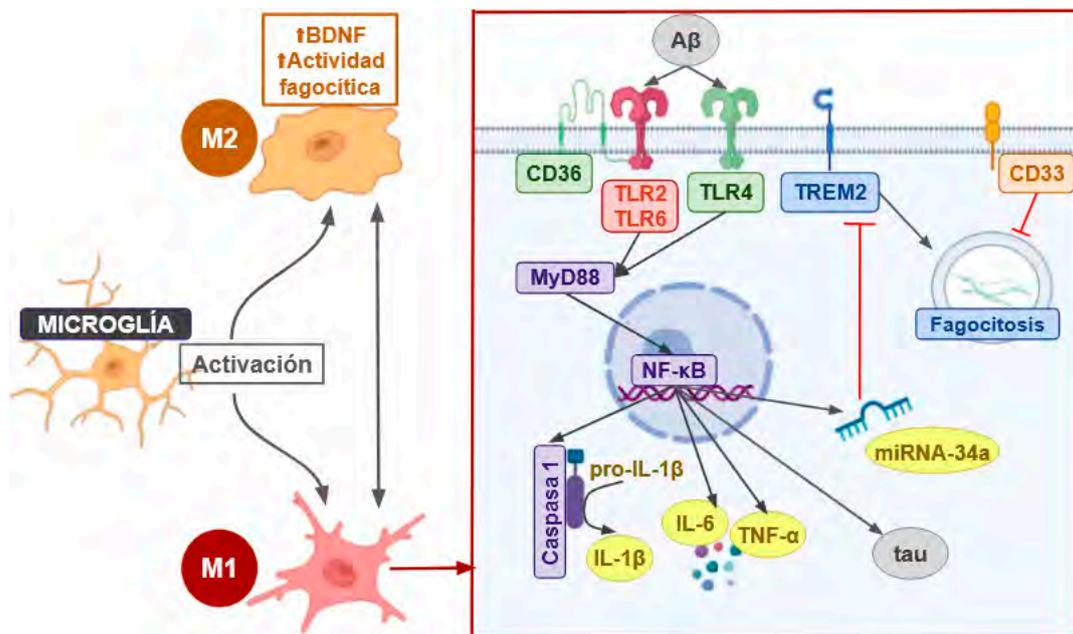


Figura 4. Representación esquemática de la activación de la microglía hacia los fenotipos M1 y M2 en respuesta a señales antiinflamatorias (M2) y proinflamatorias (M1). A la derecha, se observa el proceso mediado por los agregados de A β sobre las células microgliales de tipo M1. Elaboración propia.

En modelos animales con Alzheimer, el ejercicio cambia la morfología microglial, favoreciendo la fagocitosis (Yang *et al.*, 2022). El análisis de citoquinas mostró una disminución de aquellas proinflamatorias (interleucina (IL)-1 α , IL-6, IL-1 β y TNF- α [del inglés, *Tumor Necrosis Factor- alpha*]) y un aumento de las antiinflamatorias (IL-4, IL-10, TGF- β [del inglés, *Transforming Growth Factor-beta*]) tras el ejercicio, apoyando la hipótesis de una transición del fenotipo M1 al M2 y una reducción general de la neuroinflamación (Zhang *et al.*, 2019; Hashiguchi *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020; Farias *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2022).

Estrés oxidativo

Interacciones entre agregados de A β y metales con potencial redox facilitan la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS, del inglés *Reactive Oxygen Species*), superando la capacidad antioxidante y llevando a las células a un estado de estrés oxidativo (Clarke *et al.*, 2015). Este ciclo de estrés oxidativo contribuye a la fosforilación de tau y activa la neuroinflamación, amplificando el daño neurodegenerativo (Huang *et al.*, 2016).

En varios de los estudios evaluados se ha podido observar que el ejercicio redujo significativamente los marcadores de daño oxidativo en proteínas, lípidos y ADN (Farias *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2022). Además, el ejercicio también influyó positivamente en la actividad de enzimas antioxidantes. La enzima superóxido dismutasa (SOD) y su isoforma mitocondrial (Mn-SOD),

mostraron niveles aumentados tras el ejercicio. Así, se apreció tanto una reducción en la producción de ROS, como una potenciación de la capacidad antioxidante (Zhang *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2022).

Alteraciones de la sinapsis

Las acumulaciones de proteínas A β y tau interfieren en la maquinaria sináptica, llevando a disfunciones y pérdidas de sinapsis, al reducirse la densidad dendrítica y la cantidad de conexiones sinápticas (Mijalkov *et al.*, 2021), provocando una disminución de la plasticidad sináptica (Griffiths y Grant, 2023).

El ejercicio físico aumentó la expresión de las proteínas presinápticas sinaptotagmina 1 y sinaptobrevina 1 en las fracciones del sinaptosoma, mejorando la transmisión sináptica y previniendo la degeneración neuronal (Liu *et al.*, 2020). La sinaptotagmina 1 regula la exocitosis y reciclaje de vesículas con neurotransmisores, mientras que la sinaptobrevina 1 facilita su fusión con la membrana presináptica (Li *et al.*, 2017; Haberman *et al.*, 2012). Además, el ejercicio aumentó los niveles de la proteína asociada a los microtúbulos MAP2 (del inglés, *Microtubule-associated protein 2*), manteniendo la densidad de espinas dendríticas, y de la proteína básica de la mielina MBP (del inglés, *Myelin Basic Protein*), que facilita los impulsos nerviosos y sinapsis (Yang *et al.*, 2022).

Alteraciones mitocondriales

La disfunción mitocondrial en la EA afecta la producción de energía celular y aumenta las ROS, agravando el daño neuronal (Yang *et al.*, 2020). Las proteínas que regulan la fisión y fusión mitocondrial, como Fis1 (*Fission 1*) y Mfn1 (*Mitofusin 1*), se ven alteradas, llevando a una fragmentación excesiva (Wang *et al.*, 2009). El transporte mitocondrial, esencial para el suministro de energía en las sinapsis, también se ve afectado, lo que provoca acumulación de mitocondrias disfuncionales en algunas áreas y una escasez de mitocondrias sanas en otras (Sheng y Cai, 2012).

El entrenamiento aumentó los niveles de PGC-1 α , que activa genes implicados en la biogénesis mitocondrial (Liang y Ward, 2006), ayudando a compensar la degradación mitocondrial (Khodadadi *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2020). El ejercicio incrementó también Mfn1, que regula la fusión de la membrana mitocondrial, y disminuyó Fis1, participante en la fisión (Yang *et al.*, 2022). Además, se elevaron los niveles de humanina, un péptido mitocondrial con propiedades neuroprotectoras (Delgado Peraza *et al.*, 2023). La disminución la hiperfosforilación de la proteína tau (Xia *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2022) podría mejorar el transporte axonal al estabilizar los microtúbulos. Asimismo, la disminución de GSK-3 β activo, que libera las cinesinas de los microtúbulos, podría contribuir a este efecto positivo del ejercicio en el transporte axonal (Pigino *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2020).

Cognición

El análisis de los estudios evidenció que la actividad física tiene un impacto positivo en la preservación de la función cognitiva y el aprendizaje en los modelos de la EA (Khodadadi *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019; Hashiguchi *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2022). En estudios con humanos también se demostraron mejoras en la atención y en la coordinación motora, destacando el papel protector del ejercicio en el deterioro cognitivo asociado con el Alzheimer (Farias *et al.*, 2021).

A modo de resumen, la **Figura 5** recoge los principales mecanismos patogénicos asociados a la EA que se ven afectados por el ejercicio físico. El conjunto de estos efectos es capaz de inducir mejoras en la función cognitiva.

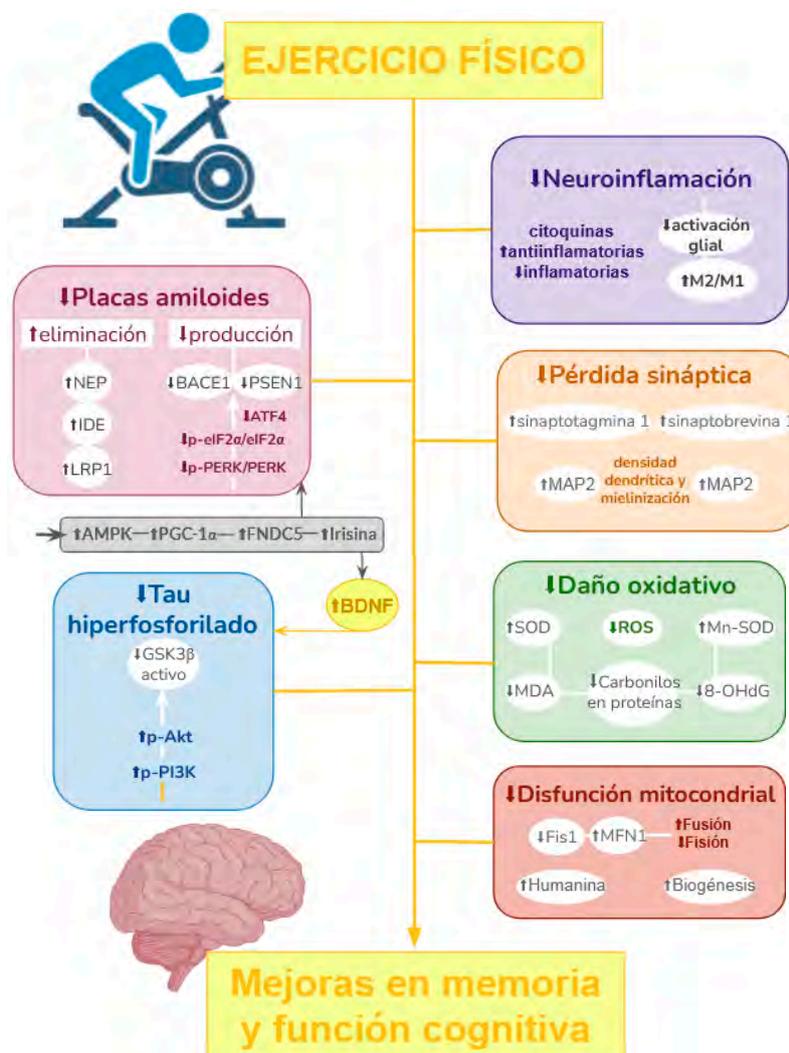


Figura 5. Efectos de ejercicio físico en los componentes de las vías moleculares involucradas en la EA. Elaboración propia.

Conclusiones

Los estudios revisados indican que el ejercicio físico, tanto de fuerza como aeróbico, modula las dos principales características patológicas de la EA: 1) reduce la acumulación de placas amiloides en el hipocampo, promoviendo la eliminación del péptido A β y disminuyendo su producción, y 2) potencia las vías que regulan la fosforilación de la proteína tau, con la consecuente reducción de ovillos neurofibrilares. Asimismo, el entrenamiento físico protege frente al daño neuronal mediante varios mecanismos: 1) la polarización de la microglía hacia un fenotipo antiinflamatorio (M2), reduciendo la liberación de citoquinas proinflamatorias; el aumento de enzimas antioxidantes, y la disminución de marcadores de daño oxidativo; 2) la estimulación de la biogénesis mitocondrial y la recuperación de la dinámica mitocondrial; y 3) la preservación de la morfología neuronal y conexiones sinápticas. Estos hallazgos sugieren que el ejercicio puede ser una intervención no farmacológica eficaz para ralentizar la progresión de la EA. Sin embargo, se necesitan más estudios, especialmente en humanos y con protocolos de ejercicio estandarizados, para identificar las formas de entrenamiento más efectivas en diferentes etapas de la enfermedad.

Referencias

- Brandt, R., Trushina, N. I. y Bakota, L. 2020. Much more than a cytoskeletal protein: physiological and pathological functions of the non-microtubule binding region of tau. *Frontiers in Neurology*, 11:590059.
- Chen, M., Wang, J., Jiang, J., Zheng, X. *et al.* 2017. APP modulates KCC2 expression and function in hippocampal GABAergic inhibition. *eLife*, 6:e20142.
- Clarke, J. R., Lyra e Silva, N. M., Figueiredo, C. P., Frozza, R. L. *et al.* 2015. Alzheimer-associated A β oligomers impact the central nervous system to induce peripheral metabolic deregulation. *EMBO Molecular Medicine*, 7(2):190-210.
- Delgado-Peraza, F., Noguera-Ortiz, C., Simonsen, A. H., Knight, D. D. A. *et al.* 2023. Neuron-derived extracellular vesicles in blood reveal effects of exercise in Alzheimer's disease. *Alzheimer's Research and Therapy*, 15(1):156.
- Farias, J. M. D., Santos Tramontin, N., Pereira, E. V., de Moraes, G. L. *et al.* 2021. Physical exercise training improves judgment and problem-solving and modulates serum biomarkers in patients with Alzheimer's disease. *Molecular Neurobiology*, 58(9):4217-4225.
- Griffiths, J. y Grant, S. G. N. 2023. Synapse pathology in Alzheimer's disease. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, 139:13-23.
- Guo, T., Zhang, D., Zeng, Y., Huang, T. Y. *et al.* 2020. Molecular and cellular mechanisms underlying the pathogenesis of Alzheimer's disease. *Molecular Neurodegeneration*, 15(1):40.

- Haberman, A., Williamson, W. R., Epstein, D., Wang, D. *et al.* 2012. The synaptic vesicle SNARE neuronal synaptobrevin promotes endolysosomal degradation and prevents neurodegeneration. *Journal of Cell Biology*, 196(2):261-276.
- Hao, Z., Liu, K., Zhou, L. y Chen, P. 2023. Precious but convenient means of prevention and treatment: physiological molecular mechanisms of interaction between exercise and motor factors and Alzheimer's disease. *Frontiers in Physiology*, 14:1193031.
- Hashiguchi, D., Campos, H. C., Wuo-Silva, R., Faber, J. *et al.* 2020. Resistance exercise decreases amyloid load and modulates inflammatory responses in the APP/PS1 mouse model for Alzheimer's disease. *Journal of Alzheimer's Disease*, 73(4):1525-1539.
- Heneka, M. T., Kummer, M. P. y Latz, E. 2014. Innate immune activation in neurodegenerative disease. *Nature Reviews Immunology*, 14(7):463-477.
- Huang, W. J., Zhang, X. y Chen, W. W. 2016. Role of oxidative stress in Alzheimer's disease (review). *Biomedical Reports*, 4(5):519-522.
- Jack, C. R., Bennett, D. A., Blennow, K., Carrillo, M. C. *et al.* 2018. NIA-AA Research Framework: Toward a biological definition of Alzheimer's disease. *Alzheimer's and Dementia*, 14(4):535-562.
- Jia, R. X., Liang, J. H., Xu, Y. y Wang, Y. Q. 2019. Effects of physical activity and exercise on the cognitive function of patients with Alzheimer disease: A meta-analysis. *BMC Geriatrics*, 19(1):181.
- Kametani, F. y Hasegawa, M. 2018. Reconsideration of amyloid hypothesis and tau hypothesis in Alzheimer's disease. *Frontiers in Neuroscience*, 12:25.
- Khodadadi, D., Gharakhanlou, R., Naghdi, N., Salimi, M. *et al.* 2018. Treadmill exercise ameliorates spatial learning and memory deficits through improving the clearance of peripheral and central amyloid-beta levels. *Neurochemical Research*, 43(8):1561-1574.
- Kim, E., Kim, H., Jedrychowski, M. P., Bakiasi, G. *et al.* 2023. Irisin reduces amyloid- β by inducing the release of neprilysin from astrocytes following downregulation of ERK-STAT3 signaling. *Neuron*, 111(22): 3619-3633.
- Leng, F. y Edison, P. 2021. Neuroinflammation and microglial activation in Alzheimer disease: where do we go from here? *Nature Reviews Neurology*, 17(3):157-172.
- Liang, H. y Ward, F. W. 2006. PGC-1 α : a key regulator of energy metabolism. *Advances in Physiology Education*, 30(4):145-51.
- Liu, T., Zhang, L., Joo, D. y Sun, S. C. 2017. NF- κ B signaling in inflammation. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 2:17023.
- Liu, Y., Chu, J. M. T., Yan, T., Zhang, Y. *et al.* 2020. Short-term resistance exercise inhibits neuroinflammation and attenuates neuropathological changes in 3xTg Alzheimer's disease mice. *Journal of Neuroinflammation*, 17(1):4.

- Maphis, N., Xu, G., Kokiko-Cochran, O. N., Jiang, S. *et al.* 2015. Reactive microglia drive tau pathology and contribute to the spreading of pathological tau in the brain. *Brain*, 138(6):1738-1755.
- Mijalkov, M., Volpe, G., Fernaud-Espinosa, I., DeFelipe, J. *et al.* 2021. Dendritic spines are lost in clusters in Alzheimer's disease. *Scientific Reports*, 11(1):12350.
- Mota, B. C. y Sastre, M. 2021. The role of pgc1 α in alzheimer's disease and therapeutic interventions. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11):5769.
- Nagar, P., Sharma, P., Dhapola, R., Kumari, S. *et al.* 2023. Endoplasmic reticulum stress in Alzheimer's disease: molecular mechanisms and therapeutic prospects. *Life Sciences*, 330:121983.
- Nichols, E., Steinmetz, J. D., Vollset, S. E., Fukutaki, K. *et al.* 2022. Estimation of the global prevalence of dementia in 2019 and forecasted prevalence in 2050: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet Public Health*, 7(2):e105-e125
- Pigino, G., Morfini, G., Atagi, Y., Deshpande, A. *et al.* 2009. Disruption of fast axonal transport is a pathogenic mechanism for intraneuronal amyloid beta. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(14):5907-5912.
- Sheng, Z. H. y Cai, Q. 2012. Mitochondrial transport in neurons: Impact on synaptic homeostasis and neurodegeneration. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(2):77-93.
- Siddappaji, K. K. y Gopal, S. 2021. Molecular mechanisms in Alzheimer's disease and the impact of physical exercise with advancements in therapeutic approaches. *AIMS Neuroscience*, 8(3):357-389.
- Sinsky, J., Pichlerova, K. y Hanes, J. 2021. Tau protein interaction partners and their roles in Alzheimer's disease and other Tauopathies. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(17): 9207.
- Storck, S. E., Meister, S., Nahrath, J., Meißner, J. N. *et al.* 2016. Endothelial LRP1 transports amyloid- β 1-42 across the blood-brain barrier. *Journal of Clinical Investigation*, 126(1):123-36.
- Therriault, J., Pascoal, T. A., Lussier, F. Z., Tissot, C. *et al.* 2022. Biomarker modeling of Alzheimer's disease using PET-based Braak staging. *Nature Aging*, 2(6):526-535.
- Tokutake, T., Kasuga, K., Yajima, R., Sekine, Y. *et al.* 2012. Hyperphosphorylation of tau induced by naturally secreted amyloid- β at nanomolar concentrations is modulated by insulin-dependent Akt-GSK3 β signaling pathway. *Journal of Biological Chemistry*, 287(42): 35222-35233
- Wang, X., Su, B., Lee, H. G., Li, X. *et al.* 2009. Impaired balance of mitochondrial fission and fusion in Alzheimer's disease. *Journal of Neuroscience*, 29(28): 9090-9103.
- Wrann, C. D., White, J. P., Salogiannis, J., Laznik-Bogoslavski, D. *et al.* 2013. Exercise induces hippocampal BDNF through a PGC-1 α /FNDC5 pathway. *Cell Metabolism*, 18(5):649-659.

- Wu, C., Yang, L., Li, Y., Dong, Y. A. N. *et al.* 2020. Effects of exercise training on anxious-depressive-like behavior in Alzheimer rat. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 52(7):1456-1469
- Xia, J., Li, B., Yin, L., Zhao, N. *et al.* 2019. Treadmill exercise decreases β -amyloid burden in APP/PS1 transgenic mice involving regulation of the unfolded protein response. *Neuroscience Letters*, 703: 125-131
- Yang, L., Wu, C., Li, Y., Dong, Y. *et al.* 2022. Long-term exercise pre-training attenuates Alzheimer's disease-related pathology in a transgenic rat model of Alzheimer's disease. *GeroScience*, 44(3):1457-1477
- Yang, L., Youngblood, H., Wu, C. y Zhang, Q. (2020). Mitochondria as a target for neuroprotection: role of methylene blue and photobiomodulation. *Translational Neurodegeneration*, 44(3):1457-1477.
- Zhang, X., He, Q., Huang, T., Zhao, N. *et al.* 2019. Treadmill exercise decreases A β deposition and counteracts cognitive decline in APP/PS1 mice, possibly via hippocampal microglia modifications. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 11:78.

SIGUIENDO LA PISTA

Bioclimatología de la provincia de Cuenca y su relación con la vegetación potencial

Beatriz López Medina¹, Alejandro González Pérez² y Sara del Río González³

- ¹ Graduada en Biología por la Universidad de León. blopem02@estudiantes.unileon.es
- ² Investigador posdoctoral DGAPA-UNAM Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México. agonzalez@ciga.unam.mx
- ³ Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental (Área de Botánica). Fac. CC. Biológicas y Ambientales. Instituto de Ganadería de Montaña. CSIC-UNILEON. Campus de Vegazana s/n. 24071. León. sriog@unileon.es

Resumen

En este trabajo se realizó la caracterización bioclimática de la provincia de Cuenca hasta el nivel de isobioclima y se establecieron las relaciones con las series de vegetación existentes en dicha área de estudio. Para ello se utilizaron datos de temperatura y precipitación de 26.005 puntos disponibles en formato ráster en la base de datos climáticos CHELSA. A partir de los datos climáticos se calcularon diversos parámetros e índices bioclimáticos siguiendo la propuesta de clasificación bioclimática de Rivas-Martínez y colaboradores. Posteriormente se generó la cartografía bioclimática utilizando el programa ArcGIS Pro. Se identificaron en el área de estudio dos macrobioclimas, cuatro bioclimas, una variante bioclimática, siete termotipos y siete ombrotipos, lo que permitió definir 21 isobioclimas diferentes. Los isobioclimas más frecuentes fueron el Mediterráneo pluviestacional oceánico mesomediterráneo superior seco superior y el Mediterráneo pluviestacional oceánico mesomediterráneo superior seco inferior. La serie de vegetación que puede desarrollarse en mayor número de unidades bioclimáticas es *Quercus rotundifoliae sigmetum*, pudiendo prosperar en ocho isobioclimas.

Palabras clave

Cartografía, isobioclima, series de vegetación.

Introducción y objetivos

La Bioclimatología es la ciencia que estudia la relación entre los seres vivos (unidad biológica) y el clima (unidad física). Los índices que se emplean para delimitar las unidades bioclimáticas están asociados y definidos por las plantas y comunidades vegetales que son usadas como bioindicadores (Rivas-Martínez *et al.*, 2011a).

El sistema de clasificación bioclimática utilizado en este trabajo es el propuesto por Rivas-Martínez y colaboradores, que establece una estrecha relación entre clima, vegetación y geografía. Este sistema está basado en la interacción entre bioclimas, series de vegetación y unidades biogeográficas (Rivas-Martínez *et al.*, 2011a).

En el sistema se reconocen 5 macrobioclimas, que son las unidades de mayor jerarquía en la clasificación: Tropical, Mediterráneo, Templado, Boreal y Polar. Dentro de cada macrobioclima existen bioclimas específicos, en total 27. Se reconocen también 5 variantes bioclimáticas: esteparia, submediterránea, bixérica, antitropical y seropluvial. Los pisos bioclimáticos, que se definen mediante valores térmicos (termotipos) y valores ombrotérmicos (ombrotipos), permiten caracterizar más detalladamente las condiciones bioclimáticas de un área (Rivas-Martínez *et al.*, 2011a).

En la Península Ibérica se reconocen los macrobioclimas Mediterráneo y Templado. El primero de estos es el más extendido en el territorio español, mientras que el Templado se localiza en el norte de la península y en las áreas más elevadas de los Sistemas Central e Ibérico. Los bioclimas más representados en la región son el Mediterráneo pluviestacional oceánico y el Templado oceánico. La delimitación de las unidades bioclimáticas en este sistema se realiza mediante el cálculo de parámetros e índices bioclimáticos (Rivas-Martínez *et al.*, 2011a), como se comentará en la sección de materiales y métodos.

El trabajo se ha realizado en la provincia de Cuenca, localizada entre las latitudes 39° 14' y 40° 39' y longitudes 0° 39' y 2° 32' y presentando una extensión de 1.714.114 hectáreas (Fernández, 2012).

Desde el punto de vista biogeográfico (Rivas-Martínez *et al.*, 2017) en el área de estudio se reconocen, hasta nivel sectorial, las siguientes unidades biogeográficas:

Reino Holártico

Región Mediterránea

Provincia Mediterránea Ibérica Central

Subprovincia Castellana

Sector Celtibérico Alcarreño

Sector Manchego

Subprovincia Oroibérica

Sector Oroibérico Meridional

Los objetivos que se pretenden alcanzar con el desarrollo de este trabajo son los siguientes:

- Realizar la caracterización bioclimática actualizada del área de estudio hasta el nivel de isobioclima.
- Relacionar los isobioclimas obtenidos en el objetivo anterior con las series de vegetación presentes en la provincia.

Materiales y Métodos

Toma de datos climáticos

Para este estudio se utilizó la base de datos mundial CHELSA V 2.1 (Karger *et al.*, 2017), que proporciona datos climáticos detallados y de alta resolución (aproximadamente 1 km²). Se extrajeron datos de precipitación, temperatura mínima, máxima y media mensual de 26.005 puntos distribuidos por la provincia de Cuenca para el periodo comprendido entre 1980 y 2018, utilizando un sistema de información geográfica (SIG). Estos datos se procesaron en Microsoft Excel 365, incluyendo información adicional como la altitud y las coordenadas de latitud y longitud de cada punto. A partir de las variables climáticas se calcularon los principales parámetros e índices bioclimáticos según la clasificación de Rivas-Martínez (Rivas-Martínez *et al.*, 2011a). Finalmente, se realizó la caracterización bioclimática hasta el nivel de isobioclima y se elaboró la correspondiente cartografía bioclimática con ArcGIS Pro 3.1.3. (Esri, 2023; González-Pérez *et al.*, 2023).

Caracterización bioclimática

En este trabajo se desarrolló la caracterización bioclimática del área de estudio hasta el nivel de isobioclima. El isobioclima está definido por todos los factores bioclimáticos jerarquizados de un área y se expresa con una frase que incluye Macrobioclima, Bioclima, Variante Bioclimática (si la hubiere) y Piso Bioclimático (Rivas-Martínez *et al.*, 2017).

Para realizar las diagnósticos bioclimáticos de cada punto se calcularon los siguientes parámetros e índices bioclimáticos: temperatura media mensual (Ti), temperatura máxima (Tmáx), temperatura mínima (Tmin), precipitación mensual (Pi), temperatura media anual (T), temperatura positiva (Tp = Sumatorio de las Ti, siempre y cuando estas sean mayores a 0 °C), precipitación positiva (Pp = Sumatorio de las precipitaciones de cada mes del año (Pi), siempre y cuando sus Ti sean mayores a 0 °C), índice de continentalidad (Ic = Tmáx-Tmin), índice de termicidad (It = [T (temperatura media anual)+M (temperatura media de las máximas del mes más frío)+m (temperatura media de las mínimas del mes más frío)], índice de termicidad compensado (Itc; si 8<Ic<18: Itc=It; si Ic<8 o Ic>18, se debe calcular un factor de corrección o compensación (Ci), calculado según la propuesta de Rivas-Martínez *et al.* (2011a). De tal forma que si Ic<8, Itc=It - Ci,

pero si $I_c > 18$, $I_{tc} = I_t + C_i$), Índice ombrotérmico anual ($I_o = (P_p/T_p) \times 10$) e índice ombrotérmicos estivales ($I_{o_{s1}}$, $I_{o_{s2}}$, $I_{o_{s3}}$ e $I_{o_{s4}}$).

Tabla 1. Bioclimas presentes en los macrobioclimas Mediterráneo y Templado (Rivas-Martínez *et al.*, 2011a).

Bioclimas		Ic	Io
Mediterráneo	Pluviestacional oceánico	≤ 21	> 2.0
	Pluviestacional continental	> 21	> 2.0
	Xérico oceánico	≤ 21	1,0 - 2,0
	Xérico continental	> 21	1,0 - 2,0
	Desértico oceánico	≤ 21	0,2 - 1,0
Templado	Hiperoceánico	≤ 11	$> 3,6$
	Oceánico	11 - 21	$> 3,6$
	Continental	> 21	$> 3,6$
	Xérico	≥ 4.0	$\leq 3,6$

Tabla 2. Termotipos presentes en los macrobioclimas Mediterráneo y Templado (Rivas-Martínez *et al.*, 2011a).

MEDITERRÁNEO			TEMPLADO		
Termotipos	It (I _{tc})	T _p	Termotipos	It (I _{tc})	T _p
Inframediterráneo	580 - 451	>2400	Infratemplado	>410	>2350
Termomediterráneo	450 - 351	2101 - 2400	Termotemplado	290 - 410	>2000
Mesomediterráneo	350 - 221	1501 - 2100	Mesotemplado	190 - 290	>1400
Supramediterráneo	< 220	901 - 1500	Supratemplado	<190	>800
Oromediterráneo		451 - 900	Orotemplado		380 - 800
Crioromediterráneo		1 - 450	Criorotemplado		1 - 380

Cuando $I_{tc} < 120$ o $I_c \geq 21$, el cálculo del termotipo se realiza con los valores de T_p .

La presencia de sequía estival no compensada ($P_i < 2T_i$) en al menos dos meses consecutivos del verano determina la existencia de macrobioclima Mediterráneo. Por el contrario, la ausencia de sequía estival caracteriza al macrobioclima Templado.

El índice de continentalidad (I_c) y el índice ombrotérmico anual (I_o) permiten identificar los bioclimas en cada uno de los macrobioclimas. En la **Tabla**

1 se presentan los bioclimas existentes en los macrobioclimas Templado y Mediterráneo.

Tabla 3. Bioclimas presentes en los macrobioclimas Mediterráneo y Templado (Rivas-Martínez *et al.*, 2011a).

MEDITERRÁNEO		TEMPLADO	
Ombrotipo	Io	Ombrotipos	Io
Ultrahiperárido	< 0,2	Semiárido	< 2,0
Hiperárido	0,2 – 0,4	Seco	2,0 – 3,6
Árido	0,4 – 1,0	Subhúmedo	3,6 – 6,0
Semiárido	1,0 – 2,0	Húmedo	6,0 – 12,0
Seco	2,0 – 3,6	Hiperhúmedo	12,0 – 24,0
Subhúmedo	3,6 – 6,0	Ultrahiperhúmedo	≥ 24,0
Húmedo	6,0 – 12,0		
Hiperhúmedo	12,0 – 24,0		
Ultrahiperhúmedo	≥ 24,0		

De todas las variantes bioclimáticas existentes en la Tierra, en España se reconocen dos: submediterránea y esteparia. La variante submediterránea está presente en el macrobioclima Templado y para que exista tiene que cumplirse que en al menos un mes estival la precipitación (en mm) sea menor a 2,8 veces la temperatura media (en grados centígrados) de ese período estudiado. La variante esteparia, que puede aparecer en los macrobioclimas Mediterráneo y Templado, se caracteriza por la presencia de un índice de continentalidad mayor a 17, un índice ombrotérmico anual entre 0,2 y 6,0; precipitaciones estivales superiores a las invernales y que en al menos un mes de verano la precipitación (en mm) sea inferior que 3 veces la temperatura (en grados centígrados) (Rivas-Martínez *et al.*, 2011a).

La componente térmica del piso bioclimático (termotipo) se determina con el índice de termicidad compensado o la temperatura positiva y para establecer la componente ómbrica del piso bioclimático (ombrotipo) se utiliza el índice ombrotérmico anual (Rivas-Martínez *et al.*, 2011a). En las **Tablas 2 y 3** se muestran los termotipos y ombrotipos que pueden existir en los macrobioclimas Templado y Mediterráneo.

Cartografía bioclimática

Para elaborar la cartografía bioclimática se utilizaron los parámetros e índices bioclimáticos calculados previamente generando archivos ráster con ArcGIS Pro 3.1.3 mediante la técnica geoestadística de interpolación del Kriging Bayesiano Empírico (EBK). Mediante esta técnica se interpolaron los datos discretos en valores continuos con alta resolución (aproximadamente 1 km²). Este método destaca por calcular automáticamente los parámetros a través de subcon-

juntos y simulación, considerando el error en el semivariograma, lo que mejora la precisión de las predicciones, incluso con datos no estacionarios (Ferreiro-Lera *et al.*, 2022; González-Pérez *et al.*, 2022).

Se han realizado los mapas de continentalidad, bioclimas, termotipos, ombrotipos, así como el de isobioclimas.

Relación con la vegetación potencial

Una vez realizada la caracterización bioclimática del área de estudio, se estableció la relación entre las unidades bioclimáticas reconocidas en la provincia (a nivel de isobioclima) y la vegetación potencial descrita hasta el momento en bibliografía. Se define vegetación potencial como la comunidad vegetal estable en un área dada que representa la etapa última de la sucesión progresiva (Rivas-Martínez *et al.*, 2017). Para establecer dichas relaciones se utilizaron las obras de Rivas-Martínez (1987) y Rivas-Martínez *et al.* (2011b).

Resultados y discusión

Caracterización bioclimática

En la **Figura 1** se muestra el mapa de continentalidad. Puede apreciarse que la mayoría de la provincia presenta un nivel semicontinental acusado ($19,0 < Ic < 21,0$). Los valores más elevados (nivel subcontinental atenuado, $21,0 < Ic < 24,0$) se encuentran en una pequeña zona al suroeste de la provincia, dado que es el área que más alejada está de los océanos, mientras que, las zonas con menor continentalidad (nivel semicontinental atenuado, $17,0 < Ic < 19,0$) se localizan al este de la provincia.

Se han reconocido cuatro bioclimas en el área de estudio (**Fig. 2**), siendo los más representados (más del 98 %) los tres que pertenecen al macrobioclima Mediterráneo. El más extendido es el Mediterráneo pluviestacional oceánico, correspondiéndose con valores del índice de continentalidad iguales o inferiores a 21 y un valor de índice ombrotérmico anual superior a 2.

Dentro del macrobioclima Templado se presenta el bioclima Templado oceánico con variante submediterránea, lo que implica que en estas zonas se compensa la sequía estival. Aparece localizado en las zonas más elevadas de la provincia, en altitudes superiores a los 1000 m.s.n.m.

La Figura 3 muestra que más del 71% de la provincia se localiza en el termotipo mesomediterráneo superior ($1500 < Tp < 1800$ o $220 < It [Itc] < 285$). El oromediterráneo inferior ($900 < Tp < 1200$) se reconoce en una pequeña área que supera los 1800 m.s.n.m. al noreste del área objeto de estudio. La mayor diversidad de termotipos se muestra en el bioclima Mediterráneo pluviestacional oceánico, mientras que en el bioclima Mediterráneo xérico oceánico sólo se reconoce el termotipo mesomediterráneo inferior, con temperaturas positivas superiores a 1900. En el macrobioclima Templado, presente sólo en el norte de la provincia, y

en altitudes superiores a los 1100 m.s.n.m., es el supratemplado superior el termotipo más frecuente ($380 < T_p < 590$; $< 0,8\%$).

En lo que a los ombrotipos se refiere (**Fig. 4**), se observa que el tipo más representado es el seco, conformando más del 60 % de la provincia. Se localiza en la mitad sur y este del área de estudio. Los ombrotipos menos frecuentes son el semiárido superior y el húmedo superior.

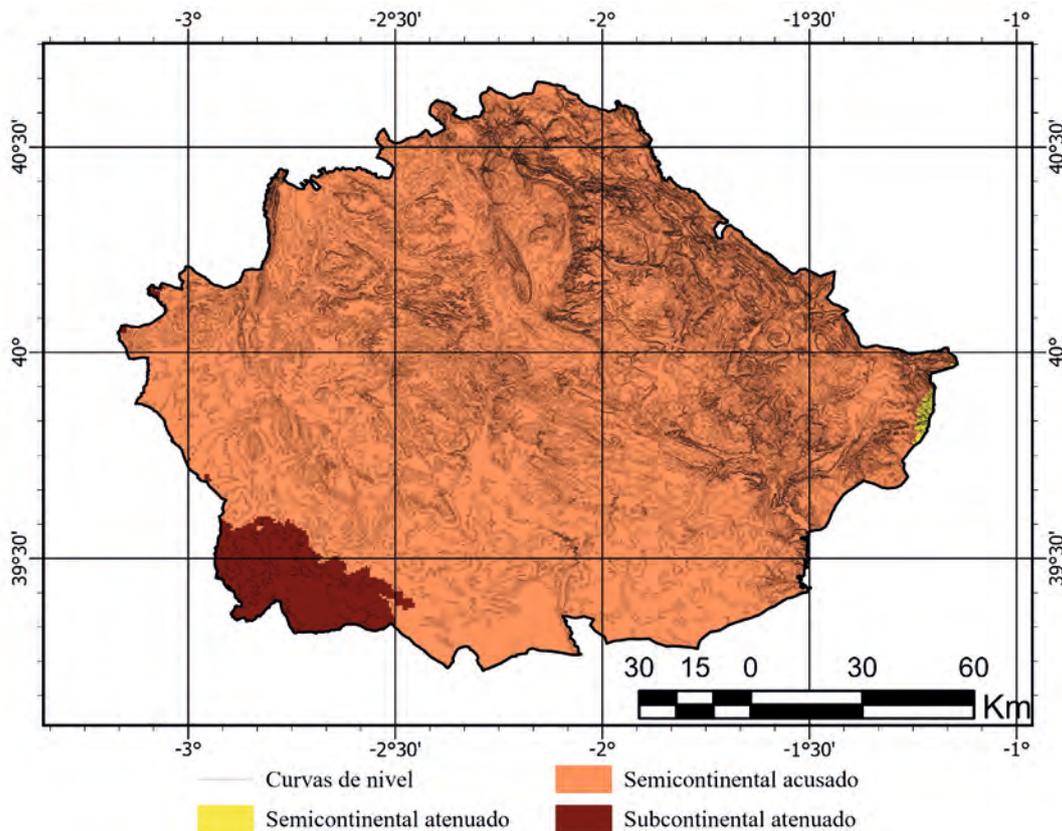


Figura 1. Mapa de la continentalidad de la provincia de Cuenca hasta el rango de nivel.

En las **Figuras 5 y 6** se representan los 21 isobioclimas que se han encontrado en el área de estudio. Los isobioclimas más frecuentes son el Mediterráneo pluviestacional oceánico mesomediterráneo superior seco superior y Mediterráneo pluviestacional oceánico mesomediterráneo superior seco inferior, teniendo una representación en el 59 % del territorio analizado (**Fig. 6**) y estando fundamentalmente localizados en la mitad inferior y oeste de la provincia. Otros isobioclimas como, por ejemplo, el Mediterráneo pluviestacional oceánico mesomediterráneo superior húmedo inferior, Mediterráneo pluviestacional oceánico oromediterráneo inferior húmedo inferior o Templado oceánico submediterráneo supratemplado inferior húmedo superior, tienen una presencia mínima en el área estudiada.

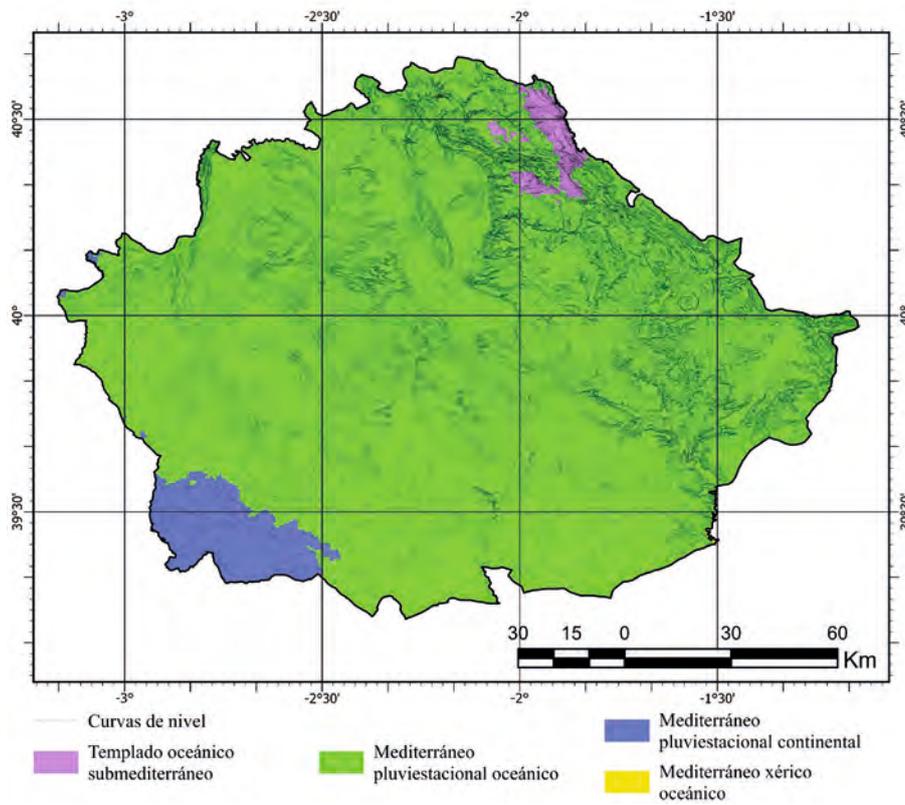


Figura 2. Mapa de bioclimas de la provincia de Cuenca.

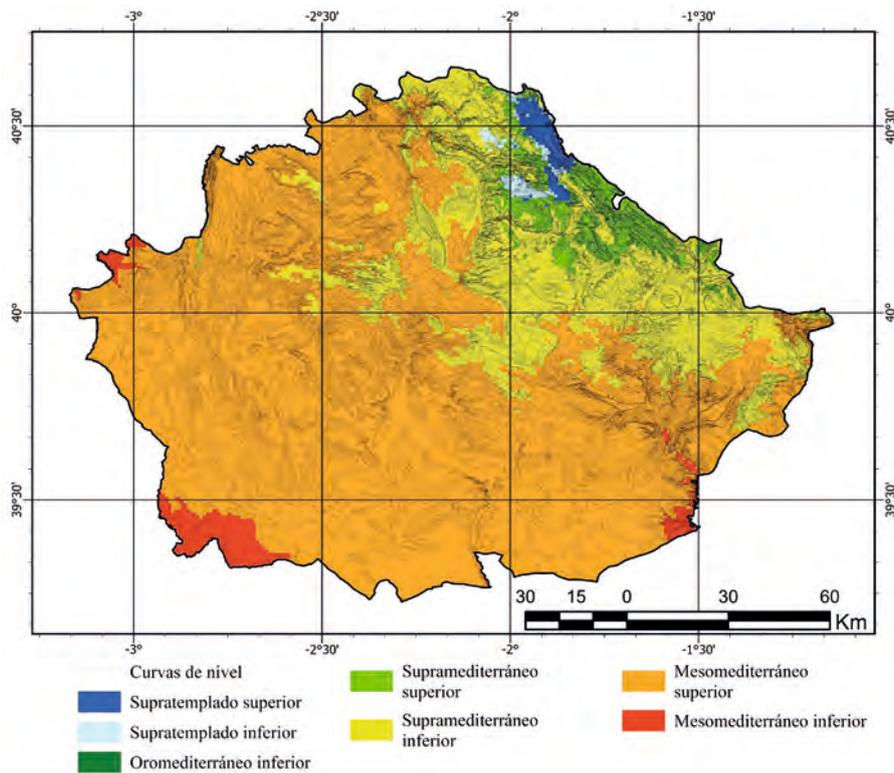


Figura 3. Mapa de los termotipos existentes en la provincia de Cuenca.

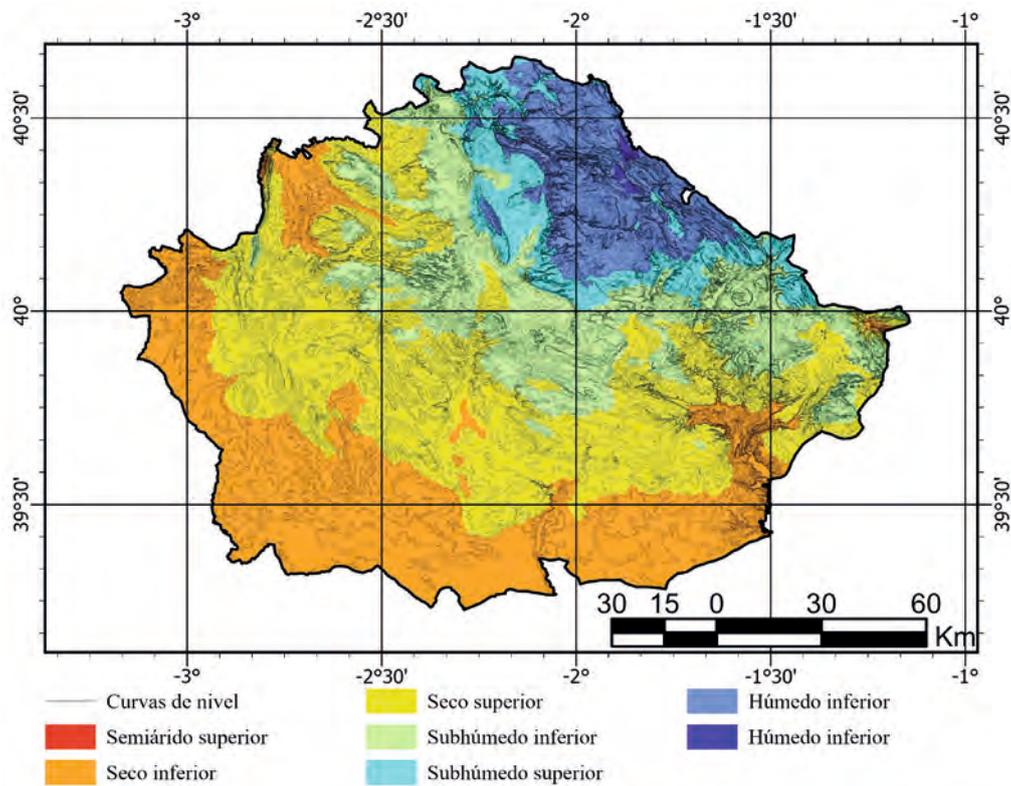


Figura 4. Mapa de los ombrotipos existentes en la provincia de Cuenca.

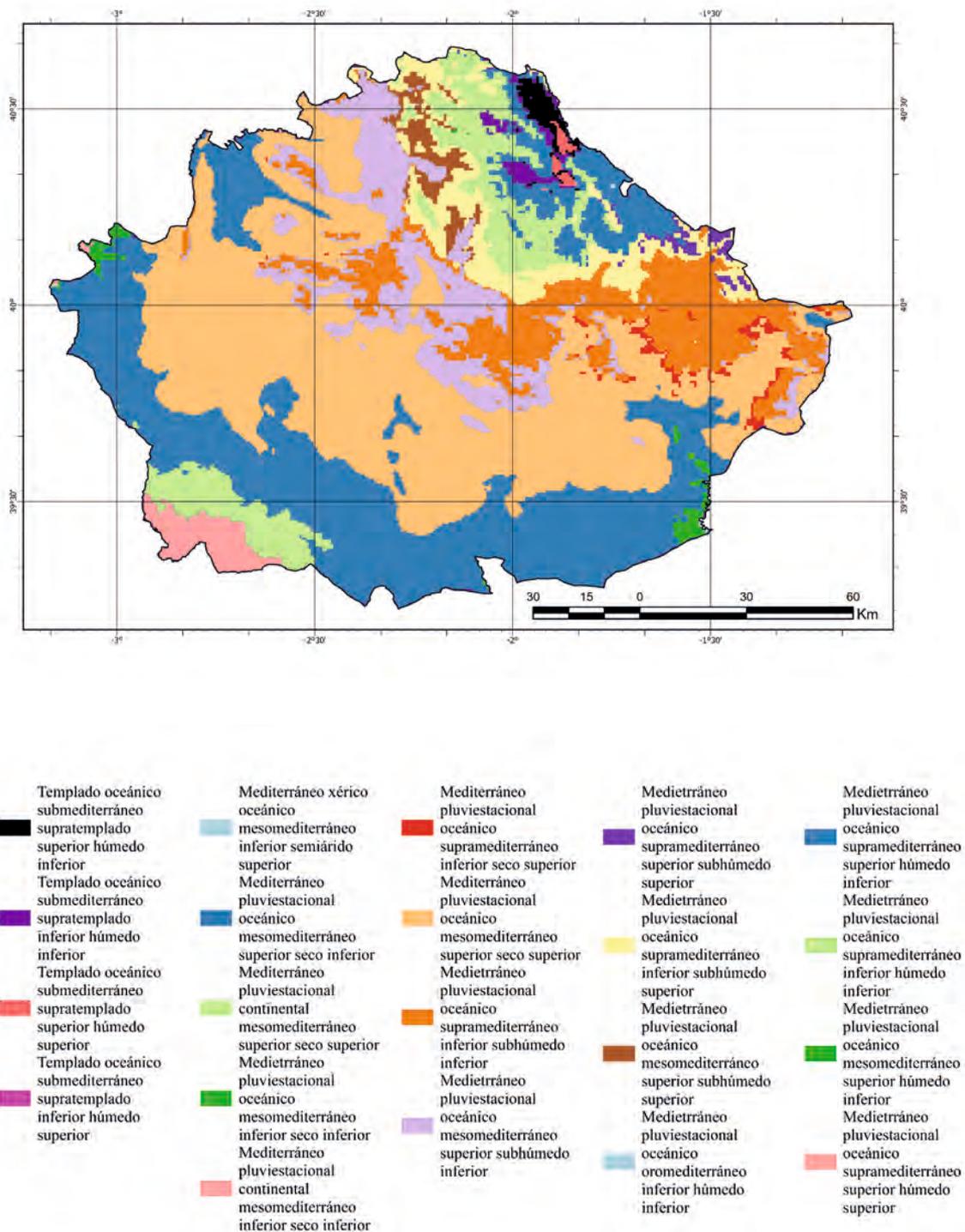


Figura 5. Mapa de los isobioclimas existentes en la provincia de Cuenca.

Relación con la vegetación potencial

Se establece en este apartado la relación entre los isobioclimas comentados en la sección anterior y las series de vegetación existentes en el área de estudio. La autoría de las plantas se basa en la obra Flora iberica (Castroviejo, 1986-2012).

La serie climatofila ibérica maestracense calcícola templada oceánica supra-orotemplada subhúmedo-húmeda submediterránea de los bosques de *Pinus iberica* L. y *Juniperus sabina* L. con *Berberis seroi* L. y *Prunus prostrata* L. (*Junipero sabinae-Pino ibericae sigmetum*), puede prosperar tanto en macrobioclima Templado como Mediterráneo, a diferencia de lo indicado por Rivas-Martínez *et al.* (2011b) que la definen solamente como templada. En el bioclima Templado oceánico submediterráneo puede desarrollarse en el termotipo supratemplado (ambos horizontes) y en el ombrotipo húmedo. En el bioclima Mediterráneo pluviestacional oceánico aparece en el piso oromediterráneo inferior húmedo inferior y en el supramediterráneo superior húmedo inferior. Se completa en este trabajo la definición de la serie indicando que aparece en el nivel de continentalidad semicontinental acusado.

La serie climatofila castellana y oroibérica mediterránea pluviestacional oceánica supramediterránea y submediterránea y templada supratemplada seco-subhúmeda de los bosques de *Juniperus thurifera* L. y *Juniperus hemisphaerica* L. con *Artemisia assoana* Willk. y *Festuca asperifolia* St.-Yves (*Junipero hemisphaerico-thuriferae sigmetum*) puede prosperar en esta provincia en el bioclima Templado oceánico submediterráneo con termotipo supratemplado y en ombrotipo húmedo inferior, a diferencia de lo indicado por Rivas-Martínez *et al.* (2011b) que la consideran de carácter seco-subhúmedo. En el bioclima Mediterráneo pluviestacional oceánico tiene representación en el termotipo supramediterráneo y ombrotipos desde seco superior a húmedo inferior y en el piso mesomediterráneo superior seco superior y subhúmedo inferior. Completamos la definición de esta serie indicando que se desarrolla en el nivel semicontinental acusado.

En el centro de la provincia aparecen los melojares pertenecientes a la serie climatofila guadarrámica celtibérico-alcarreña y oroibérica silicícola mediterránea pluviestacional oceánica supramediterránea subhúmedo-húmeda de los bosques de *Quercus pyrenaica* Willd. y *Luzula forsteri* Lam. & DC. con *Milium vernale* M. Bieb. y *Cistus laurifolius* L. (*Luzulo forsteri-Quercu pyrenaicae sigmetum*). En este estudio la definimos también como de carácter Templado oceánico submediterráneo supratemplado inferior húmedo inferior, ampliando lo descrito por Rivas-Martínez *et al.* (2011b). Completamos la definición de la serie indicando que se desarrolla en niveles de continentalidad semicontinental acusado.

Los quejigares incluidos en la serie climatofila castellana calcícola mediterránea pluviestacional oceánica meso-supramediterránea seco-subhúmeda

de los bosques de *Quercus faginea* Lam. y *Cephalanthera rubra* L. con *Lonicera hispanica* Boiss. & Reut. y *Paeonia humilis* Retz. (*Cephalanthero rubrae-Quercus fagineae sigmetum*) pueden prosperar también en la provincia de Cuenca en el macrobioclima Templado, pero de forma ocasional y ocupando posiciones edafoixerófilas. En el bioclima Mediterráneo pluviestacional oceánico puede desarrollarse en el termotipo supramediterráneo y en ombrotipos que varían desde el seco superior al húmedo inferior. Destacar que Rivas-Martínez *et al.* (2011b) no la caracterizaron como húmeda. Completamos la definición de la serie indicando que prospera en niveles de continentalidad semicontinental acusado.

Existen tres series de encinares en el área de estudio. En el centro de la provincia aparece la serie climatófila y edafoixerófila castellana e ibérica maestracense calcícola mediterránea pluviestacional oceánica supramediterránea seco-subhúmeda de los bosques de *Quercus rotundifolia* Lam. y *Juniperus thurifera* L. con *Rhamnus infectoria* L. y *Satureja gracilis* Willk. (*Junipero thuriferae-Quercus rotundifoliae sigmetum*). La caracterización bioclimática realizada en este estudio para esta serie es coincidente con lo indicado por Rivas-Martínez *et al.* (2011b), si bien, completamos la diagnosis indicando que se desarrolla en niveles de continentalidad semicontinental atenuado y acusado.

Coincidimos con Rivas-Martínez *et al.* (2011b) en la diagnosis bioclimática de la serie climatófila y edafoixerófila guadarrámica castellana septentrional y planileonesa silicícola mediterránea pluviestacional oceánica mesosupramediterránea seco-subhúmeda de los bosques de *Quercus rotundifolia* y *Juniperus lagunae* Pau con *Carex distachya* Desf. y *Lavandula pedunculata* Mill. (*Junipero lagunae-Quercus rotundifoliae sigmetum*). Completamos la definición indicando que se desarrolla en niveles de continentalidad semicontinental acusado.

El encinar más representado en la provincia de Cuenca se incluye en la serie climatófila y edafoixerófila bajoaragonesa riojano-estellesa y bilbilitana calcícola mediterránea pluviestacional oceánica mesomediterránea seco-subhúmeda de los bosques de *Quercus rotundifolia* y *Juniperus phoenicea* L. con *Quercus coccifera* y *Viola oriolii-bolosii* Molero, L.Sáez & L.Villar (*Quercus rotundifoliae sigmetum*). Esta serie tiene representación en el área de estudio en varios isobioclimas. Dentro del macrobioclima Mediterráneo aparece tanto en el bioclima Mediterráneo pluviestacional oceánico, como en el Mediterráneo pluviestacional continental, a diferencia de lo indicado por Rivas-Martínez *et al.* (2011b) que la consideran solo pluviestacional oceánica. Dentro del bioclima Mediterráneo pluviestacional continental se encuentra en el termotipo mesomediterráneo siempre con ombrotipo seco inferior. Y en el Mediterráneo pluviestacional oceánico en los pisos supramediterráneo inferior seco superior, mesomediterráneo superior subhúmedo inferior y seco superior e inferior y mesomediterráneo inferior subhúmedo inferior y seco inferior, matizando a nivel de horizontes bioclimáticos la propuesta de Rivas-Martínez *et al.* (2011b). Completamos la definición de esta serie indicando que se desarrolla en niveles de continentalidad semicontinental acusado y subcontinental atenuado.

Menos representados están los coscojares de la serie climatófila y edafoixerófila mediterránea ibérica centroriental bética y prepirenaica meso-supramediterránea y mesotemplada submediterránea semiárido-subhúmeda de los microbosques y altifruticedas de pinos carrascos, coscojas, sabinas negrales y espinos negros (*Rhamno lycioidis-Quercococciferae sigmetum*). Aparece en el extremo oriental de la provincia, relacionándose con el isobioclima Mediterráneo pluviestacional oceánico mesomediterráneo superior seco. En nuestra área de estudio tiene solamente carácter mediterráneo. Completamos definición de esta serie indicando que se desarrolla en niveles de continentalidad semicontinental acusado y atenuado.

Las series de vegetación edafohigrófilas pueden prosperar en los siguientes isobioclimas: Mediterráneo pluviestacional oceánico supramediterráneo inferior subhúmedo inferior y mesomediterráneo superior seco superior en nivel de continentalidad semicontinental acusado.

Conclusiones

El análisis bioclimático de la provincia de Cuenca y su relación con la vegetación potencial nos permite concluir que:

- Se reconocen en el área de estudio 4 bioclimas: Mediterráneo pluviestacional oceánico, Mediterráneo pluviestacional continental, Mediterráneo xérico y Templado oceánico con la variante bioclimática submediterránea. De todos ellos el más frecuente es el Mediterráneo pluviestacional oceánico.
- Existen en la provincia 7 horizontes termotípicos: oromediterráneo inferior, supramediterráneo superior, supramediterráneo inferior, mesomediterráneo superior, mesomediterráneo inferior, supratemplado superior y supratemplado inferior y 7 horizontes ómbricos: semiárido superior, seco inferior, seco superior, subhúmedo inferior, subhúmedo superior, húmedo inferior y húmedo superior. Los más representados son el mesomediterráneo superior y el seco superior.
- Los niveles de continentalidad varían desde el semicontinental atenuado al subcontinental atenuado, siendo el más frecuente el semicontinental acusado.
- Existen 21 isobioclimas en el área de estudio, siendo los más frecuentes el Mediterráneo pluviestacional oceánico mesomediterráneo superior seco superior (34,04 %), Mediterráneo pluviestacional oceánico mesomediterráneo superior seco inferior (24,84 %), Mediterráneo pluviestacional oceánico supramediterráneo inferior subhúmedo inferior (10,2 %) y Mediterráneo pluviestacional oceánico mesomediterráneo superior subhúmedo inferior (9,2 %).
- La serie de vegetación más frecuente en el territorio analizado es la de los encinares rotundifolios bajoaragoneses riojano-estelleses y bilbi-

litanos *Quercus rotundifoliae sigmetum*. Puede prosperar en un total de 8 isobioclimas, siendo el más frecuente el Mediterráneo pluviestacional oceánico mesomediterráneo superior seco superior.

- Consideramos que los resultados obtenidos en este trabajo podrían ser de utilidad para las instituciones y gestores encargados de elaborar políticas relacionadas con la conservación, gestión y ordenación del territorio.

Referencias bibliográficas

- Castroviejo, S. (coord. gen.). 1986-2012. *Flora Iberica* 1-8, 10-15, 17-18, 21. Real Jardín Botánico, CSIC, Madrid. Madrid, España.
- Esri. 2023. ArcGIS Pro (Versión 3.1.3) [Programa de ordenador]. Redlands, CA: Esri.
- Ferreiro-Lera, G. B., Penas, Á. y del Río, S. 2022. Bioclimatic drought trend study through the application of the ombroseric index. A case study: the province of León (Spain). *Journal of Maps*, 18(2):519-529.
- González-Pérez, A., Álvarez-Esteban, R., Penas, Á. y del Río, S. 2022. Analysis of recent mean temperature trends and relationships with teleconnection patterns in California (U.S.). *Applied Sciences*, 12(10):5831.
- González-Pérez, A., Álvarez-Esteban, R., Penas, Á. y del Río, S. 2023. Bioclimatic characterisation of specific native californian pinales and their future suitability under climate change. *Plants*, 12(10):1966.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P. y Kessler, M. 2017. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4:170122.
- Microsoft Corporation (2023) Excel 365 (Versión 16.0) [Programa de ordenador]. Redmond, WA: Microsoft Corporation.
- Rivas-Martínez, S., Asensi, A., Díez-Garretas, B., Molero, J., Valle, F., Cano, E., Costa, M., Villar, L., Díaz, T.E., Fernández Prieto, J.A., Llorens, L., del Arco, M., Fernández-González, F., Sánchez-Mata, D., Penas, Á., Herrero, L., del Río, S., Masalles, R., Ladero, M., Amor, Á., Izco, J., Amigo, J., Loidi, J., Navarro, G., Cantó, P., Alcáraz, F., Bascónes, J.C. y Soriano, P. 2011b. Mapa de series, geoseries y geopermaseries de vegetación de España [Memoria del mapa de vegetación potencial de España] Parte II. *Itinera Geobotanica*, 18(1):5-800.
- Rivas-Martínez, S., Gutiérrez, G., Andrade, J. M. A., Montero, J. L. y González Rebollar, B. J. L. 1987. Memoria del mapa de series de vegetación de España 1ª ed. Madrid: ICONA. Madrid, España.
- Rivas-Martínez, S., Penas, Á., Díaz-González, T.E., Cantó, P., del Río, S., Costa, J.C., Herrero, L. y Molero, J. 2017. Biogeographic units of the Iberian Peninsula and Balearic Islands to district level. A concise synopsis. In: Loidi J. et al. The Vegetation of the Iberian Peninsula. *Plant and Vegetation*, 12: 131-188.

Rivas-Martínez, S., Rivas-Sáenz, S. y Penas, Á. 2011a. Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, 1:1-638 + 4 maps.

<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/what-is-ebk-regression-prediction-.htm> (acceso: 16/05/2024).

Tras los rastros del lobo ibérico: dieta y marcaje territorial de la especie en león

María Mallo Robla¹

¹ Graduada en Biología. Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales. Universidad de León. Email: mmallr00@estudiantes.unileon.es

Resumen

Este trabajo analiza la dieta del lobo ibérico en los alrededores de la ciudad de León (Castilla y León, España), cuantificando el consumo de presas silvestres y animales domésticos por parte de la especie. Se busca describir la importancia de cada presa, comparar los datos con los del año anterior para la misma zona de estudio y comprender los componentes temporales y espaciales del marcaje territorial del lobo. El estudio se realizó en zonas humanizadas cercanas a León mediante cuatro recorridos de muestreo. Un equipo de siete personas recolectó excrementos de lobo cada 15 días entre noviembre de 2023 y abril de 2024. Se siguió un protocolo estandarizado, que incluía la identificación preliminar de pelos en el excremento, fotografías georreferenciadas y recolección parcial de los excrementos para la posterior identificación de las presas presentes en los mismos. Los resultados más relevantes en relación con la dieta apuntan al consumo preferente de jabalíes y corzos, con una presencia pequeña de animales domésticos. Por otro lado, los patrones de marcaje territorial mostraron variaciones estacionales y espaciales, con una tendencia a utilizar los cruces de caminos como puntos estratégicos para la deposición de excrementos. Se resalta además la importancia de comprender el comportamiento territorial y la ecología trófica del lobo en un ambiente humanizado, como información básica para la gestión de la especie.

Palabras clave

cruces de caminos, ecología trófica, lobo ibérico, marcaje territorial, ungulados silvestres

Introducción

Los grandes carnívoros, especies como lobos (*Canis lupus*), osos (*Ursus* spp.) y los grandes felinos (*Panthera* spp.), desempeñan una función importante en los ecosistemas al regular el tamaño de población tanto de sus presas directas, a través de la depredación, como de otros carnívoros de menor tamaño (Ray, 2015; Shrotriya *et al.*, 2022). El lobo gris (*Canis lupus*) es el gran carnívoro más ampliamente distribuido en el mundo y uno de los depredadores apicales (situa-

do en la parte superior de las cadenas tróficas) más importantes debido a su función estabilizadora y sanitaria en el ecosistema (Ripple *et al.*, 2014; Torres *et al.*, 2015; Tanner *et al.*, 2019; Ordiz *et al.*, 2020).

Como otros grandes carnívoros, el lobo es una especie elusiva y difícil de estudiar en libertad, por lo que una de las aproximaciones más habituales consiste en su seguimiento a través de la recogida y análisis de sus excrementos (Torres *et al.*, 2015). El conteo de indicios de presencia de la especie, tales como excrementos, huellas, rascaduras, etc., permite obtener información sobre su ecología trófica (Barja, 2009), además de ser un método indirecto de estimar su abundancia (Ordiz y Llana, 2010).

Esta metodología es posible debido a que los lobos son el clásico ejemplo de carnívoros territoriales. El “territorialismo” se produce cuando un animal defiende una parte de su “home range” o área de campeo, es decir el espacio que utilizan a lo largo del año para alimentarse, reproducirse y criar a sus cachorros (Harrington y Asa, 2003). Este comportamiento de marcaje consiste en la delimitación de su territorio mediante diferentes marcas visuales como los excrementos, la orina y las secreciones glandulares. Uno de los patrones más comunes observados en carnívoros es la deposición de heces en sustratos elevados (Barja *et al.*, 2005) y en cruces de caminos (Barja *et al.*, 2004), probablemente para maximizar su detección por otros individuos.

Los grandes carnívoros, incluido el lobo, tienen requerimientos espaciales elevados (Ordiz *et al.*, 2011) por lo que el aumento de la población humana y la expansión de sus actividades ha llevado a la invasión de zonas antaño salvajes, exacerbando así los conflictos con la vida silvestre y especialmente con los grandes carnívoros (Nyhus, 2016). A su vez, son numerosos los estudios que describen la adaptación de los lobos en paisajes humanizados, donde son capaces de sobrevivir probablemente gracias a una alta plasticidad ecológica y de comportamiento (Kuijper *et al.*, 2016, 2024; Zanni *et al.*, 2023). No obstante, tienden a evitar a los humanos y sus actividades (Ordiz *et al.*, 2011; Vicedo *et al.*, 2023). Los lobos explotan este tipo de ambientes a pesar del riesgo de mortalidad, siempre y cuando el entorno sea favorable desde una perspectiva alimenticia (Muhly *et al.*, 2019; Zanni *et al.*, 2023)

Los lobos son considerados depredadores generalistas-oportunistas (Becker *et al.*, 2008) ya que consumen cualquier presa vulnerable disponible en su territorio. Tienden a seleccionar las presas más abundantes (selección apostática, Yearsley, 2003), pero esta pauta se ve influenciada por los cambios en la disponibilidad de las mismas (Mattioli *et al.*, 2011; Guimarães *et al.*, 2022). A pesar de que el lobo en Europa consume preferentemente ungulados silvestres, también consume pequeños mamíferos, peces, aves y plantas (Newsome *et al.*, 2016), e incluso recursos antropogénicos, como la basura (Meriggi y Lovari, 1996; Nores *et al.*, 2008) y el ganado (Ciucci y Boitani, 1998; Torres *et al.*, 2015). La

depredación del ganado constituye precisamente una de las principales fuentes de conflicto con las actividades humanas (Torres *et al.*, 2015).

A pesar de la persecución humana y como consecuencia la rarefacción de sus poblaciones, los lobos han recolonizado en las últimas décadas parte de su distribución histórica, tanto en Norteamérica como en Europa, y actualmente son uno de los grandes carnívoros con mayor rango de presencia (Kaczensky *et al.*, 2012; Cimatti *et al.*, 2021).

Por el contrario, las poblaciones de lobo ibérico (*Canis lupus signatus*) compartidas entre España y Portugal no han experimentado esta misma tendencia reciente. A mediados del siglo XIX estaban ampliamente distribuidos por la Península Ibérica (Clavero *et al.*, 2023) pero al igual que en el panorama europeo, la persecución humana provocó un gran declive en la primera mitad del siglo XX, alcanzando su mínimo poblacional hacia 1970 (Chapron *et al.*, 2014). Desde su nadir y probablemente con el inicio de su protección legal, se favoreció la recuperación parcial de la población (Blanco *et al.*, 1992). A pesar de lo cual, el número de manadas no ha variado mucho desde el primer censo realizado entre 1986-1988 y se estima que actualmente es de aproximadamente 300 grupos reproductores (Torres y Fonseca, 2016; Salado *et al.*, 2024), por lo que el ritmo de recuperación inicial se ha estancado en comparación con otras poblaciones europeas (Quevedo *et al.*, 2019; Ordiz *et al.*, 2022). La reciente incorporación en 2021 de todas las poblaciones de lobo en el Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial (LESPRE) ha supuesto la homogeneización de su situación legal, ya que anteriormente era una especie susceptible de gestión cinegética al norte del río Duero (Ordiz *et al.*, 2022). El lobo es una especie cuya gestión genera mucho interés y el estudio de su dieta es muy relevante, especialmente en un territorio como León (Castilla y León, España) donde se encuentran aproximadamente 54 de las 179 manadas presentes a nivel autonómico (MAGRAMA, 2016).

A partir del análisis de los excrementos de lobo es posible obtener información detallada sobre su dieta e identificar posibles conflictos con actividades humanas, como la depredación de ganado, ayudando así a desarrollar estrategias de manejo más efectivas para la conservación del lobo. Con el doble objetivo de conocer mejor el uso de recursos alimenticios y examinar el comportamiento de marcaje del lobo en paisajes humanizados, se realiza este estudio en áreas cercanas a la ciudad de León.

Objetivos

Este trabajo tiene como objetivos analizar la dieta del lobo ibérico en los alrededores de la ciudad de León, cuantificando el consumo de presas silvestres y animales domésticos. Además, se busca comparar los resultados con los datos del año anterior para identificar posibles cambios. Otro objetivo es estudiar la variación estacional y espacial en los patrones de marcaje durante ambos años, utilizando el índice kilométrico de abundancia (IKA). Finalmente, se evaluará si

existe una selección específica en la ubicación de los excrementos, en contraste con la posibilidad de que este proceso sea aleatorio.

Material y Métodos

Área de estudio

El trabajo de campo se realizó en los alrededores de la ciudad de León. Inicialmente se plantearon 6 recorridos de muestreo, coincidiendo con las rutas realizadas el año anterior. No obstante, dichos recorridos se redujeron finalmente a 4 debido a que dos de las zonas habían sufrido distintas perturbaciones y no se encontraba la cantidad esperada de indicios de la especie, o incluso no se constató su presencia. Todos los recorridos se efectuaron por caminos y pistas forestales pertenecientes a las siguientes zonas: Carrizo de la Ribera – Rioseco de Tapia (nombrados a lo largo del texto como Azadón y Espinosa); Pinares de Camposagrado y Rabizo; Castrillino y Garfín.

Recolección de muestras

Se analizaron excrementos recogidos por un equipo de 7 personas entre noviembre de 2023 y abril de 2024. Los recorridos de muestreo se realizaron a pie cada 15 días, debido a que este tipo de marcaje olfativo parece servir como método duradero (2-3 semanas) para señalar la presencia de un grupo reproductor (Harrington y Asa, 2003). En las primeras ocasiones, se descartaron excrementos antiguos para evitar sesgar los datos y obtener valores inflados en el índice kilométrico de abundancia (IKA; Ordiz y Llana, 2010). La identificación de los excrementos de lobo en campo se basó en su tamaño, forma, contenido, olor y posición, aunque las muestras dudosas fueron clasificadas como “cánido” por la posibilidad de que pertenecieran a perros.

El protocolo consistió en: (1) análisis preliminar del excremento, (2) etiquetado con número de muestra, fecha y ruta, (3) fotografía georreferenciada con la app “Timestamp Camera”, (4) registro en la ficha de campo, y (5) recolección de dos tercios del excremento. Como los lobos marcan su territorio con excrementos, la recolección total podría interferir en esta función, especialmente en cruces de caminos u otros puntos clave (Barja *et al.*, 2004). Para minimizar esta perturbación, se dejaron restos de los excrementos en el mismo lugar, esparciéndolos para evitar dobles conteos en futuros muestreos.

Procesamiento de las muestras en laboratorio

Se extrajeron con pinzas un promedio de 5-10 pelos de cada muestra que se sumergieron en una solución de agua jabonosa durante 3 minutos y se dejaron secar en papel de filtro durante 5 minutos para eliminar los restos de materia orgánica. La identificación de especies se realizó, siempre que fue posible, macroscópicamente con lupas binoculares y claves dicotómicas (Barja *et al.*, 2020). La pos-

terior comparativa con pieles disecadas de la colección del área de Zoología de la Universidad de León permitió corroborar el análisis preliminar. No obstante, con aquellas muestras más problemáticas se empleó la determinación microscópica de los patrones cuticulares (Barja *et al.*, 2020). Las preparaciones se realizaron aplicando una capa fina de laca sobre un portaobjetos para a continuación disponer al menos 5 de los pelos extraídos de la muestra. Tras 15 minutos se retiraron los pelos y se analizaron las improntas cuticulares mediante un microscopio óptico, comparándolas con las presentes en el texto de referencia (Barja *et al.*, 2020).

Análisis de datos

La composición de la dieta fue expresada en términos de frecuencia de ocurrencia (FO), es decir, se calculó el porcentaje de aparición de cada presa en las muestras fecales. Se analizaron los datos de los periodos 2022-23 (N=188) y 2023-24 (N=197). Las especies consumidas se agruparon en cuatro categorías principales: ungulados silvestres, ungulados domésticos, otras especies e indeterminados.

Para evaluar si se habían producido cambios en la proporción de especies consumidas durante los dos periodos de estudio se compararon las frecuencias de ocurrencia calculadas para las especies más abundantes en función del mes, recorrido y año. Como la variable porcentaje no seguía una distribución normal (Shapiro-Wilk normality test, $W = 0,88822$, $p\text{-value} < 0,0001$), se optó por un modelo lineal generalizado.

Asimismo, se analizaron también diferencias en la distribución de indicios a lo largo de diferentes recorridos y estaciones, transformando los datos en índices kilométricos de abundancia (IKA) para homogeneizar el esfuerzo de muestreo. La comparación incluyó solo recorridos y meses comunes a ambos años. Se optó de nuevo por un modelo lineal generalizado dado que la variable respuesta (IKA) no se ajustó a una distribución normal (Shapiro-Wilk normality test $W = 0,90724$, $p\text{-value} < 0,0002$)

Otro de los componentes del marcaje que se estudió fue la posible preferencia de los lobos por depositar sus excrementos en cruces de caminos, para ello se utilizaron una serie de modelos lineales generalizados con diferentes combinaciones de variables biológicamente plausibles. Se definió como cruce el área resultante de la intersección de dos o más caminos, para lo que se consideró un área de influencia de en torno a 40 m de radio.

En todos los casos se incluyeron varios modelos alternativos para intentar explicar la variación de cada variable respuesta con diferentes combinaciones de variables predictoras. La selección de los mejores modelos se llevó a cabo utilizando el criterio de información de Akaike (AIC) y Delta AIC (ΔAIC) para comparar modelos anidados (Akaike, 1974). Los modelos con una diferencia de AIC menor o igual a 2 se consideraron equivalentes. Para interpretar los efectos de las variables predictoras sobre la variable respuesta se utilizaron la magnitud del efecto (β) y los intervalos de confianza al 95 % (Du Prel *et al.*, 2009).

El análisis de datos y las gráficas se elaboraron usando RCommander (Fox, 2024) y RStudio (R Core Team, 2024).

Resultados

Análisis de la dieta: Frecuencia de ocurrencia y biomasa ingerida

El consumo de presas silvestres (sobre todo, jabalí y corzo) es mayoritario en todos los recorridos independientemente del año de estudio. El jabalí es el animal con mayor representación en las muestras recogidas, con una frecuencia de ocurrencia media del 43,33 % en 2023 y del 56,19 % en 2024. Además, es la presa más consumida en todos los recorridos, a excepción de Rabizo en 2023 (FO=25 %). El corzo es la segunda especie más consumida, con porcentajes medios del 22,24 % en 2023 y de 26,75 % en 2024.

La evaluación del cambio en la proporción de especies consumidas se llevó a cabo mediante modelos lineales generalizados, escogiendo aquel con menor valor de AIC (df= 55; R²=0,20; AIC=560,13), que solo tiene en cuenta variable Año. Los resultados resaltan que el periodo de estudio 2024 afectó positivamente a la FO de jabalí en comparación con los datos de 2023. En ninguno de los casos los intervalos de confianza incluyen el cero, por lo que el efecto de la variable es concluyente **Tabla 1**.

Tabla 1. Tamaño del efecto (β) y del error estándar (SE) de las variables independientes sobre la variable respuesta FO % de jabalí, obtenidas a partir del modelo lineal generalizado con menor valor de AIC. Se especifican los intervalos de confianza para los coeficientes individuales con un nivel de confianza del 95 % (95 % CI).

Variabes	β	SE	95 % CI
Intercept	30,068	6,121	[18,069; 42,057]
2024	32,077	8,438	[15,552; 48,602]

La proporción de ungulados domésticos fue mucho menor que la de presas silvestres. Durante el periodo de muestreo 2023-2024 (**Figura 2**), el porcentaje de excrementos con pelos de caballo fue de un 4,06 %, y dada la dificultad para identificar pelos de animales domésticos se incluye en dicho porcentaje la proporción de pelos clasificada como “indeterminada”, con el fin de considerar el posible error derivado de la casuística anterior. No obstante, esta proporción es mayor en los datos recogidos durante 2022-2023 (**Figura 1**) elevándose hasta un 17,84 % si se considera como porción doméstica la categoría de “indeterminada”, o bien del 11,89 % si se excluyen estos últimos. Además, en 2022-2023 se encontraron algunos pelos de oveja, vaca y caballo, mientras que en 2023-2024 sólo se hallaron crines de caballo (n= 3 excrementos del total).

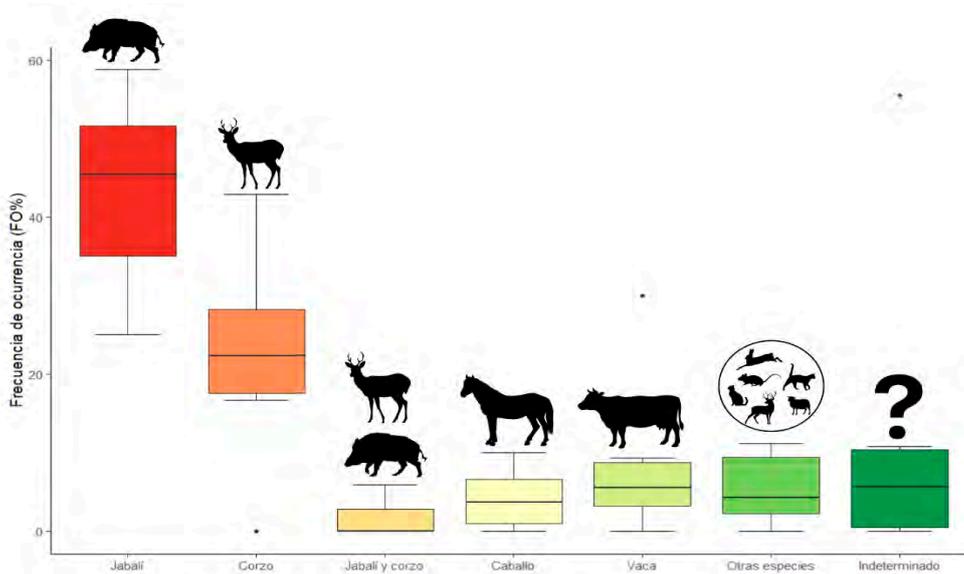


Figura 1. Porcentaje de la frecuencia de ocurrencia total para cada especie identificada en excrementos de lobo correspondientes al periodo 2022-23. La caja representa el rango intercuartílico (IQR) que abarca del primer cuartil (Q1) al tercer cuartil (Q3). La línea dentro de la caja (Q2) es la mediana de las frecuencias de todos los recorridos. Los puntos representan valores atípicos. **Nota:** En la categoría de “Otras especies” se incluyen: liebre (0,015 %), gato montés (0,010 %), oveja (0,005 %), ciervo (0,005 %), ratón (0,005 %) y gato doméstico (0,005 %).

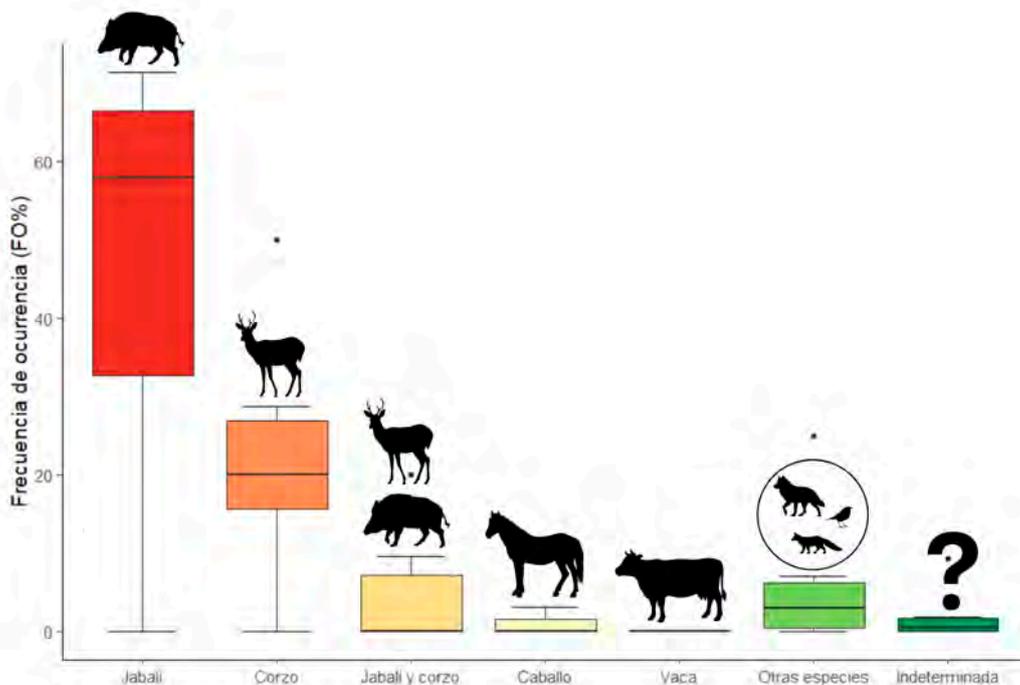


Figura 2. Porcentaje de la frecuencia de ocurrencia total para cada especie identificada en excrementos de lobo correspondientes al periodo 2023-24. **Nota:** En la categoría de

“Otras especies” se incluyen: zorro (0,015 %), paseriforme (0,010 %) y lobo (0,005 %).

Variación estacional de los patrones de marcaje

El análisis de los índices kilométricos de abundancia (IKAs) para ambos años permitió determinar diferencias entre las zonas de muestreo y las quincenas (df= 9; R²=0,379; AIC=60,229) (**Figura 3**).

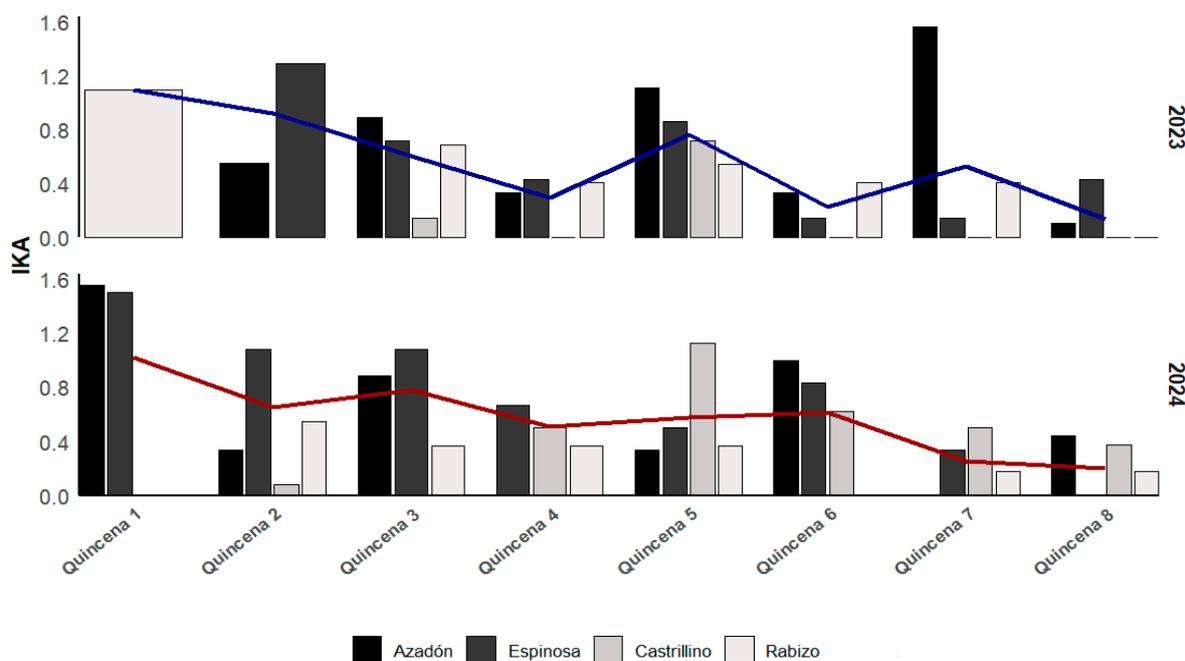


Figura 3. Valores del índice kilométrico de abundancia (IKA) para las diferentes quincenas en función del recorrido de muestreo. Se muestran los datos recabados durante 2023 y los de 2024. Las líneas de tendencia (azul y rojo) son la media conjunta de los IKAs del total de recorridos para cada quincena, se obtienen con el objetivo de facilitar la interpretación.

Los recorridos de Azadón y Espinosa, son los que acumulan más indicios, en detrimento de Rabizo y Castrillino donde el IKA fue menor. El intervalo de confianza del 95 % alrededor de los tamaños del efecto (β) de estas covariables no incluyó el 0 ([-0,517; -0,090] y [-0,527; -0,082]), es decir, el signo de su efecto sobre el IKA fue claro. Con el paso del tiempo, el IKA fue disminuyendo, especialmente a partir de principios de abril (quincena 7). No obstante, los intervalos de confianza del 95 % de la quincena 2 y de la 5 incluyeron el valor 0 ([-0,690; 0,163] y [-0,555; 0,229]), es decir, el efecto fue menos concluyente en ese periodo.

Selección específica de la ubicación de los excrementos

Se encontraron más excrementos en cruces de caminos que lejos de éstos (**Figura 4**).

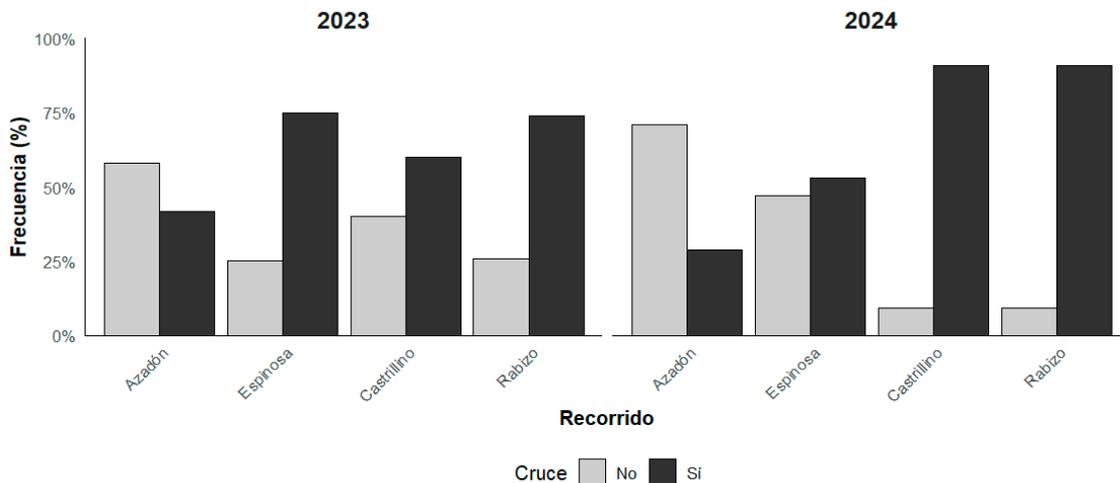


Figura 4. El análisis preliminar de los datos detectó un porcentaje bastante similar de excrementos de lobo localizados en cruces en 2023 (60 %) y 2024 (54,5 %) y fuera de ellos (40 % y 45,5 %, respectivamente). A excepción de Azadón, el porcentaje de excrementos en cruces es mayor que fuera de ellos en todos los recorridos.

El modelo lineal generalizado que mejor explica la variación observada es el que incluye las variables mes, recorrido, año y sustrato ($df= 8$; $R^2=0,15$; $AIC=325,48$). No obstante, el resultado fue más claro en unos meses que en otros. La variación estacional no parece tener un efecto concluyente sobre la probabilidad de hallar indicios en cruces, porque en todos los meses el intervalo de confianza al 95 % incluye el 0. Por el contrario, la probabilidad de encontrar los indicios en cruces varió en los distintos recorridos. En ninguno de los intervalos de confianza hay solapamiento con el 0 por lo que el tipo de recorrido tiene una influencia más decisiva sobre la localización de los excrementos. En el modelo también se evalúa la influencia de las variables “año” y “sustrato”; “año” parece tener un efecto negativo, pero no concluyente ($[-0,830; 0,385]$), sobre la probabilidad de encontrar los excrementos en cruces mientras que si el excremento se localiza en un lugar elevado o sobre vegetación es menos probable que se localice en un cruce ($[-2,438; -0,763]$).

Discusión

El estudio sobre la dieta del lobo ibérico en los alrededores de la ciudad de León revela una fuerte dependencia de ungulados silvestres, básicamente jabalí y corzo, por tanto, en línea con lo que ya se ha descrito en numerosos estudios sobre el lobo en la Península Ibérica (Cuesta *et al.*, 1991; Figueiredo *et al.*, 2020; Barja *et al.*, 2023). El hecho de que la gran mayoría de restos identificados corresponda a presas salvajes sugiere que el lobo puede jugar en nuestros ecosistemas una función similar a la documentada en otras zonas de su área de distribución, incluyendo la regulación de poblaciones de ungulados (Ripple *et al.*, 2014; Ordiz

et al., 2021; Shrotriya *et al.*, 2022). Además de añadir información local sobre la ecología de la especie, estos resultados reiteran que los lobos apenas utilizan animales domésticos en su dieta, en contra de lo que pueda parecer con el “conflicto” que a menudo se cierne sobre la especie y los daños que supuestamente causa a la ganadería (Fernández-Gil *et al.*, 2016).

El jabalí es la especie más frecuentemente encontrada en los excrementos, con un notable aumento del 13 % en la frecuencia de aparición con respecto a los datos de 2022-2023, lo que lo consolida como la presa más representada en todos los recorridos, a excepción de Rabizo. Aunque este aumento podría ser debido a un incremento de la población de esta especie, no tenemos datos demográficos para confirmarlo, por lo que sería necesario incluir la disponibilidad de presas en los análisis realizados, así como prolongar el estudio más años para confirmar, eventualmente, esa tendencia. El corzo, por su parte, también mantiene una representación reseñable, con un promedio del 22,24 % en 2023 y del 26,75 % en 2024.

Por el contrario, las especies domésticas aparecen aún con menor frecuencia en los excrementos analizados en 2024, siendo los pelos de caballo los más comunes, lo que en último término denota el bajo uso de ese tipo de especies por parte del lobo en la zona de estudio. No obstante, sería necesario contrastar estos datos con los registros de daños al ganado, ya que no se conoce si realmente los restos analizados fueron depredados o consumidos de manera oportunista a partir de una carroña. En cualquier caso, haber encontrado que la mayor parte de la dieta del lobo en el área de estudio se basa en especies silvestres sugiere que éstas se encuentran en buen estado y que los lobos interactúan esencialmente con presas silvestres, no domésticas.

En lo referente a los patrones de marcaje territorial, se observan variaciones estacionales y espaciales en la cantidad de excrementos recogidos. Se ha documentado que los grupos familiares dejan el doble de marcas en los bordes de distribución de su territorio en comparación con el centro, lo que da como resultado un cuenco olfativo (Harrington y Asa, 2003). Este comportamiento permite el mantenimiento y la defensa del territorio, y se ve intensificado en el caso de los individuos reproductores (Llaneza *et al.*, 2014). Es posible que la zona por la que se realizaron los recorridos de Azadón y Espinosa sea un borde del territorio de dos grupos reproductores (así lo creen de hecho algunos agentes ambientales de la zona), lo que podría explicar la mayor proporción de marcas olfativas y por ende un esfuerzo de marcaje mayor en esos recorridos, en comparación con Rabizo y Castrillino, en los cuales la presión por la defensa del territorio quizá sea menor.

Los análisis también sugieren una disminución general en los indicios a partir de enero, con una caída más pronunciada en abril (**Figura 3**). Este patrón puede estar influenciado por el ciclo reproductivo de los lobos. En España la época de apareamiento de los lobos va de finales de enero hasta abril, y los naci-

mientos ocurren desde abril hasta junio. Dado que el periodo común de estudio para ambos años tiene su inicio en enero, es probable que este pico en el número de excrementos recogidos se deba a una intensificación del marcaje como consecuencia del celo. Posteriormente se va reduciendo hasta la época de partos. Esta explicación encajaría de hecho con los resultados obtenidos, que denotan una caída en el número de indicios encontrados y por tanto en los IKAs obtenidos (**Figura 3**).

Los lobos muestran una preferencia por depositar excrementos en sitios elevados o en lugares estratégicos donde la probabilidad de detección por otros individuos es máxima, como es el caso de las intersecciones de caminos (Barja *et al.*, 2004). Inicialmente el análisis preliminar de los datos arrojaba una preferencia de marcaje en los cruces (**Figura 4**), aunque la proporción era menor de la esperada. No obstante, solo en el recorrido de Azadón se invertía la tendencia de marcaje descrita, mientras que en Castrillino, Rabizo y Espinosa se observa más el marcaje en cruces. Es posible que los lobos marquen más, no solo en cruces, cuando la competencia por el territorio es elevada, diluyendo de ese modo la selección por cruces y marcando más en general a lo largo de las vías por las que se desplazan, sobre todo si suponen una “frontera” entre territorios contiguos (Peters y Mech, 1975). Este fenómeno podría explicar que en Azadón se hayan encontrado más excrementos fuera de cruces en ambos periodos de estudio. Así como la estacionalidad es un componente importante en cuanto a la intensidad del marcaje, es menos concluyente en el caso de la selección de la ubicación de los excrementos. Barja *et al.* (2004) sugieren que los cruces son puntos estratégicos de comunicación y marcaje territorial para los lobos, independientemente de la época.

Implicaciones para la conservación

El continuo crecimiento de la población humana mundial está creando una presión sin precedentes sobre la biodiversidad en general y sobre los grandes carnívoros en particular (Ferrão da Costa *et al.*, 2024). Los elevados requerimientos espaciales de estas especies, unidos a sus bajas densidades poblacionales, los convierten en especies vulnerables a muchas actividades humanas. Esto se debe a menudo a la pérdida o fragmentación del hábitat, a las altas tasas de mortalidad relacionadas con la depredación del ganado (Fernández-Gil *et al.*, 2016) y a la disminución de sus presas silvestres (Ripple *et al.*, 2014). A pesar de todo, algunas poblaciones de grandes carnívoros persisten e incluso aumentan en paisajes humanizados (Chapron *et al.*, 2014). En este contexto, el estudio del comportamiento de los grandes carnívoros es muy útil para su conservación y gestión.

Este trabajo ha permitido examinar los patrones de la dieta del lobo ibérico en un ambiente humanizado y a una escala local, señalando que el jabalí y el corzo son las bases de su alimentación. Por otro lado, comprender los diferentes comportamientos territoriales y sus variaciones estacionales es fundamental para interpretar adecuadamente los datos obtenidos en los muestreos basados

en el conteo de indicios (Llaneza *et al.*, 2014). Además, la tendencia a utilizar los cruces por parte de los lobos como sitios estratégicos de marcaje es la base del seguimiento de la población de lobos en España, que en gran medida se basa en el conteo de indicios, con una metodología de campo similar a la usada en este trabajo (Ordiz y Llaneza, 2010).

Limitaciones del estudio

Para finalizar, es importante destacar las limitaciones del estudio, que son inherentes a trabajar con especies elusivas como el lobo. Disponer de datos de radiomarcaje nos podría haber sido de utilidad para esclarecer lo sucedido con los grupos de Garfín y Camposagrado, muestreados en 2022-2023 y aparentemente desplazados o desaparecidos desde el otoño de 2023. En el caso de Garfín parece haber habido mortalidad ilegal de la especie, pudiendo alterar la organización social y los patrones de marcaje de los lobos que hayan sobrevivido o incluso desplazándolos. En Camposagrado, se constató afección por sarna en algunos lobos en 2022 y algún caso de mortalidad por atropello. Además, y dada la complejidad en algunas ocasiones para discernir entre excrementos de perros y lobos, sería interesante realizar análisis genéticos de las muestras, lo cual permite además identificar sus presas (Di Bernardi *et al.*, 2021; Barja *et al.*, 2024).

Por otro lado, es relevante considerar que la recolección de datos fue llevada a cabo por varios observadores. Si bien se ha intentado aplicar criterios comunes, cada persona puede mostrar un grado de atención y/o experiencia diferente, lo que podría haber afectado a los datos recopilados.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a Andrés Ordiz su implicación y guía durante este trabajo, además de enseñarme la importancia de la Biología de la Conservación

Referencias

- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6):716-723. doi:10.1109/TAC.1974.1100705.
- Barja, I. 2009. Prey and prey-age preference by the iberian wolf *Canis lupus signatus* in a multiple-prey ecosystem. *Wildlife Biology*, 15(2):147-154. doi:10.2981/07-096.
- Barja, I., Hernández, M. del C. y Navarro, Á. 2020. Manual de los patrones macroscópicos y cuticulares del pelo en mamíferos de la península ibérica. *Universidad Autónoma de Madrid*. Madrid, Spain.
- Barja, I., de Miguel, F. y Bárcena, F. 2005. Faecal marking behaviour of Iberian wolf in different zones of their territory. *Folia Zoologica-Praha*, 54:21-29.
- Barja, I., de Miguel, F. J. y Bárcena, F. 2004. The importance of crossroads in faecal marking behaviour of the wolves (*Canis lupus*). *Naturwissenschaften*, 91(10):489-492. doi:10.1007/S00114-004-0557-1.

- Barja, I., Navarro-Castilla, Á., Ortiz-Jiménez, L., España, Á., Hinojosa, R., Sánchez-Sotomayor, D., Iglesias, Á., España, J., Rubio-Sánchez, S., Martín-Romero, S., Vielva, J. y Horcajada-Sánchez, F. 2023. Wild ungulates constitute the basis of the diet of the iberian wolf in a recently recolonized area: wild boar and roe deer as key species for its conservation. *Animals* 13:3364. doi:10.3390/ANI13213364.
- Barja, I., Piñeiro, A., Talegón, J., Ruiz-González, A. *et al.* 2024. Iberian wolf's diet and its quality during breeding season: exploring the influence of zone, wolf groups, prey availability and individual factors. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 78(3):1-15. doi:10.1007/S00265-024-03457-4.
- Becker, M. S., Garrott, R. A., White, P. J., Gower, C. N., Bergman, E. J. y Jaffe, R. 2008. Wolf prey selection in an elk-bison system: choice or circumstance? *Terrestrial Ecology*, 3:305-337. doi:10.1016/S1936-7961(08)00216-9.
- Di Bernardi, C., Wikenros, C., Hedmark, E., Boitani, L., Ciucci, P., Sand, H. y Åkesson, M. 2021. Multiple species-specific molecular markers using nanofluidic array as a tool to detect prey DNA from carnivore scats. *Ecology and evolution*, 11(17):11739-11748. doi:10.1002/ECE3.7918.
- Blanco, J. C., Reig, S. y de la Cuesta, L. 1992. Distribution, status and conservation problems of the wolf *Canis lupus* in Spain. *Biological Conservation*, 60(2):73-80. doi:10.1016/0006-3207(92)91157-N.
- Chapron, G., Kaczensky, P., Linnell, J. D. C., Von Arx, M., Huber, D. *et al.* 2014. Recovery of large carnivores in Europe's modern human-dominated landscapes. *Science*, 346(6216): 1517-1519. doi:10.1126/SCIENCE.1257553.
- Cimatti, M., Ranc, N., Benítez-López, A., Maiorano, L., Boitani, L., Cagnacci, F. *et al.* 2021. Large carnivore expansion in Europe is associated with human population density and land cover changes. *Diversity and Distributions*, 27(4):602-617. doi:10.1111/DDI.13219.
- Ciucci, P. y Boitani, L. 1998. Wolf and dog depredation on livestock in central Italy. *Wildlife Society Bulletin*, 26(3):504-514. doi:10.2307/3783763.
- Clavero, M., García-Reyes, A., Fernández-Gil, A., Revilla, E. y Fernández, N. 2023. Where wolves were: setting historical baselines for wolf recovery in Spain. *Animal Conservation*, 26(2):239-249. doi:10.1111/ACV.12814.
- Cuesta, L., Barcena, F., Palacios, F. y Reig, S. 1991. The trophic ecology of the iberian wolf (*Canis lupus signatus* Cabrera, 1907). A new analysis of stomach's data. *Mammalia*, 55(2):239-254. doi:10.1515/MAMM.1991.55.2.239/MACHINEREAADABLECITATION/RIS.
- Fernández-Gil, A., Naves, J., Ordiz, A., Quevedo, M., Revilla, E. y Delibes, M. 2016. Conflict misleads large carnivore management and conservation: Brown bears and wolves in Spain. *PLOS ONE*, 11(3):e0151541. doi:10.1371/journal.pone.0151541.
- Ferrão da Costa, G., Mascarenhas, M., Fonseca, C. y Sutherland, C. 2024. Environmental impact assessment for large carnivores: a methodological review of the wolf

- Canis lupus* monitoring in Portugal. *Wildlife Biology*, e01230. doi:10.1002/WLB3.01230.
- Figueiredo, A. M., Valente, A. M., Barros, T., Carvalho, J., Silva, D. A. M., Fonseca, C., de Carvalho, L. M. y Torres, R. T. 2020. What does the wolf eat? Assessing the diet of the endangered Iberian wolf (*Canis lupus signatus*) in northeast Portugal. *PLOS ONE*, 15(3):e0230433. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0230433.
- Guimarães, N. F., Álvares, F., Ďurová, J., Urban, P., Bučko, J. *et al.* (2022) What drives wolf preference towards wild ungulates? Insights from a multi-prey system in the Slovak Carpathians. *PLOS ONE*, 17(6):e0265386. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0265386.
- Harrington, F. H. y Asa, C. S. 2003. Wolf communication, en Mech, L. D. y Boitani, L. (eds.) *Wolves : behavior , ecology , and conservation*. Chicago: University of Chicago Press, pp. 66-103.
- Kaczensky, P., Chapron, G., Huber, D., Andrén, H. y Linell, J. 2012. Status, management and distribution of large carnivores – bear , lynx , wolf & wolverine – in Europe 2, *European Commission*.
- Kuijper, D. P. J., Diserens, T. A., Say-Sallaz, E., Kasper, K., Szafránska, P. A., Szewczyk, M., Stępnia, K. M. y Churski, M. 2024. Wolves recolonize novel ecosystems leading to novel interactions. *Journal of Applied Ecology*, 61:906-921. doi:10.1111/1365-2664.14602.
- Kuijper, D. P. J., Sahlén, E., Elmhagen, B., Chamaillé-Jammes, S., Sand, H., Lone, K. y Cromsigt, J. P. G. M. 2016. Paws without claws? Ecological effects of large carnivores in anthropogenic landscapes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283:20161625. doi:10.1098/RSPB.2016.1625.
- Llaneza, L., García, E. J. y López-Bao, J. V. 2014. Intensity of territorial marking predicts wolf reproduction: Implications for wolf monitoring. *PLOS ONE*, 9(3):e93015. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0093015.
- MAGRAMA. 2016. Censo 2012-2014 de lobo ibérico (*Canis lupus*, Linnaeus, 1758) en España, https://www.miteco.gob.es/en/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/censo_lobo_espana_2012_14pdf_tcm38-197304.pdf.
- Mattioli, L., Capitani, C., Gazzola, A., Scandura, M. y Apollonio, M. 2011. Prey selection and dietary response by wolves in a high-density multi-species ungulate community. *European Journal of Wildlife Research*, 57(4):909-922. doi:10.1007/S10344-011-0503-4.
- Meriggi, A. y Lovari, S. 1996 a review of wolf predation in southern europe: does the wolf prefer wild prey to livestock? *The Journal of Applied Ecology*, 33(6):1561. doi:10.2307/2404794.
- Muhly, T. B., Johnson, C. A., Hebblewhite, M., Neilson, E. W., Fortin, D. *et al.* 2019. Functional response of wolves to human development across boreal North America. *Ecology and Evolution*, 9(18):10801-10815. doi:10.1002/ECE3.5600.

- Newsome, T. M., Boitani, L., Chapron, G., Ciucci, P., Dickman, C. R. *et al.* 2016. Food habits of the world's grey wolves. *Mammal Review*, 46(4):255-269. doi:10.1111/MAM.12067.
- Nores, C., Llana, L. y Álvarez, Á. 2008. Wild boar *Sus scrofa* mortality by hunting and wolf *Canis lupus* predation: an example in northern Spain. *Wildlife Biology*, 14(1):44-51.
- Nyhus, P. J. 2016. Human-wildlife conflict and coexistence. *Annual Review of Environment and Resources*, 41:143-171. doi:10.1146/ANNUREV-ENVIRON-110615-085634.
- Ordiz, A., Aronsson, M., Persson, J., Støen, O. G., Swenson, J. E. y Kindberg, J. 2021. Effects of human disturbance on terrestrial apex predators. *Diversity*, 13(2): 68. doi:10.3390/D13020068.
- Ordiz, A., Canestrari, D. y Echegaray, J. 2022. Wolf conservation and management in Spain, an open debate. *Frontiers in Environmental Science*, 10:781169. doi:10.3389/FENVS.2022.781169.
- Ordiz, A. y Llana, L. 2010. Muestreo de indicios para estimar la abundancia relativa de lobos en la península ibérica. En Fernández-Gil, A., Álvares, F., Vilá, C., y Ordiz, Andrés (eds.) *Los Lobos de la Península Ibérica Propuestas para el diagnóstico de sus poblaciones*. Palencia: ASCEL, pp. 37-54.
- Ordiz, A., Milleret, C., Uzal, A., Zimmermann, B., Wabakken, P., Wikenros, C., Sand, H., Swenson, J. E. y Kindberg, J. 2020. Individual variation in predatory behavior, scavenging and seasonal prey availability as potential drivers of coexistence between wolves and bears. *Diversity*, 12(9):356. doi:10.3390/D12090356.
- Ordiz, A., Støen, O. G., Delibes, M. y Swenson, J. E. 2011. Predators or prey? Spatio-temporal discrimination of human-derived risk by brown bears. *Oecologia*, 166(1):59-67. doi:10.1007/S00442-011-1920-5/FIGURES/1.
- Peters, R. y Mech, L. D. 1975. Scent-marking in wolves. *American Scientist*, 63(6):628-637. doi:10.1016/B978-0-12-319250-9.50015-3.
- Du Prel, J. B., Hommel, G., Röhrig, B. y Blettner, M. 2009. Confidence interval or p-value?: Part 4 of a series on evaluation of scientific publications. *Deutsches Ärzteblatt International*, 106(19):335. doi:10.3238/ARZTEBL.2009.0335.
- Quevedo, M., Echegaray, J., Fernández-Gil, A., Leonard, J. A., Naves, J., Ordiz, A., Revilla, E. y Vilà, C. 2019. Lethal management may hinder population recovery in Iberian wolves. *Biodiversity and Conservation*, 28(2):415-432. doi:10.1007/S10531-018-1668-X/TABLES/1.
- Ray, J. C. 2015. Large carnivorous animals as tools for conserving biodiversity - assumptions and uncertainties. En J.C. Ray, K.H. Redford, R.S. Steneck, y J. Berger (eds.) *Large Carnivores and the Conservation of Biodiversity*. Washington, D.C: Island Press, pp. 34-56.

- Ripple, W. J., Estes, J. A., Beschta, R. L., Wilmers, C. C., Ritchie, E. G. *et al.* 2014. Status and ecological effects of the world's largest carnivores. *Science*, 343:1241484. doi:10.1126/SCIENCE.1241484/SUPPL_FILE/RIPPLE.SM.PDF.
- Salado, I., Preick, M., Lupiáñez-Corpas, N., Fernández-Gil, A., Vilà, C., Hofreiter, M. y Leonard, J. A. 2024. Large variance in inbreeding within the Iberian wolf population. *Journal of Heredity*, 115(4):349-359. doi:10.1093/JHERED/ESAD071.
- Shrotriya, S., Reshamwala, H. S., Lyngdoh, S., Jhala, Y. V. y Habib, B. 2022. Feeding patterns of three widespread carnivores—The wolf, snow leopard, and red fox—in the trans-Himalayan landscape of India. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10:815996. doi:10.3389/FEVO.2022.815996/BIBTEX.
- Tanner, E., White, A., Acevedo, P., Balseiro, A., Marcos, J. y Gortázar, C. 2019. Wolves contribute to disease control in a multi-host system. *Scientific Reports*, 9(1):7940. doi:10.1038/s41598-019-44148-9.
- Torres, R. T. y Fonseca, C. 2016. Perspectives on the Iberian wolf in Portugal: population trends and conservation threats. *Biodiversity and Conservation*, 25(3):411-425. doi:10.1007/S10531-016-1061-6/FIGURES/1.
- Torres, R. T., Silva, N., Brotas, G. y Fonseca, C. 2015. To eat or Not to eat? The diet of the endangered iberian wolf (*Canis lupus signatus*) in a human-dominated landscape in Central Portugal". *PLOS ONE*, 10(6):e0129379. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0129379.
- Vicedo, T., Meloro, C., Penteriani, V., García, J., Lamillar, M. Á. *et al.* 2023. Temporal activity patterns of bears, wolves and humans in the Cantabrian Mountains, northern Spain. *European Journal of Wildlife Research*, 69(5):100. doi:10.1007/S10344-023-01728-5/TABLES/1.
- Yearsley, J. M. 2003. Optimal diet selection, frequency dependence and prey renewal. *Theoretical Population Biology*, 64(2):129-139. doi:10.1016/S0040-5809(03)00070-4.
- Zanni, M., Brogi, R., Merli, E. y Apollonio, M. 2023. The wolf and the city: insights on wolves' conservation in the anthropocene. *Animal Conservation*, 26(6):766-780. doi:10.1111/ACV.12858.

Estudio del mucílago de semillas mutantes para conocer el papel de la arabinosa en la pared celular

Paula Gómez de Agüero¹, Asier Largo-Gosens^{2,3}.

- ¹ Graduada en Biología, Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales. Universidad de León. pgomeco1@estudiantes.unileon.es
- ² Área de Fisiología Vegetal, Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Universidad de León.
- ³ Instituto de Biología Molecular, Genómica y Proteómica (INBIOMIC), Universidad de León. alargs@unileon.es

Resumen

La pared celular primaria rodea los protoplastos de las células de las plantas y está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosas, pectinas y glicoproteínas. Los dos últimos grupos poseen arabinofuranosa en sus cadenas laterales y, aunque el déficit de este monosacárido produce defectos severos en el desarrollo, todavía se desconoce su función en la pared celular. Para realizar este trabajo se ha estudiado el mucílago de las semillas de *Arabidopsis thaliana*, que es una estructura de fácil extracción con agua y muy rica en pectinas, lo que facilita el análisis de estos polisacáridos. Se han analizado 8 mutantes en genes *RGP* (*RGP1-5*) que codifican para un complejo enzimático encargado de catalizar el último paso en la síntesis de UDP-arabinofuranosa, precursor activado necesario para la síntesis de polímeros que contienen arabinofuranosa. El estudio de los mutantes *rgp* reveló que la reducción de la expresión de *RGP4* y *RGP5* provoca un déficit en la liberación del mucílago, destacando el mutante *rgp5-2*. La superficie de las semillas de los mutantes *rgp5-2* mostró anomalías en las células que sintetizan el mucílago, lo que podría explicar los problemas en la liberación. No obstante, es necesario seguir estudiando los genes *RGP* para intentar comprender mejor el rol de la arabinosa en la pared celular de las plantas.

Palabras clave

Arabidopsis thaliana, arabinofuranosa, mucílago, pared celular, *Reversibly Glycosylated Polypeptides* (RGPs).

Introducción

La pared celular de las plantas

Todas las células de las plantas están limitadas por una estructura compleja, dinámica y altamente controlada denominada pared celular primaria, la cual desempeña multitud de funciones como la determinación de la morfogénesis, el control de la elongación celular o respuestas de defensa frente a estreses, entre otras (Zhang *et al.*, 2021). Esta estructura consiste en una red heterogénea formada principalmente por polisacáridos como celulosa (25-30 %), hemicelulosas (30 %), pectinas (30-35 %) y glicoproteínas (5-10 %) (**Fig. 1.A**) (Zhang *et al.*, 2021). Las pectinas, además de ser un componente mayoritario, son fundamentales ya que participan en la cohesión y adhesión celular y modifican la flexibilidad de la pared, entre otras funciones (Anderson, 2016). Debido a su gran diversidad, las pectinas se han clasificado tradicionalmente en cuatro dominios estructurales (homogalacturonano, HG; xilogalacturonano, XGA; ramnogalacturonano-I, RG-I; y ramnogalacturonano-II, RG-II) los cuales tienen en común que su cadena principal está formada por ácido galacturónico (GalA), a excepción del RG-I que está formada por repeticiones del disacárido GalA-ramnosa (**Fig. 1.B**) (Anderson, 2016).

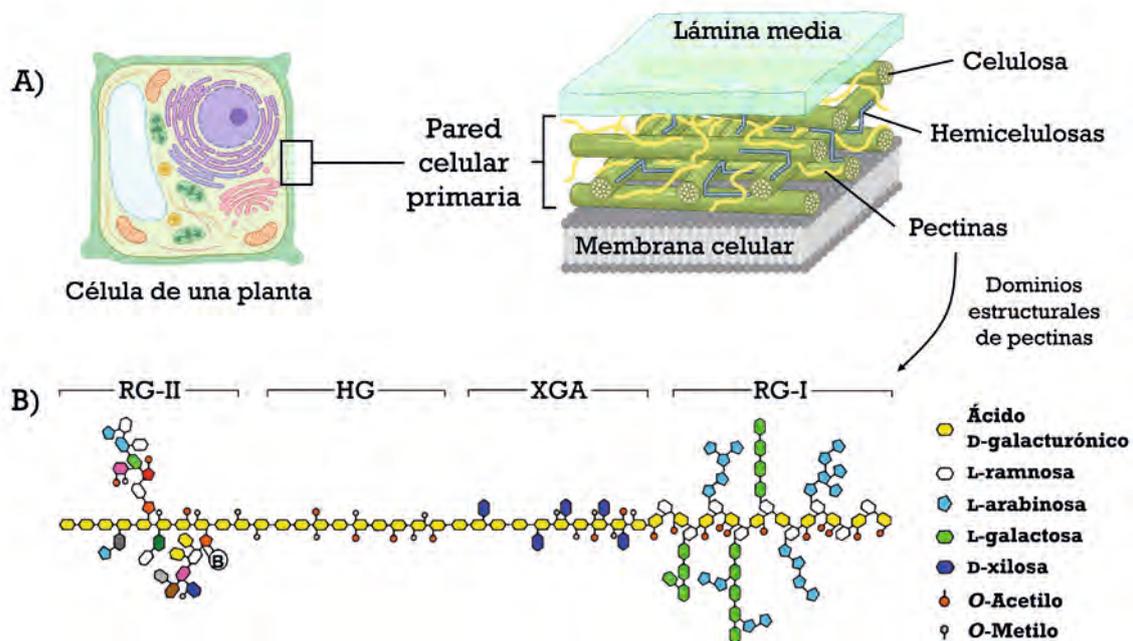


Figura 1. Estructura y composición general de la pared celular primaria de las plantas. **A)** Esquema de la disposición, estructura y composición de la pared celular primaria. Se incluyen los tres componentes principales de la pared celular primaria: microfibrillas de celulosa, hemicelulosas y pectinas. Imagen creada con BioRender. **B)** Representación de la estructura de los cuatro dominios principales de pectinas (ramnogalacturonano II, RG-II; homogalacturonano, HG; xilogalacturonano, XGA y ramnogalacturonano I, RG-I). Imagen obtenida de Harholt *et al.*, (2010).

Uno de los monosacáridos más importantes de las pectinas es la arabinosa (Ara), llegando a ser de los más abundantes de la pared celular en determinados tejidos (Mariette *et al.*, 2021). La Ara está presente en las cadenas laterales de arabinano y arabinogalactano del RG-I, en algunas cadenas laterales del RG-II y en proteínas estructurales de la pared celular, como las extensinas y las arabinogalactano proteínas (Marzol *et al.*, 2018; Mariette *et al.*, 2021). Debido a su extensa distribución en diversos polímeros de pared y a las diferentes proporciones de este monosacárido dependiendo de la planta, órgano o tejido estudiado, ha sido muy complicado describir las funciones concretas de la presencia de este monosacárido en componentes de la pared celular (Mariette *et al.*, 2021). Sin embargo, sí se ha determinado que la Ara está relacionada con una gran variedad de procesos como la desecación y germinación de las semillas, la maduración y deshidratación de los granos de polen, la elongación de los tubos polínicos, la apertura y cierre de estomas o el crecimiento de los pelos radicales, entre otros (Marzol *et al.*, 2018; Mariette *et al.*, 2021). Además, cabe destacar que la Ara podría ser clave para mantener las propiedades mecánicas de la pared ya que se ha sugerido que la cantidad de arabinano en el RG-I podría generar cambios en la elasticidad de la pared celular y en su capacidad de absorber y retener agua (Arsovski *et al.*, 2009; Rautengarten *et al.*, 2011). Todos estos procesos son clave para el desarrollo de las plantas, por lo que la Ara es un monosacárido esencial y cualquier avance en el estudio de su síntesis e incorporación a los polímeros de pared celular podría ayudar a comprender mejor el papel de la Ara en esta estructura (Mariette *et al.*, 2021).

Síntesis de arabinosa en plantas

Al igual que el resto de monosacáridos, la Ara tiene dos conformaciones (tautómeros): arabinopiranososa (Arap) y arabinofuranosa (Araf) (**Fig. 2.A**). Para la mayor parte de los monosacáridos presentes en la pared celular la forma piranososa es la más frecuente dado que es termodinámicamente más estable, pero precisamente esto no es así en el caso de la Ara, en la que predomina su forma furanosa (Rautengarten *et al.*, 2011). La incorporación de Araf en las pectinas y glicoproteínas de pared es realizada por arabinosiltransferasas (AraTs) en el aparato de Golgi (Rautengarten *et al.*, 2011). El sustrato de las AraTs es el nucleótido-azúcar UDP-Araf, que es transmutado a partir de UDP-Arap por un complejo de proteínas con actividad UDP-arabinosa mutasa en el citoplasma y posteriormente es transferido al lumen del aparato de Golgi por medio del transportador de UDP-Araf (UAFT) (**Fig. 2.B**) (Rautengarten *et al.*, 2011; 2017). El complejo con actividad UDP-arabinosa mutasa está formado por proteínas de la familia *Reversibly Glycosylated Polypeptides* (RGPs), que en *Arabidopsis thaliana* está constituida por cinco miembros (Rautengarten *et al.*, 2011). De entre ellos, tres (RGP1-3) poseen actividad UDP-arabinosa mutasa *in vitro* mientras que los otros dos (RGP4 y 5) no la presentan (Rautengarten *et al.*, 2011). Los complejos proteicos RGP formados son de alto peso molecular y están constituidos por tres subunidades: RGP1 y RGP2 (con actividad mutasa) y un RGP sin actividad, fun-

damentalmente RGP5 (**Fig. 2.B**) (Rautengarten *et al.*, 2011). Las razones de la prevalencia de la forma Araf frente a Arap en paredes celulares de plantas y la presencia de miembros sin actividad UDP-Ara mutasa en los complejos RGP son algunas de las incógnitas que rodean este proceso.

El mucílago: un modelo simplificado para el estudio de la pared celular primaria

La gran complejidad química que presenta la pared celular y el elevado número de interacciones entre sus componentes dificulta en gran medida el estudio de esta estructura (Zhang *et al.*, 2021). Por este motivo, recientemente, se ha fomentado el uso de modelos simplificados de pared celular, como es el caso del mucílago de las semillas de *A. thaliana* (Western *et al.*, 2001). El mucílago es una matriz gelatinosa sintetizada en un tipo de células especializadas localizadas en la epidermis de las semillas denominadas células secretoras de mucílago (MSCs) (**Fig. 3.A**) (Western *et al.*, 2001). Este mucílago se deposita de forma deshidratada hacia el exterior de la célula formando en el centro de la MSC una estructura denominada columela (**Fig. 3.A**). En presencia de agua, el mucílago se hidrata y se libera en dos capas: el mucílago soluble en agua (MS) y el mucílago adherido a la semilla (MA) (**Fig. 3.B**) (Saez-Aguayo y Largo-Gosens, 2022).

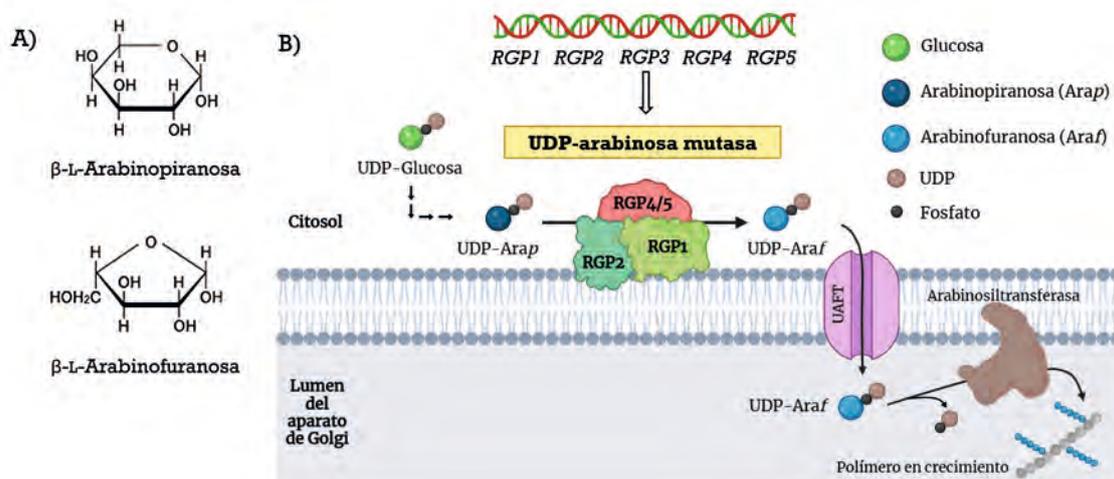


Figura 2. Estructura de los tautómeros de Ara y esquema simplificado de la síntesis y utilización de UDP-Araf. **A)** Representación esquemática de los dos tautómeros de la Ara. Los azúcares se muestran en la proyección de Haworth (modificado de Kotake *et al.*, 2016). **B)** Esquema simplificado de la síntesis de UDP-arabinofuranosa en plantas. En la síntesis y utilización de la UDP-Araf participan varias proteínas como el complejo RGP con actividad UDP-Ara mutasa, los transportadores de UDP-Araf de la membrana del aparato de Golgi (UAFTs) y las arabinosiltransferasas. Imagen basada en Rautengarten *et al.*, (2017) y creada con BioRender.

En cuanto a su composición, ambas capas tienen una gran cantidad de RG-I y HG, además de otros componentes (**Fig. 3.C**), haciendo que el mucílago sea un buen modelo para el estudio de pectinas (Šola *et al.*, 2019; Saez-Aguayo y Largo-Gosens, 2022). Es por ello que esta estructura ha sido utilizada para comprender aspectos de la síntesis o metabolismo de la Ara en la pared celular. Un ejemplo son los mutantes en *BXL1*, un gen que codifica para una arabinofuranosidasa capaz de modificar las cadenas laterales de arabinanos del RG-I presentes en el mucílago y cuyos mutantes *bxl1* mostraron problemas en la liberación de esta estructura tras la hidratación de las semillas (Arsovski *et al.*, 2009). Otro caso es el de los mutantes *uaft2*, que codifican para un transportador de Araf (UAFT2) y presentan alteraciones en la estructura del mucílago, así como una menor adherencia de este (Parra-Rojas *et al.*, 2019). En otro estudio, se observó que cuando se afecta la expresión de *RGP1* y *RGP2* en líneas ARNi que reducen la expresión de ambos genes se producen cambios en la estructura del mucílago (Rautengarten *et al.*, 2011). Sin embargo, en este trabajo no se estudiaron en detalle los cambios producidos y tampoco se estudiaron los posibles papeles del resto de miembros *RGP* en la síntesis de esta estructura. Este análisis podría ayudar a entender cómo se produce la síntesis de UDP-Araf en plantas y su posterior incorporación en los polímeros presentes en el mucílago, lo que a su vez ayudaría a comprender cuál es la implicación de la Araf en la pared celular.

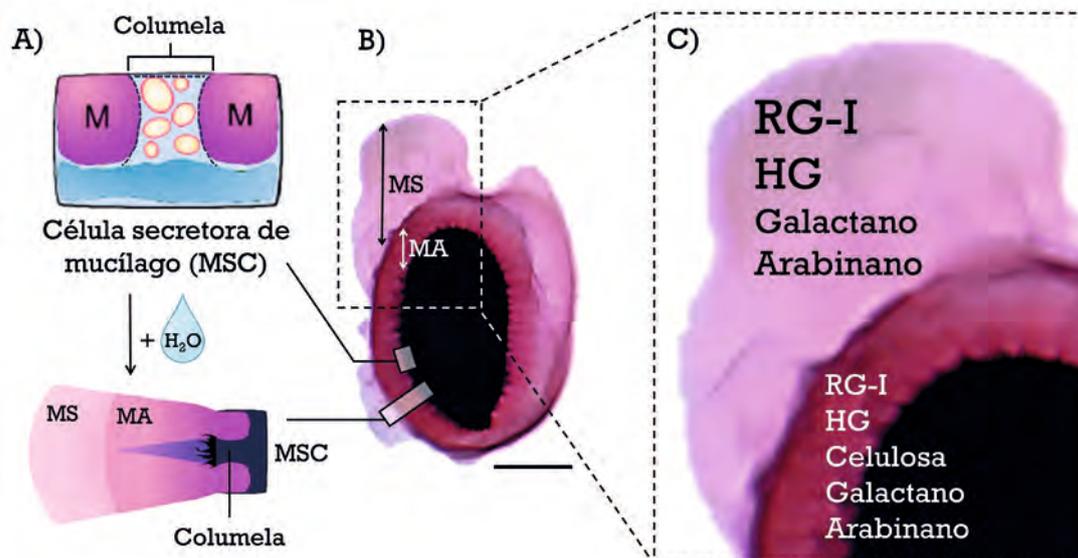


Figura 3. Estructura y composición del mucílago de las semillas de *A. thaliana*. **A)** Esquema de la localización del mucílago (M) dentro de las MSCs y de la posición de la columela. Imagen creada con BioRender. **B)** Semilla madura teñida con rojo de rutenio durante la liberación del mucílago. Se observa una capa compacta de MA (mucílago adherido) y una difusa de MS (mucílago soluble). Barra de escala: 150 μ m. **C)** Imagen donde se incluyen los principales componentes de cada capa (en negro para MS y en blanco para MA) expresados de mayor a menor abundancia. Ramnogalacturonano I (RG-I); homogalacturonano (HG).

Objetivo

El objetivo de este trabajo es seleccionar las proteínas RGP con un posible rol en la síntesis de componentes del mucílago de las semillas de *Arabidopsis thaliana* mediante un fenotipado en mutantes insercionales de ADN-T de los genes *RGP*.

Materiales y métodos

Material vegetal

Las semillas genotipo salvaje ecotipo Columbia-o (Col-o WT) y de ocho mutantes insercionales de ADN-T para los genes *RGP* de *A. thaliana* (**Tabla 1**) se obtuvieron de ABRC (<http://abrc.osu.edu/>) y de uNASC (<https://arabidopsis.info/>) y se seleccionaron mutantes homocigotos por PCR.

Las semillas fueron recolectadas de plantas de *A. thaliana* crecidas en cámaras de cultivo con un fotoperiodo de 16 horas de luz a 23 °C y 8 horas de oscuridad a 21 °C, y con una humedad del 40 %. Cada planta creció individualmente sobre alveolos de 25 mL que contenían una mezcla de sustrato universal (Projar) y vermiculita en proporción 4:1. Las plantas se regaron a capacidad de campo cada tres días y se fertilizaron cada dos riegos hasta que salieron los primeros botones florales. A partir de las silicuas formadas se recolectaron las semillas utilizadas en este trabajo.

Tabla 1. Genes, mutantes y primers empleados. Se incluye el código de cada gen, el código de cada mutante insercional de ADN-T y la secuencia de los primers empleados en la RT-PCR.

Gen	Código	Primer	Secuencia (5' → 3')	Mutante (código)
<i>RGP1</i>	At3g02230	RGP1 Fw	ATGGTTGAGCCGGCGAACAC	<i>rgp1-1</i> (GK_652F12)
		RGP1 Rv	AGCTTTAGTGGGTGGGTTAAG	<i>rgp1-2</i> (GK_844C11)
<i>RGP2</i>	At5g15650	RGP2 Fw	ATGGTTGAGCCGGCGAATAC	<i>rgp2-1</i> (SALK_132152)
		RGP2 Rv	AGCTTTGCCACTGGCTGCTGG	<i>rgp2-2</i> (SALK_148500)
<i>RGP4</i>	At5g50750	RGP4 Fw	ATGGCGGGCTACAACCTCGA	<i>rgp4-1</i> (SALK_094267)
		RGP4 Rv	TCACTTGGCCTTGACATCTT	<i>rgp4-2</i> (SALK_150951)
<i>RGP5</i>	At5g16510	RGP5 Fw	ATGTCTTTGGCCGAGATAAAC	<i>rgp5-1</i> (GK_105B02)
		RGP5 Rv	AGCGCTAGAATTAACAGAATTCC	<i>rgp5-2</i> (WiscDsLox264E12)
<i>UBQ21</i>	At5g25760	UBI21 Fw	GCTCTTATCAAAGGACCTTCGG	—
		UBI21 Rv	CGAACTTGAGGAGGTTGCAAAG	

Análisis de expresión de genes *RGP* en mutantes insercionales de ADN-T

Para analizar la expresión de los genes *RGP1*, *RGP2* y *RGP5* en Col-o WT y en los mutantes de *A. thaliana* se tomó un fragmento de hoja de la roseta. Sin

embargo, para analizar la expresión del gen *RGP4* se recogieron 6 silicuas 6 días después de la polinización del gineceo (DAP) siguiendo las indicaciones descritas en Western *et al.*, (2001), ya que *RGP4* solo se expresa en semillas en desarrollo (Rautengarten *et al.*, 2011). Este material se obtuvo de tres réplicas biológicas crecidas en las mismas condiciones.

El material vegetal obtenido se homogeneizó y se utilizó TRIzol-Reagent (Fisher Scientific) para extraer el ARN de los mutantes en los genes *RGP1*, *RGP2* y *RGP5*, y se empleó el kit RNeasy Plant Mini (Qiagen) para extraer el ARN de los mutantes en *RGP4* y evitar la presencia de contaminantes. Tras determinar la concentración y pureza del ARN total se realizó la retrotranscripción utilizando el kit High-Capacity RNA-to-cDNA (Applied Biosystems). La RT-PCR se hizo utilizando la enzima OptiTaq DNA polymerase (Eurx) junto con unos *primers* específicos que amplifican toda la región codificante para cada uno de los genes (**Tabla 1**). Para la normalización de dicha expresión se utilizó el gen de referencia *UBQ21*.

Ensayo de liberación de mucílago soluble

Para la extracción del mucílago soluble las semillas se embebieron 10 mg de semillas en 1 mL de agua destilada, se pusieron en agitación constante en una noria a temperatura ambiente y se recogió el mucílago soluble liberado a distintos tiempos. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de ácidos urónicos (que en el mucílago es fundamentalmente GalA) por el método del m-hidroxibifenil (Blumenkrantz y Asboe-Hansen, 1973) adaptado a placas de 96 pocillos. Para poder cuantificar se utilizó una recta patrón de GalA en concentraciones conocidas (0-100 µg/mL).

Análisis citológico de la superficie de la semilla y del mucílago adherido

Para analizar cambios en la estructura de la superficie de la semilla y en la liberación del mucílago adherido se seleccionó el mutante *rgp5-2* ya que es el que más defectos fenotípicos presentó en ensayos anteriores. La superficie de las semillas se observó con el microscopio estereoscópico Nikon SMZ25 empleando el campo claro para ver la morfología de las células secretoras de mucílago y de la columela, y empleando luz UV a 400 y 460 nm para detectar la autofluorescencia emitida en la superficie de la semilla, probablemente debida a la celulosa cristalina.

Para analizar la liberación del mucílago adherido se eliminó la capa de mucílago soluble mediante un lavado con agua destilada durante 5 minutos en agitación y posteriormente, el mucílago adherido se tiñó durante 5 minutos con una solución de rojo de rutenio al 0,05 % (p/v). Finalmente, las semillas se observaron con un microscopio estereoscópico NexiusZoom 1902 para realizar una valoración general de los defectos en la liberación del mucílago y Nikon SMZ25 para observar los detalles de la superficie de las semillas

Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se han realizado con el programa informático GraphPad Prism v8.0.1. Para evaluar la normalidad de los datos se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov y para analizar la existencia de diferencias significativas entre los mutantes y el genotipo silvestre se realizó el test de Mann-Whitney. El grado de significancia se indicó en las gráficas correspondientes mediante asteriscos en función de los siguientes valores: * para $p < 0,05$, ** para $p < 0,01$ y *** para $p < 0,001$.

Resultados y discusión

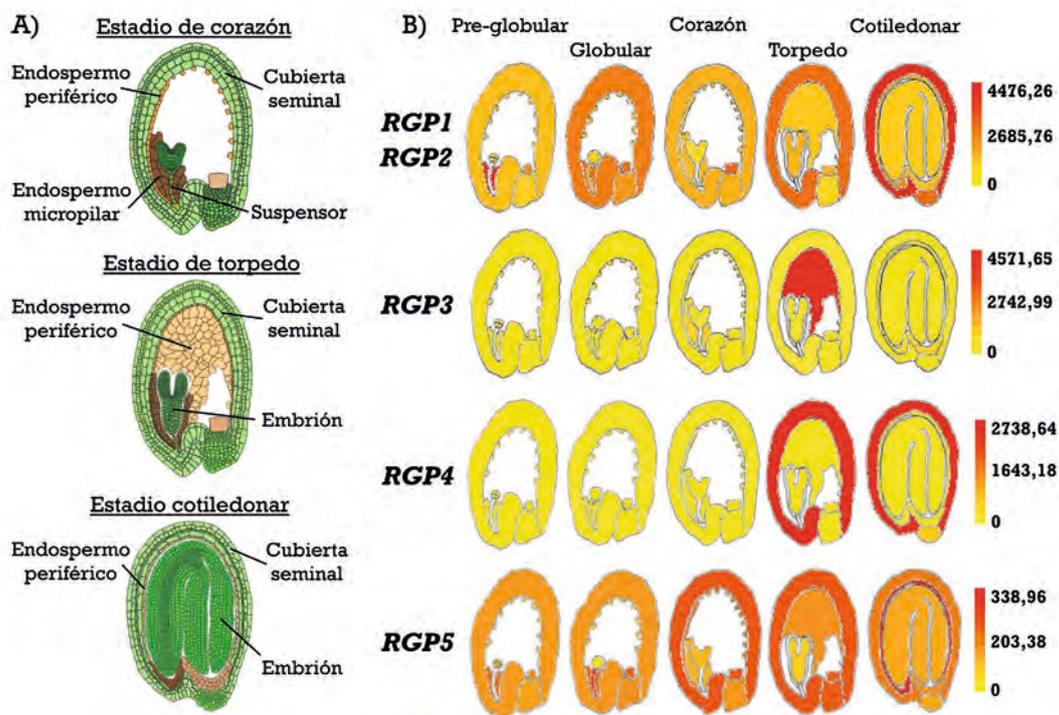


Figura 4. Los genes *RGP1*, *RGP2*, *RGP4* y *RGP5* se expresan en el tegumento durante el desarrollo de semillas Col-0 WT de *A. thaliana*. **A)** Dibujo esquemático de los tejidos de la semilla en distintas etapas de su maduración. **B)** Expresión específica de los genes *RGP1-5* en los tejidos de la semilla en distintos estadios de la embriogénesis de *A. thaliana*. Los valores absolutos de expresión en la escala de color fueron obtenidos de la base de datos Efp Browser (Winter *et al.*, 2007).

Aunque existen pruebas de que *RGP1* y *RGP2* participan en la síntesis del mucílago (Rautengarten *et al.*, 2011) no se ha demostrado si hay más miembros de la familia *RGP* que pudieran estar participando en este proceso. El análisis *in silico* de la expresión de estos genes en el tegumento de la semilla durante su desarrollo reveló que todos los genes *RGP*, salvo el *RGP3*, se expresan en el tegumento de la semilla (**Fig. 4**). Además, la expresión de estos genes tiene lugar en las etapas embrionarias de torpedo y cotiledonar con un patrón muy similar al de otros genes con

un papel en la síntesis del mucílago, como *MUM2*, *MUM4* y *GATL5* (Western *et al.*, 2001; Macquet *et al.*, 2007; Kong *et al.*, 2011). Esto indicaría que *RGP1*, *RGP2*, *RGP4* y *RGP5* podrían tener un papel en la biosíntesis de las pectinas del mucílago. Por otro lado, el gen *RGP3* tiene una alta expresión, pero de forma exclusiva en el endospermo (**Fig. 4**), lo que descarta su participación en la síntesis del mucílago y, por lo tanto, no se ha incluido en el resto de análisis realizados.

Con el objetivo de evaluar los posibles cambios provocados por la reducción de la expresión de los genes de la familia *RGP* se seleccionaron dos líneas mutantes insercionales de ADN-T que fueran homocigotas para cada uno de ellos (**Fig. 5.A**) y se analizó el efecto de las mutaciones en la expresión de su correspondiente gen (**Fig. 5.B**). Los resultados revelaron que todas las inserciones de ADN-T producían un efecto *knock-down* en la expresión de sus correspondientes genes, siendo en los mutantes *rgp1-1*, *rgp2-2*, *rgp4-1* y *rgp5-2* donde se produjo una mayor disminución de la expresión.

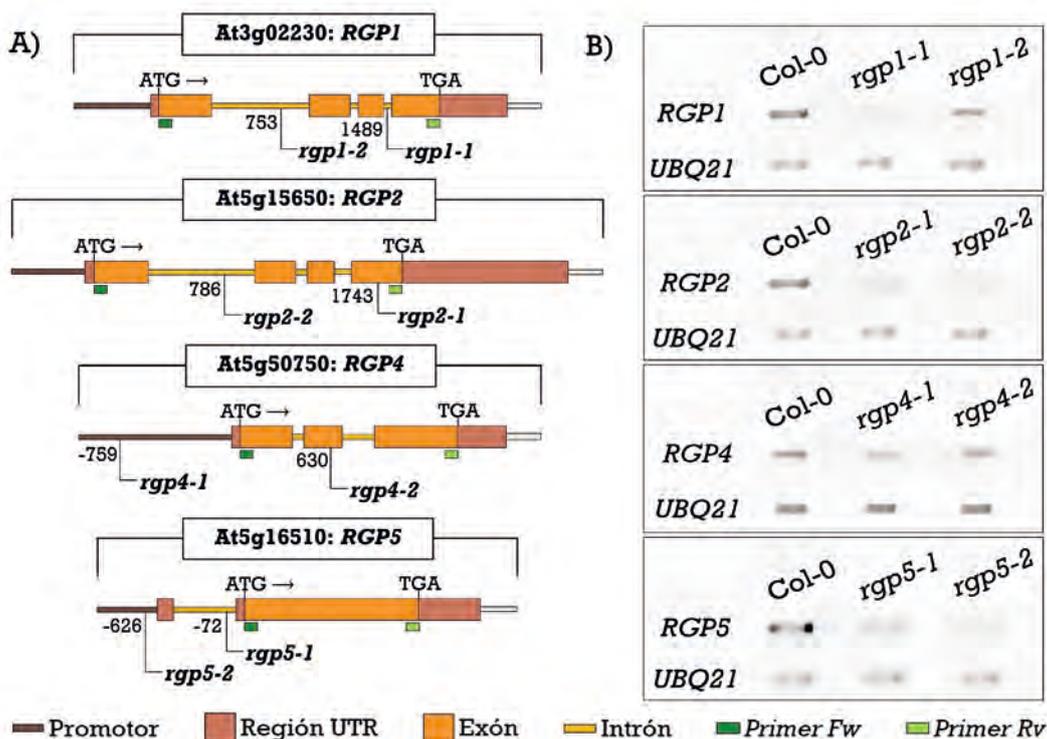


Figura 5. La expresión de los genes *RGP1*, *RGP2*, *RGP4* y *RGP5* disminuye en sus correspondientes líneas mutantes. A) Representación esquemática de la estructura de los genes *RGP1*, *2*, *4* y *5*. Se indican tanto los codones de inicio (ATG) y parada (TGA), como la posición (en pb) de los mutantes insercionales de ADN-T. También se representan las regiones UTRs, exones, intrones y los promotores de cada gen. Se incluye el sitio de unión de los *primers Fw* y *Rv* usados en la RT-PCR. Datos obtenidos de TAIR (<http://arabidopsis.org>). **B)** Análisis de la expresión de los genes *RGP1*, *2*, *4* y *5* en sus correspondientes líneas mutantes y Col-o WT mediante RT-PCR utilizando *primers* específicos para cada gen. La expresión del gen *UBQ21* se utilizó como referencia.

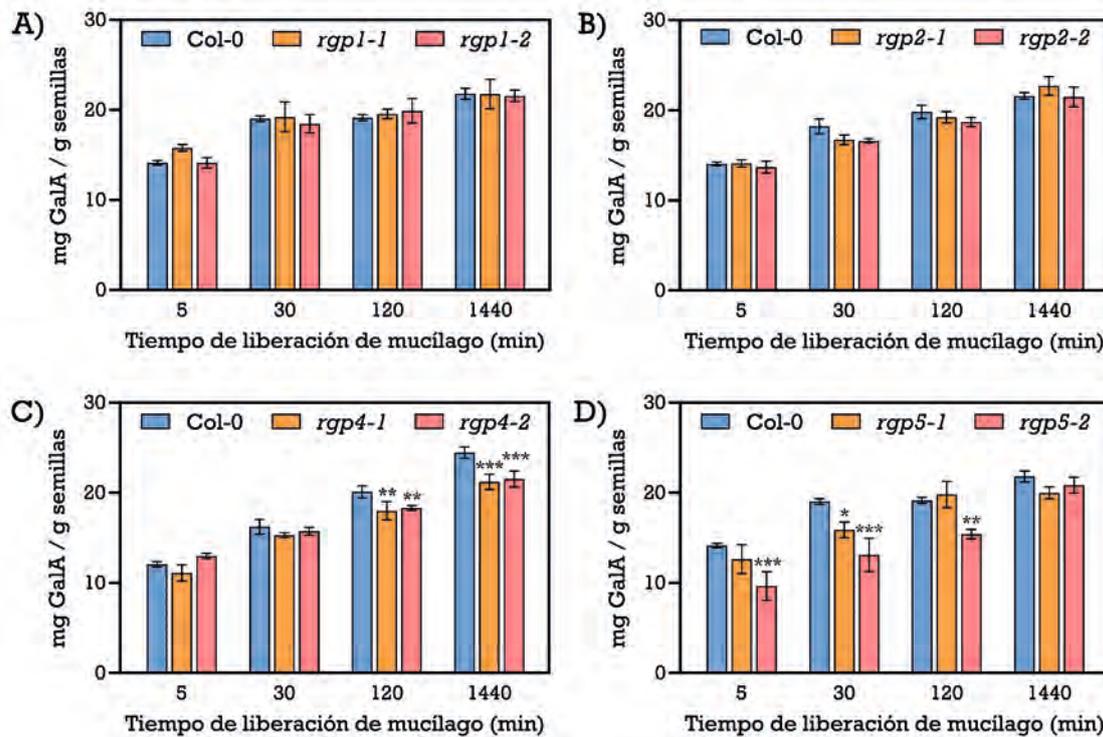


Figura 6. Los mutantes en *RGP4* y *RGP5* muestran defectos en la tasa de liberación de mucílago tras la hidratación de las semillas. Se representa la cuantificación de GalA liberado en el mucílago soluble de las semillas Col-0 WT y líneas mutantes en (A) *RGP1*, (B) *RGP2*, (C) *RGP4* y (D) *RGP5*. Las barras de error representan el SE de 3 réplicas biológicas por genotipo. Los asteriscos indican diferencias significativas respecto a Col-0 WT (test de Mann-Whitney, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ y *** $p < 0,001$).

Para caracterizar fenotípicamente los mutantes *rgp*, primero se evaluó si presentaban defectos en la liberación del MS mediante la cuantificación del GalA obtenido tras la imbibición de las semillas en agua a lo largo del tiempo (Fig. 6). Los mutantes en *RGP1* (Fig. 6.A) y *RGP2* (Fig. 6.B) no presentaron diferencias significativas en cuanto a la cantidad de GalA en comparación con Col-0 WT, lo que sugiere que estas mutaciones no provocaron deficiencias en la liberación del MS. En contraposición, los mutantes en *RGP4* (Fig. 6.C) y *RGP5*, sobre todo la línea *rgp5-2*, (Fig. 6.D) presentaron una reducción en la cantidad de GalA liberado en comparación con Col-0 WT, lo que implica una deficiencia en el MS liberado. Teniendo en cuenta que *RGP1* y *RGP2* eran los miembros que presentaban actividad UDP-arabinosa mutasa *in vitro*, estos resultados parecen sorprendentes. Sin embargo, se ha observado que *RGP1* y *RGP2* tienen una redundancia funcional y podrían tener un efecto compensatorio, dado que en los mutantes simples nunca se han observado grandes defectos morfológicos (Rautengarten *et al.*, 2011). Este efecto compensatorio radica en que la deficiencia en la actividad mutasa en los mutantes en *RGP1* podría ser compensada por *RGP2*,

y viceversa, de modo que la actividad global del complejo no se reduciría significativamente (Rautengarten *et al.*, 2011). Sin embargo, poco se conoce sobre la función de RGP4 y RGP5 en el complejo proteico, aunque se ha propuesto que podrían tratarse de un estabilizador estructural del complejo o un regulador de la actividad enzimática (Mariette *et al.*, 2021). Por tanto, la ausencia de estas proteínas podría comprometer la integridad del complejo enzimático, disminuyendo considerablemente su actividad (Mariette *et al.*, 2021). No obstante, para poder afirmar todo esto sería necesario evaluar si realmente hay una disminución de la actividad UDP-Ara mutasa en estos mutantes.

Un aspecto que llama la atención es que los mutantes en *RGP4* presentaron una menor liberación de mucílago a tiempos largos, y la cantidad liberada nunca alcanzó niveles similares a las semillas Col-0 WT tras 24 horas en agua (**Fig. 6.C**). En contraste, los mutantes en *RGP5* mostraron una deficiencia en la liberación de mucílago en los primeros tiempos de análisis, y la cantidad de MS obtenido fue muy similar a Col-0 WT al final del ensayo (**Fig. 6.D**). Todo esto podría significar que, en realidad, los mutantes en *RGP4* presentan una reducción en la cantidad general de MS liberado, mientras que los mutantes en *RGP5* muestran un retraso severo en su liberación.

De entre todos los mutantes analizados, *rgp5-2* reducía en mayor medida la expresión de este gen y presentó los mayores defectos fenotípicos. El análisis citológico con la tinción rojo de rutenio mostró que *rgp5-2* presentaba una liberación completa del mucílago en un número reducido de semillas (**Fig. 7.B**), fenotipo que ha sido observado en mutantes que afectan a genes implicados en la síntesis del mucílago como *BXL1* o *GATL5* (Arsovski *et al.*, 2009; Kong *et al.*, 2011). Además, la superficie de las semillas de este mutante reveló alteraciones en la morfología de las células del tegumento (con una pérdida de la forma hexagonal) y defectos en el desarrollo y/o incluso ausencia de la columela (**Fig. 7.E**).

También se observó una reducción de la autofluorescencia a 400 y 460 nm en las columelas de las MSCs de dichas semillas. Esta menor fluorescencia probablemente sea debida a una menor proporción de celulosa cristalina, que es clave para la síntesis y liberación del mucílago (Griffiths *et al.*, 2015) (**Fig. 7.I y 7.J**). Todos estos cambios indican que, aunque haya células que hayan sintetizado mucílago con capacidad de absorber agua, este permanece retenido en la célula y no se libera (**Fig. 7.F**). Estas alteraciones morfológicas en las MSCs se han observado previamente en mutantes en *MUM4* y *GATL5*, que presentaron ausencia de liberación de esta estructura, probablemente por deficiencias en su síntesis (Western *et al.*, 2001; Kong *et al.*, 2011). Por otro lado, mutantes que afectan a la estructura de las pectinas, como *pmei6* que regula el grado de metilación del HG, o *bxl1* que regula el tamaño de las cadenas laterales de arabinano del RG-I, mostraron defectos en la liberación de esta estructura (Arsovski *et al.*, 2009; Saez-Aguayo *et al.*, 2013). Varios de estos trabajos han propuesto que la estructura y composición de las pectinas es clave en el proceso de liberación del mucílago, dado que podría afectar a la capacidad de hidratación de esta estructura y/o a las propiedades mecánicas de la

pared celular distal de las MSCs, regulando la presión necesaria para la correcta liberación del mucílago (Arsovski *et al.*, 2009; Saez-Aguayo *et al.*, 2013). El entender cómo modificaciones en la estructura de las pectinas pueden afectar a la capacidad de hidratación y/o a las propiedades mecánicas de la pared celular es clave, dado que ambas propiedades regulan múltiples procesos del desarrollo de las plantas.

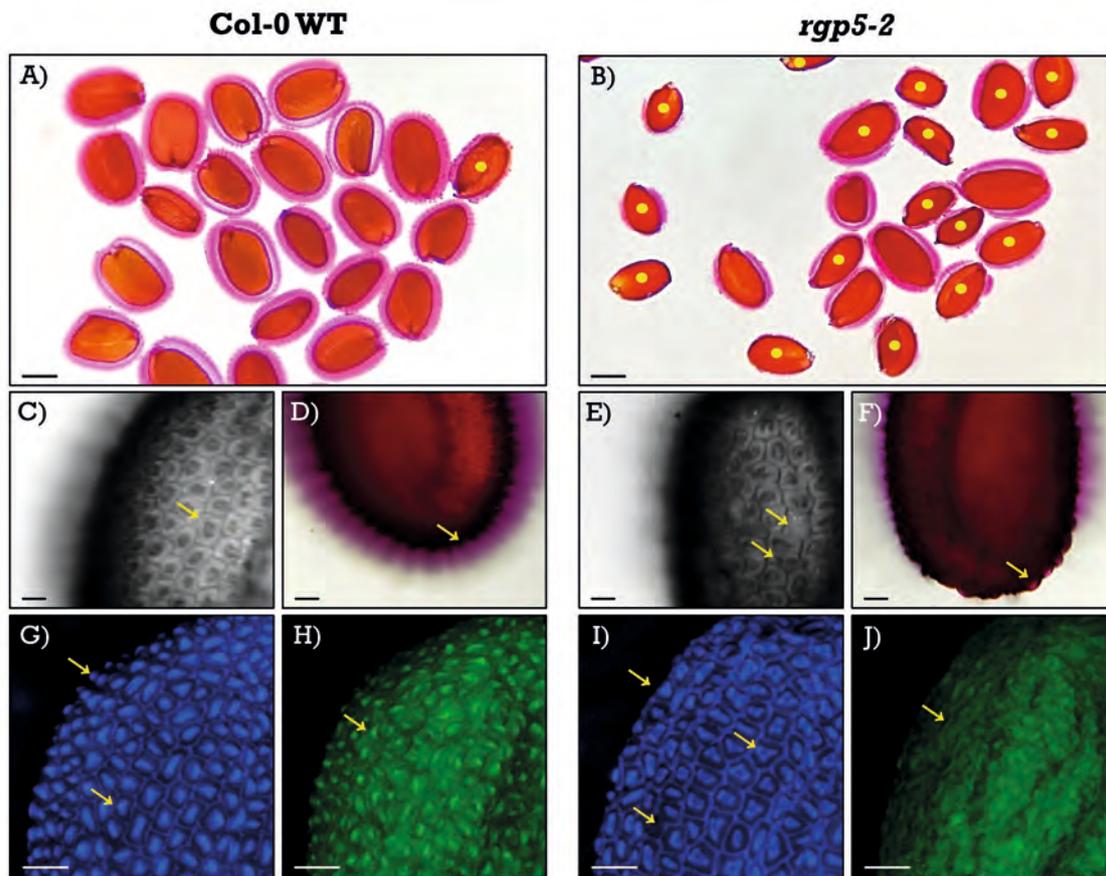


Figura 7. La línea mutante *rgp5-2* presenta defectos en el desarrollo de las MSCs y la liberación del mucílago. A-B) Tinción del mucílago adherido con rojo de rutenio de semillas (A) Col-0 WT y (B) *rgp5-2*. Se indica con un punto amarillo las semillas que muestran defectos en la liberación de mucílago. Barras de escala: 200 μ m. **C-F)** Detalle de las MSCs de las semillas (C-D) Col-0 WT y (E-F) *rgp5-2* tras la liberación del mucílago y teñidas con rojo de rutenio. Barras de escala: (C-E) 20 μ m, (D-F) 50 μ m. **G-J)** Detalle de la autofluorescencia de la superficie de las semillas de (G-H) Col-0 WT y (I-J) *rgp5-2* excitadas con luz a 400 nm (G-I) y 460 nm (H-J). Barras de escala: 50 μ m. Las flechas señalan las diferencias respecto a la morfología de las células y la columela y respecto a la liberación del mucílago.

Conclusiones

Los genes *RGP1*, *RGP2*, *RGP4* y *RGP5* se expresan en el tegumento de las semillas de *A. thaliana* en las fases de síntesis de mucílago, lo que sugiere su

implicación en este proceso. Se han seleccionado dos líneas mutantes alélicas de ADN-T para cada gen que afectan a la expresión de su gen correspondiente. Los mutantes en *RGP4* y *RGP5* presentaron defectos en la liberación del mucílago, siendo la línea *rgp5-2* la que mostró mayores defectos en esta liberación. Además, la superficie de las semillas de *rgp5-2* manifestó defectos en la morfología de las células secretoras de mucílago y en la formación de la columela. Es necesario seguir estudiando los genes *RGP* para intentar comprender mejor el rol de la Ara en la pared celular de las plantas.

Bibliografía

- Anderson, C. T. 2016. We be jammin': an update on pectin biosynthesis, trafficking and dynamics. *Journal of Experimental Botany*, 67(2):495-502.
- Arsovski, A. A., Popma, T. M., Haughn, G. W., Carpita, N. C. *et al.* 2009. *AtBXL1* encodes a bifunctional beta-D-xylosidase/alpha-L-arabinofuranosidase required for pectic arabinan modification in *Arabidopsis* mucilage secretory cells. *Plant Physiology*, 150(3):1219-1234.
- Blumenkrantz, N. y Asboe-Hansen, G. 1973. New method for quantitative determination of uronic acids. *Analytical Biochemistry*, 54(2):484-489.
- Griffiths, J. S., Šola, K., Kushwaha, R., Lam, P. *et al.* 2015. Unidirectional movement of cellulose synthase complexes in *Arabidopsis* seed coat epidermal cells deposit cellulose involved in mucilage extrusion, adherence, and ray formation. *Plant Physiology*, 168(2):502-520.
- Harholt, J., Suttangkakul, A. y Vibe Scheller, H. 2010. Biosynthesis of pectin. *Plant Physiology*, 153(2):384-395.
- Kong, Y., Zhou, G., Yin, Y., Xu, Y. *et al.* 2011. Molecular analysis of a family of *Arabidopsis* genes related to galacturonosyltransferases. *Plant Physiology*, 155(4):1791-1805.
- Kotake, T., Yamanashi, Y., Imaizumi, C. y Tsumuraya, Y. 2016. Metabolism of L-arabinose in plants. *Journal of Plant Research*, 129(5):781-792.
- Macquet, A., Ralet, M. C., Loudet, O., Kronenberger, J. *et al.* 2007. A naturally occurring mutation in an *Arabidopsis* accession affects a beta-D-galactosidase that increases the hydrophilic potential of rhamnogalacturonan I in seed mucilage. *The Plant Cell*, 19(12):3990-4006.
- Mariette, A., Kang, H. S., Heazlewood, J. L., Persson, S. *et al.* 2021. Not just a simple sugar: arabinose metabolism and function in plants. *Plant & Cell Physiology*, 62(12):1791-1812.
- Marzol, E., Borassi, C., Bringas, M., Sede, A. *et al.* 2018. Filling the gaps to solve the extensin puzzle. *Molecular Plant*, 11(5):645-658.
- Parra-Rojas, J. P., Largo-Gosens, A., Carrasco, T., Celiz-Balboa, J. *et al.* 2019. New steps in mucilage biosynthesis revealed by analysis of the transcriptome of the

- UDP-rhamnose/UDP-galactose transporter 2 mutant. *Journal of Experimental Botany*, 70(19):5071-5088.
- Rautengarten, C., Birdseye, D., Pattathil, S., McFarlane, H. E. *et al.* 2017. The elaborate route for UDP-arabinose delivery into the Golgi of plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(16):4261-4266.
- Rautengarten, C., Ebert, B., Herter, T., Petzold, C. J. *et al.* 2011. The interconversion of UDP-arabinopyranose and UDP-arabinofuranose is indispensable for plant development in *Arabidopsis*. *The Plant Cell*, 23(4):1373-1390.
- Saez-Aguayo, S. y Largo-Gosens, A. 2022. Rhamnogalacturonan-I forms mucilage: behind its simplicity, a cutting-edge organization. *Journal of Experimental Botany*, 73(11):3299-3303.
- Saez-Aguayo, S., Ralet, M. C., Berger, A., Botran, L. *et al.* 2013. PECTIN METHYLESTERASE INHIBITOR6 promotes *Arabidopsis* mucilage release by limiting methylesterification of homogalacturonan in seed coat epidermal cells. *The Plant Cell*, 25(1):308-323.
- Šola, K., Dean, G. H. y Haughn, G. W. 2019. *Arabidopsis* seed mucilage: a specialised extracellular matrix that demonstrates the structure-function versatility of cell wall polysaccharides. En *Annual Plant Reviews Online*, J.A. Roberts (Ed.) Vol 2(4):1085-1115.
- Western, T. L., Burn, J., Tan, W. L., Skinner, D. J. *et al.* 2001. Isolation and characterization of mutants defective in seed coat mucilage secretory cell development in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 127(3):998-1011.
- Winter, D., Vinegar, B., Nahal, H., Ammar, R. *et al.* 2007. An “electronic fluorescent pictograph” browser for exploring and analyzing large-scale biological data sets. *PLoS ONE*, 2(8):e718.
- Zhang, B., Gao, Y., Zhang, L. y Zhou, Y. 2021. The plant cell wall: biosynthesis, construction, and functions. *Journal of Integrative Plant Biology*, 63(1):251-272.

BAÚL DE LA CIENCIA

Sistemas bioelectroquímicos. Electrificando microorganismos

Raúl Mateos González¹

¹ Grupo de Ingeniería Química, Ambiental y Bioprocesos. Instituto I4. Universidad de León.

rmatg@unileon.es

Resumen

La electroquímica microbiana explora cómo los microorganismos interactúan con materiales conductores para catalizar reacciones electroquímicas, integrando áreas como ingeniería, ciencia de materiales y microbiología. Las tecnologías emergentes incluyen las Celdas de Combustible Microbianas (MFC) y las Celdas de Electrolisis Microbiana (MEC). Las MFC generan electricidad a partir de la degradación de materia orgánica por microorganismos, mientras que las MEC, al aplicar un potencial eléctrico, generan productos químicos como hidrógeno. Además, la Electrosíntesis Microbiana (MES) utiliza biocátodos para generar compuestos orgánicos a partir de carbono inorgánico. Los microorganismos exoelectrogénicos, como *Geobacter* y *Shewanella*, son clave en estos sistemas, empleando diversos mecanismos para el intercambio de electrones con superficie sólidas. Aunque hay desafíos en términos de costes y eficiencia, el potencial de estas tecnologías para la sostenibilidad medioambiental es significativo. Desde el descubrimiento de M.C. Potter sobre la generación de corriente por bacterias, el campo ha avanzado considerablemente, aunque aún enfrenta desafíos como la eficiencia y la escalabilidad industrial. Los sistemas bioelectroquímicos están llamados a ofrecer soluciones innovadoras y prometedoras para el tratamiento de residuos, la producción de bioelectricidad y la generación de productos químicos.

Palabras clave

Bioelectroquímica, microorganismos electroactivos, sistemas bioelectroquímicos, tecnología sostenible

1.- Introducción

La bioelectroquímica, un campo que ha despertado el interés de los científicos desde hace mucho tiempo, estudia la interacción entre materiales conductores y microorganismos vivos (Potter, 1911; Schröder *et al.*, 2015). Los científicos

dedicados a la investigación fundamental llevan mucho tiempo interesados en este campo, y en este siglo XXI la implicación de la investigación aplicada junto a la ingeniería han promovido un número creciente de sistemas denominados técnicamente “tecnologías electroquímicas microbianas” (MET, por sus siglas en inglés) o “sistemas bioelectroquímicos” (BES, por sus siglas en inglés) (Schröder *et al.*, 2015). Este entrelazamiento de ingeniería, electroquímica, ciencia de materiales y microbiología abre un amplio y multidisciplinar campo de investigación y desarrollo tecnológico que ha crecido rápidamente en los últimos años. Otras disciplinas, como la bioquímica, la física o la modelización matemática, también han mostrado un interés creciente por los BES en los últimos años, lo que ha dado lugar a un número cada vez mayor de aplicaciones (Wang y Ren, 2013). Todas estas aplicaciones comparten un principio básico según el cual los microorganismos interactúan electroquímicamente con una superficie conductora sólida (electrodo) para catalizar una reacción bioquímica, que puede ser oxidante o reductora en función del potencial eléctrico del electrodo. La bioelectroquímica en sí es una rama de la electroquímica que se dedica al estudio de fenómenos electrofisiológicos. Esto abarca el transporte de electrones y protones en las células, los potenciales de membrana y las reacciones electroquímicas en las que intervienen los microorganismos. Este campo tiene aplicaciones cruciales en diversas disciplinas, como la tecnología del medio ambiente, la química sintética, la electrofisiología, la ingeniería biomédica o la cinética enzimática. De hecho, los avances en bioelectroquímica han tenido un impacto significativo en la tecnología, la medicina y la biología. Los sistemas BES ya han sido tratados en el ámbito de Ambociencias desde un punto de vista de sus aplicaciones (Vega González, 2023). Este artículo expondrá sus fundamentos, así como los últimos avances y sus retos y potenciales futuros.

2.-Historia y configuración de los sistemas bioelectroquímicos

La historia de los BES comenzó hace más de un siglo, cuando M.C. Potter descubrió que ciertas bacterias son capaces de generar corriente eléctrica asociada a la degradación de materia orgánica (Potter, 1911). Potter en concreto realizó un estudio sobre los efectos eléctricos que acompañan a la fermentación o putrefacción bajo la influencia de microorganismos como *Saccharomyces* u otras bacterias. Tras ese trascendental descubrimiento, sólo unos pocos trabajos exploraron esta observación hasta finales de los años 90 y principios de los 2000, cuando se emprendió la investigación sobre las pilas de combustible microbianas (Microbial Fuel Cells, MFC) con un renovado interés (Liu *et al.*, 2004). Normalmente, una MFC consta de dos electrodos: un ánodo y un cátodo (**Fig. 1**). El ánodo está colonizado por microorganismos y suele estar separado del cátodo por una membrana de intercambio iónico, de forma que los electrolitos de las cámaras catódica y anódica no se mezclen permitiendo a su vez el intercambio de iones. En el ánodo, las bacterias electroactivas degradan generalmente materia orgánica para producir electrones, protones y carbono inorgánico. Los protones y los electrones

se transfieren al cátodo (a través de la membrana de intercambio iónico y de un circuito eléctrico externo, respectivamente), donde suelen reaccionar con el oxígeno para formar agua (Rabaey y Verstraete, 2005). Las MFCs están por tanto enfocadas principalmente a la generación de energía eléctrica que es producida por esa circulación de electrones del ánodo al cátodo, aunque también cumplen el propósito de degradar materia orgánica como una alternativa a la depuración de residuos orgánicos. A pesar de tener el potencial para cumplir esta doble función, las MFC aún no han superado la escala piloto, pero la producción de energía eléctrica en estos sistemas ha aumentado drásticamente durante los últimos años desde unos pocos mW/m^2 de electrodo, hasta más de $2,7 \text{ W}/\text{m}^2$, demostrando ser capaces de alimentar iluminación o pequeños dispositivos electrónicos en aplicaciones prácticas de campo reales (Ieropoulos *et al.*, 2016).

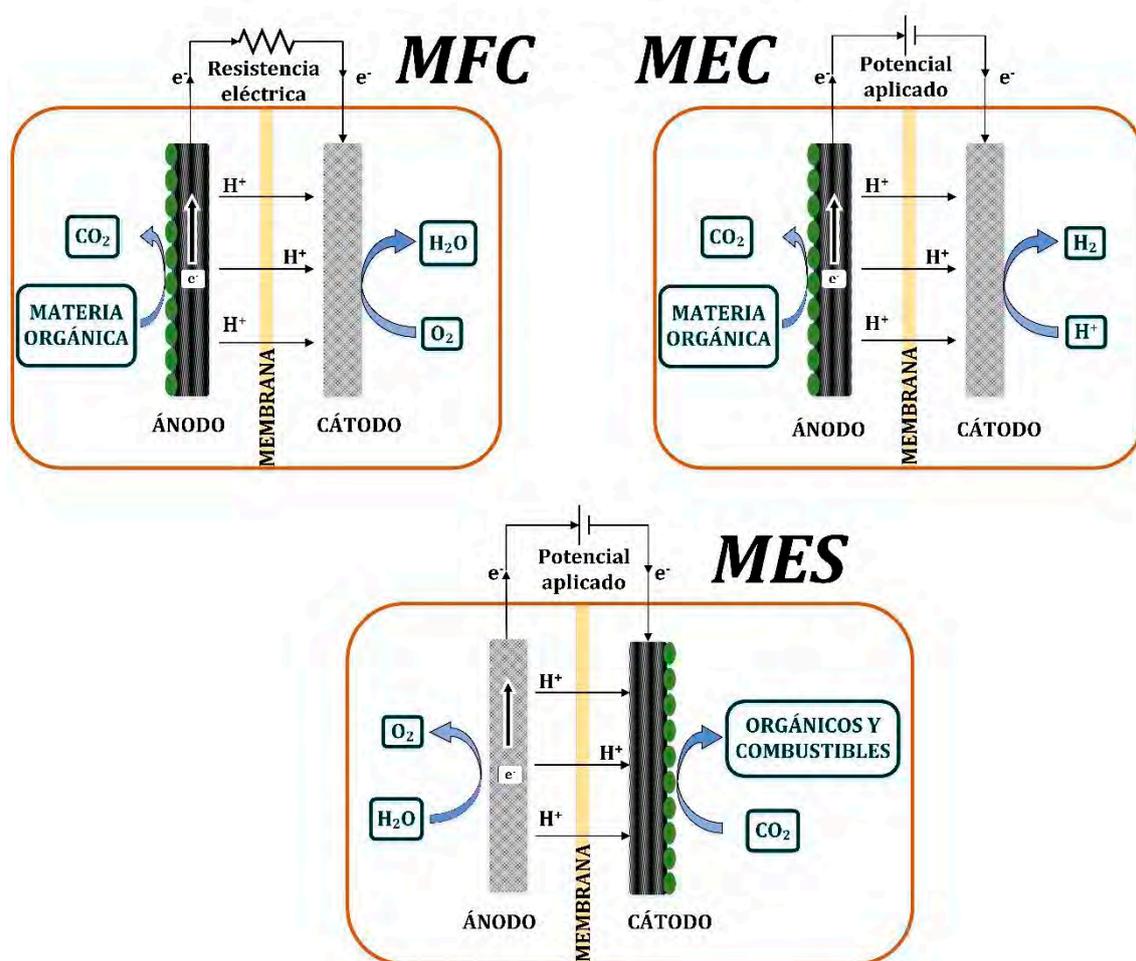


Figura 1. Esquema de configuración de reactores tipo MFC, MEC y MES y reacciones comunes en sus cámaras.

Alrededor de 2005 se descubrió que un sistema MFC, además de ser operado en forma de pila para generación eléctrica, podía funcionar en una configuración electrolítica aplicando un potencial forzado, dando lugar al concepto de Celdas de Electrolisis Microbiana (MECs, por sus siglas en inglés) (Escapa *et al.*, 2016). Las MECs abrieron la oportunidad de recuperar energía en forma de productos químicos en lugar de como electricidad, siendo el hidrógeno quizás el producto más popular. En las MECs los microorganismos electroactivos generan electrones a partir de la oxidación de materia orgánica como en las MFCs; sin embargo, estos electrones son forzados a viajar hacia el cátodo por un potencial eléctrico aplicado donde se recombinan con protones para producir hidrógeno (**Fig. 1**). Además, la capacidad reductora del cátodo puede utilizarse para otros fines prácticos como la recuperación de metales, la reducción de sulfatos o la producción de peróxido de hidrógeno. Los desarrollos tecnológicos de MEC se han centrado principalmente en el diseño de sistemas para el tratamiento eficiente de residuos orgánicos combinado en paralelo a la producción de hidrógeno gaseoso. Además, se han probado prototipos piloto de hasta 1000 L que demuestran su viabilidad para futuras aplicaciones prácticas (Isabel San-Martín *et al.*, 2018).

En las MFCs y MECs no sólo la reacción anódica sino también la catódica puede ser bio-catalizada. Cuando el cátodo está catalizado biológicamente se suele denominar biocátodo, y fue Rozendal junto a sus colaboradores en 2007 quien operó un biocátodo (invirtiendo el potencial de un bioánodo) por primera vez. Esto abrió un nuevo campo en los BES, y rápidamente surgieron nuevas aplicaciones para los biocátodos. Así, en 2009 Clauwaert y Verstraete operaron un biocátodo diseñado específicamente para la producción de metano y poco después, en 2010, Nevin y colaboradores demostraron la generación de compuestos orgánicos a partir de carbono inorgánico dando lugar al concepto de Electrosíntesis Microbiana (MES, por sus siglas en inglés). Los compuestos orgánicos producidos más comúnmente en el biocátodo de estos sistemas son los ácidos grasos de cadena corta, como el acético o el butírico, los alcoholes, como el etanol y el butanol, y gases combustibles, como el metano. En general la MES combina ese biocátodo con un ánodo puramente químico en el que se lleva a cabo la electrolisis de agua, lo que genera oxígeno puro como subproducto (figura 1). La MES representa una tecnología de mayor novedad que las MFC y MEC, que ofrece un amplio abanico de oportunidades en diferentes campos industriales pero que también presenta un cierto número de problemas técnicos que deben ser superados antes de lograr su aplicación práctica (Mateos González, 2018).

3.-Microbiología de los sistemas bioelectroquímicos

Las BES se basan en microorganismos exoelectrogénicos o electroactivos que pueden transferir electrones fuera de sus células, facilitando la generación de electricidad mediante la transferencia extracelular de electrones (EET), una vía respiratoria clave en estos microorganismos tan particulares. Estos microbios interactúan con otras diversas especies, minerales y aceptores o donantes

de electrones, incluidos los electrodos sólidos, para llevar a cabo su metabolismo (Thengumthottathil *et al.*, 2024). La bioelectroquímica simplemente aprovecha este fenómeno para construir los reactores expuestos en la **figura 1** de forma que se obtenga un beneficio deseado.

Los exoelectrónenos están muy extendidos en entornos como el suelo, las masas de agua, el compost, los sedimentos y condiciones extremas como las regiones polares, los ambientes extremadamente salinos o los volcanes. De hecho, cualquier cultivo bacteriano natural es susceptible de contener este tipo de microorganismos y de poder ser enriquecido y seleccionado para inocular un reactor bioelectroquímico. Sin embargo, identificar y cuantificar los microorganismos electroactivos es un reto debido a la ausencia de marcadores genéticos universales. Los investigadores utilizan el aislamiento de cultivos puros o la secuenciación de ADN y ARN para la identificación y, hasta ahora, se han identificado por encima de los 100 microorganismos electroactivos en todos los ámbitos de la vida, aunque se estima que son solo una pequeña parte de los microorganismos electroactivos existentes.

Los BES también albergan microorganismos no electrónenos, que desempeñan un papel crucial en la mejora del rendimiento del sistema a través de sinergias entre microorganismo, principalmente cuando los sustratos o productos son moléculas complejas (Thengumthottathil *et al.*, 2024). Estas interacciones pueden mejorar la generación de energía y la eficiencia de las MFC y MEC o la generación de orgánicos y combustibles en las MES. A pesar de ello, la literatura actual no ha desentrañado aún de forma exhaustiva la dinámica de las comunidades microbianas en los BES. Comprender las relaciones entre los microorganismos en las BES es vital, ya que impulsan los procesos bioelectroquímicos. En concreto, un factor clave para estos sistemas son los mecanismos de EET y las estrategias para mejorar la EET mediante la manipulación de las comunidades microbianas.

3.1.- Mecanismos de transferencia de electrones (Thengumthottathil et al., 2024)

Los microorganismos electroactivos suelen agruparse por parentesco entre ellos, aunque no se ha establecido una correlación directa entre los mecanismos de EET y este parentesco. Los exoelectrónenos más estudiados como *Geobacter metallireducens* y *G. sulfurreducens* pueden funcionar como electrónenos o electrótrofos, es decir tomando o cediendo electrones al entorno, dependiendo de las condiciones ambientales. La respiración electroactiva implica el movimiento de electrones desde el interior de la célula hasta el electrodo. Para llevar esto a cabo, los microorganismos electroactivos utilizan proteínas especializadas y citocromos para facilitar la transferencia de electrones. Sin embargo, se necesitan mecanismos adicionales, como hilos de proteínas conductoras o mediadores de transporte de electrones, para reducir los aceptores de electrones sólidos. Estos microorganismos pueden crecer en forma planctónica (en suspensión) o de biofilm (sobre una superficie sólida), y los géneros formadores de biofilm como

Geobacter y *Shewanella* transfieren electrones mediante transferencia directa de electrones (DET) o a través de nanowires, que son pequeños apéndices conductores que utilizan para literalmente “conectarse” (Fig. 2). Las *Shewanella spp.* planctónicas, por su parte, utilizan compuestos químicos como portadores de esos electrones para la EET.

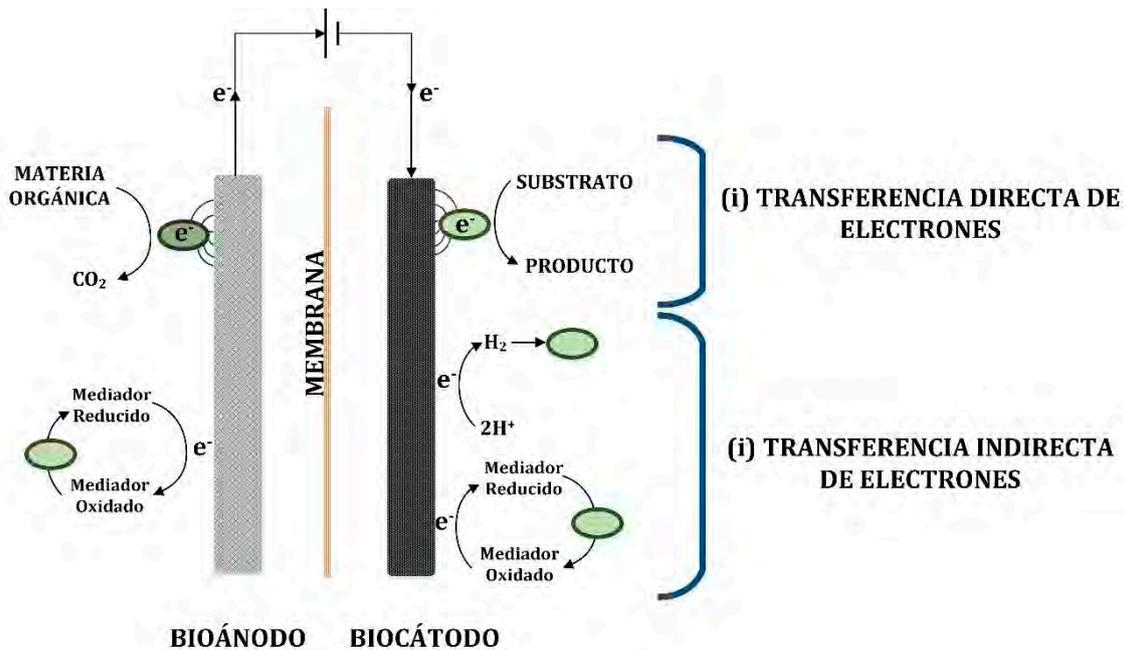


Figura 2. Ejemplo de mecanismos de transferencia de electrones.

La DET implica que partes de la membrana externa, como los citocromos, entren en contacto físico con los electrodos sólidos. Este mecanismo ha sido bien estudiado en los géneros *Geobacter* y *Shewanella*, donde varios citocromos de tipo c están implicados en ese transporte de electrones.

Los nanowires, que son extensiones filamentosas de la membrana externa, a modo de cable, pueden establecer conexiones de largo alcance para la transferencia de electrones. *Geobacter* y *Shewanella* pueden transferir electrones a decenas de micras, mientras que otras bacterias como *Lysinibacillus varians* pueden transportar electrones a centímetros. Los nanowires contribuyen a mejorar la conductividad del biofilm, mejorando el rendimiento de los BES.

Para la EET de largo alcance, los cultivos de microorganismos electroactivos en suspensión utilizan moléculas solubles, como flavinas y quinonas, como transportadores de electrones. Esto se denomina transferencia de electrones indirecta (IET por sus siglas en inglés) y microorganismos como *Pseudomonas sp.* o *Shewanella oneidensis* han demostrado ser capaces de intercambiar electrones por esta vía. Estos compuestos pueden ser producidos por el microorganismo o añadidos artificialmente en el medio, y permiten la transferencia de electrones entre las células y los electrodos en estos casos. Los mediadores propios de los

microorganismos incluyen flavinas, riboflavinas y pirocianinas, mientras que los mediadores externos como la resazurina y el azul de metileno también pueden mejorar dicho transporte.

3.2.- Estructura y dinámica de la comunidad microbiana

La investigación sobre BES ha explorado diversas fuentes de inóculo, revelando tendencias clave en la estructura y dinámica de la comunidad microbiana a lo largo del tiempo. Varios factores, como el tipo de sustrato, el tipo de inóculo, las variaciones de potencial aplicado, la resistencia externa, los niveles de oxígeno disuelto o la temperatura, influyen de forma importante en las comunidades microbianas de las BES (Logan *et al.*, 2019). Por ejemplo, las especies de *Geobacter* tienden a dominar los biofilms en bioánodos cuando el sustrato es el acetato, mientras que otros reactores, como los biocátodos metanogénicos de una MES, pueden incluso tender a estar dominados por arqueas como *Methanobacterium*. En cualquier caso, con el medio y las condiciones de crecimiento adecuados, muchos otros microorganismos, desde las levaduras comunes hasta los extremófilos (microorganismos adaptados a condiciones extremas) también pueden generar altas densidades de corriente. Los microorganismos electrotrofos que crecen utilizando electrones de un cátodo son menos diversos y no tienen grandes rasgos comunes, y las densidades de corriente suelen estar muy por debajo de las registradas para los exoelectrógenos que crecen en ánodos. Sin embargo, los microorganismos electrotrofos pueden utilizar dióxido de carbono como fuente de carbono lo que permite una variedad de reacciones novedosas impulsadas por el cátodo así como la propia captura del CO₂ que es interesante en sí misma. La impresionante diversidad de microorganismos electroactivos y las condiciones en las que funcionan ofrecen una estructura y dinámica en muchos casos única para cada reactor o sistema. En cualquier caso, comprender la estructura y la dinámica de las comunidades microbianas es esencial para entender los procesos bioquímicos y la actividad electroquímica en los BES para cada una de sus aplicaciones (Logan *et al.*, 2019).

4.- Retos y perspectivas de los sistemas bioelectroquímicos

Hasta el momento actual, los BES se han planteado como una tecnología prometedora para la producción de bioelectricidad, el tratamiento de residuos o la fijación de CO₂ (Ivase *et al.*, 2020). Sin embargo, a pesar de las prometedoras aplicaciones de las BES, su eficiencia y escalabilidad se ven obstaculizadas por varios retos. Además, en su mayor parte, los BES se han quedado en la escala de laboratorio o han llegado como mucho a escala piloto, quedando en incógnita su salto a la escala industrial real. A modo de ejemplo, la transferencia de electrones no está totalmente optimizada, lo que afecta la eficiencia global. Además, es crucial identificar y mantener comunidades microbianas eficaces para un rendimiento sostenido en el tiempo. El elevado coste y la limitada disponibilidad de materiales de electrodo adecuados representan barreras significativas. Asimismo,

el rendimiento de los BES puede verse afectado por las condiciones ambientales y la especificidad del sustrato. Por otra parte, para los reactores construidos en dos cámaras, el ensuciamiento y la degradación de las membranas pueden reducir tanto la eficiencia como la vida útil del sistema. Varios estudios ponen de relieve que la eficacia de los sustratos en los BES varía en función de la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos, y que los costes influyen en la viabilidad del proceso. Los sustratos incluyen azúcares simples, celulosa y opciones químicas, pero los lixiviados de vertedero y las aguas residuales plantean riesgos para la salud y el medio ambiente. El uso de sustratos basados en alimentos es controvertido debido a los debates sobre el uso de alimentos como combustible. Los materiales de los electrodos de los BES necesitan una conductividad, una superficie y una estabilidad elevadas, pero materiales costosos como el grafito y el platino, que son los más adecuados técnicamente, limitan la escalabilidad y la viabilidad. Las membranas utilizadas para separar las cámaras, por su parte, se enfrentan a problemas como la permeabilidad reducida a los protones, la pérdida de sustrato y el *biofouling*, lo que crea barreras técnicas. Entre los retos relacionados con los propios microorganismos figuran la necesidad de bacterias específicas, con cultivos mixtos específicos que complican la producción de energía y el consumo de sustrato. La sensibilidad a la temperatura también afecta a la eficiencia y la vida útil, ya que las bajas temperaturas ralentizan las reacciones bioelectroquímicas. Y en general, la falta de conocimientos exhaustivos sobre los microbios en entornos BES no tradicionales dificulta el escalado y la optimización (Ivase *et al.*, 2020).

Por otra parte, estos retos no hacen desaparecer las buenas perspectivas de las BES. Estas tecnologías tienen un gran potencial para diversas aplicaciones, como la generación de bioelectricidad a partir de residuos orgánicos, el tratamiento de aguas residuales mediante la descomposición de contaminantes orgánicos y la producción de electricidad, la producción de biohidrógeno como combustible limpio alternativo, o su uso en biosensores y remediación medioambiental para detectar y limpiar contaminantes. Para maximizar su potencial, es necesario seguir investigando en áreas como la mejora de la eficiencia mediante nuevos materiales y optimización de comunidades microbianas, la escalabilidad para aplicaciones industriales sin perder eficiencia, la reducción de costes con materiales y procesos más económicos, y una comprensión más profunda de los procesos microbianos y electroquímicos para innovar y mejorar los diseños de los sistemas.

En este sentido existen numerosos estudios que han demostrado que existen bacterias que pueden producir mayores corrientes eléctricas o que ofrecen mayores productividades de productos químicos sostenibles. La producción de biohidrógeno BES también es factible utilizando sustratos renovables como las aguas residuales, con o sin el empleo costosas membranas convirtiéndolas en bioenergía y bioproductos. También han probado ser eficaces para la valorización de residuos de biomasa y la biorremediación de metales pesados. En biosensores, las MFC se utilizan para detectar toxicidad de diversos compuestos, cuya lista

se amplía mes a mes con nuevos trabajos de investigación, con aplicaciones por ejemplo en el control de la calidad del agua de consumo. Y para finalizar, los BES tienen una aplicación clara en el campo de la fijación del CO₂ ya que se han identificado numerosos microorganismos electroactivos con capacidad de fijación de CO₂ y producción de biocombustibles y otros compuestos orgánicos a partir de él. En esta aplicación existe un número considerable de trabajos científicos en los últimos años representando quizá la aplicación con mayor crecimiento actual dentro de los BES.

En concreto, recientemente, estos sistemas han contribuido al cambio de paradigma en el concepto energía-agua-nutrientes principalmente por su sinergia con la digestión anaerobia y el tratamiento de aguas, permitiendo la interrelación de estas tecnologías (Jadhav *et al.*, 2024). También ha cobrado impulso reciente la generación de bioproductos en sistemas BES como una alternativa tangible (Singh *et al.*, 2024). O para finalizar en su aplicación como biosensores de alta especificidad (Jayaraj *et al.*, 2024).

Por último, estos sistemas no son ajenos a la investigación de nuestro país. Existen varios grupos de regiones diferentes de España en la cúspide de la tecnología BES, liderando proyectos como el proyecto GAIA para la generación de combustibles renovables con la implicación de la U. de Girona, el proyecto VIVALDI liderado por la U. Autónoma de Barcelona dedicado a la transformación de gases residuales en materias primas para la industria química, o el proyecto ATEM para la integración de los BES con la digestión anaerobia desarrollado en nuestra Universidad de León.

5.-Conclusión

Los sistemas bioelectroquímicos representan una prometedora opción como tecnología sostenible y ligada a los campos del medio ambiente, los biocombustibles o la generación de energía eléctrica. Aunque siguen planteando problemas, la investigación y los avances tecnológicos en curso podrían resolverlos, allanando el camino para su adopción generalizada y su integración en las infraestructuras existentes de gestión de la energía y los residuos añadiendo valor a la cadena. Los microorganismos electroactivos por su parte representan un grupo muy interesante y particular dentro de su reino, que tienen el potencial de transformar la visión dentro de los procesos electroquímicos tradicionales. En definitiva, el potencial de los BES para contribuir a la producción de energía limpia y a la sostenibilidad medioambiental los convierte en un área de estudio fundamental para futuras innovaciones en una amplia diversidad de aplicaciones.

Bibliografía

Escapa, A., Mateos, R., Martínez, E. J. y Blanes, J. 2016. Microbial electrolysis cells: An emerging technology for wastewater treatment and energy recovery. From laboratory to pilot plant and beyond. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55:942-956. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.029>

- Ieropoulos, I. A., Stinchcombe, A., Gajda, I., Forbes, S., Merino-Jimenez, I., Pasternak, G., Sanchez-Herranz, D. y Greenman, J. 2016. Pee power urinal? microbial fuel cell technology field trials in the context of sanitation. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 2:336-343. <https://doi.org/10.1039/C5EW00270B>
- Isabel San-Martín, M., Mateos, R., Carracedo, B., Escapa, A. y Morán, A. 2018. Pilot-scale bioelectrochemical system for simultaneous nitrogen and carbon removal in urban wastewater treatment plants. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126(6):758-763. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.06.008>
- Ivase, T. J. P., Nyakuma, B. B., Oladokun, O., Abu, P. T. y Hassan, M. N. 2020. Review of the principal mechanisms, prospects, and challenges of bioelectrochemical systems. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 39:13298. <https://doi.org/10.1002/EP.13298>
- Jadhav, D. A., Yu, Z., Hussien, M., Kim, J. H., Liu, W. *et al.* 2024. Paradigm shift in Nutrient-Energy-Water centered sustainable wastewater treatment system through synergy of bioelectrochemical system and anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 396:130404. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2024.130404>
- Jayaraj, K. K., Pendse, V. V., Bhowmick, G. D., Das, I. y Zekker, I. 2024. Advancements in the application of bioelectrochemical systems-based sensors. *Advances in Environmental Electrochemistry*, Ed. Elsevier, pp. 197-216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18820-6.00002-3>
- Liu, H., Ramnarayanan, R. y Logan, B. E. 2004. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*, 38:2281-2285. <https://doi.org/10.1021/ES034923G>
- Logan, B. E., Rossi, R., Ragab, A. y Saikaly, P. E. 2019. Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. *Nature Reviews Microbiology*, 17:307-319. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0173-x>
- Mateos González, R. 2018. Contributions towards practical application of microbial electrosynthesis. Tesis doctoral. Universidad de León.
- Potter, M. C. 1911. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B*, 84:260-276. <https://doi.org/10.1098/RSPB.1911.0073>
- Rabaey, K. y Verstraete, W. 2005. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23:291-298. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.008>
- Schröder, U., Harnisch, F. y Angenent, L. T. 2015. Microbial electrochemistry and technology: terminology and classification. *Energy and Environmental Science*, 8:513-519. <https://doi.org/10.1039/C4EE03359K>
- Singh, N.K., Mathuriya, A.S., Mehrotra, S., Pandit, S., Singh, A., Jadhav, D., 2024. Advances in bioelectrochemical systems for bio-products recovery. *Environment*

and Technology 45, 3853–3876. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2234676>

Thengumthottathil, V., Ponnusamy, K. y Naina Mohamed, S. 2024. Bioelectrochemical systems: Exploring microbial communities, interactions, and electron transfer. *Biochemical Engineering Journal*, 211:109442. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2024.109442>

Vega González, M. 2023. Aplicaciones de las celdas de combustible microbiano. *Ambio-ciencias* 20:55-68.

Wang, H. y Ren, Z. J. 2013. A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology. *Biotechnology Advances*, 31:1796-1807. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2013.10.001>

Selección de hábitat: comprendiendo las causas del movimiento animal

Zaida Ortega¹

¹ Dpto. de Biodiversidad y Gestión Ambiental, Área de Zoología, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24071, León
zortd@unileon.es

Resumen

El movimiento de los animales determina la eficacia biológica de los individuos, y la composición de poblaciones, comunidades y ecosistemas, condicionando también fenómenos como la transmisión de enfermedades y parásitos, la polinización o la dispersión de semillas. Por eso es clave comprender las causas y consecuencias del movimiento animal. Este artículo pretende ser una introducción para quien quiera trabajar en movimiento animal, y, más concretamente, en selección de hábitat. Para ello, he resumido el marco teórico de la ecología del movimiento y sus principales métodos y temáticas de estudio: análisis de trayectorias, estudio de los patrones de movimiento y las áreas de campeo y selección de hábitat. A continuación, explico el marco teórico de la selección de hábitat, ilustrando los principales métodos de estudio con algunos estudios de caso específicos sobre reptiles y mamíferos. Al final, discuto las principales ventajas de cada método de estudio en selección de hábitat.

Palabras clave

Comportamiento animal, conservación, ecología del movimiento, selección de recursos, telemetría, Zoología

Introducción

Podemos definir el movimiento de un organismo como el cambio en la localización espacial del individuo –al completo– a lo largo del tiempo. La localización normalmente consiste en un par de coordenadas espaciales (X o longitud, Y o latitud), aunque también puede incorporar la altura o profundidad (Z). El movimiento determina la eficacia biológica de los individuos, y la estructura y dinámica de las poblaciones, comunidades y ecosistemas, condicionando, en última instancia, la evolución y la diversidad de la vida en la Tierra (Nathan et al., 2008).

Hasta finales del s. XX, al estudiar las poblaciones animales, se abordaban el tiempo y el espacio por separado. Por ejemplo, era común estudiar bien la distribución de una especie –en un momento concreto– o bien su abundancia a lo largo

del tiempo –para un lugar determinado. Estudiar el movimiento animal supone integrar la escala espacial y la temporal. Esto aumenta la complejidad de los métodos de estudio, pero mejora nuestra comprensión de los procesos ecológicos (Turchin, 1998). Así, el estudio del movimiento animal proporciona un nexo –buscado por el personal científico durante mucho tiempo– entre el comportamiento animal, la ecología del paisaje y la ecología de poblaciones (Hooten *et al.*, 2017).

Dado que muchos animales son difíciles de observar o residen en áreas inaccesibles, estudiar su movimiento mediante la observación directa sería muy costoso y, a menudo, directamente imposible. Por suerte, la telemetría ha revolucionado el estudio del movimiento animal. En las últimas décadas se ha avanzado mucho, tanto en los métodos de recolección de datos como en nuevos y sofisticados métodos de análisis del movimiento animal (Hooten *et al.*, 2017). Además, se ha desarrollado un marco teórico unificador denominado “ecología del movimiento” (Nathan *et al.*, 2022). Cada vez somos más conscientes de la importancia de estudiar las interrelaciones entre la heterogeneidad ambiental y el movimiento de los organismos para comprender las dinámicas ecológicas y mejorar la gestión de las especies animales (Katzner y Arlettaz, 2020). Esto convierte al estudio del movimiento animal en una herramienta clave para la conservación de la fauna amenazada. Uno de los principales temas de estudio sobre el movimiento animal es la selección de hábitat, que permite comprender cómo toman los animales sus decisiones sobre hacia dónde moverse (Hooten *et al.*, 2017). Además, conocer qué hábitats seleccionan o evitan las diferentes especies permite mejorar la gestión de los espacios naturales (Thurfjell *et al.*, 2014).

Este artículo pretende resumir los conceptos y métodos de estudio esenciales de la selección de hábitat, así como sus aplicaciones para la gestión de fauna, ilustrados con algunos casos de estudio para facilitar su comprensión. Para ello, es esencial hacerse una idea de en qué consiste la ecología del movimiento. Por eso, comenzaré explicando el marco conceptual del movimiento animal y los temas de investigación más relevantes. Después, pasaré a centrarme en la selección de hábitat, introduciendo los principales conceptos y métodos, que desarrollaré a través de estudios de caso específicos. Por último, discutiré la relevancia de la selección de hábitat para comprender el comportamiento animal –identificando los principales desafíos y temas de investigación actuales– y sus aplicaciones en la gestión y conservación de fauna.

Marco teórico de la ecología del movimiento

Nathan y colaboradores (2008) establecieron el marco conceptual de la ecología del movimiento, que permite formular hipótesis para comprender las causas, las consecuencias, los mecanismos subyacentes y los patrones espacio-temporales que emergen durante el fenómeno del movimiento. Para ello, formularon cuatro preguntas esenciales: (1) ¿por qué moverse?, (2) ¿cómo moverse?, (3) ¿cuándo y a dónde moverse?, y (4) ¿cuáles son las consecuencias ecológicas y evolutivas del movimiento?

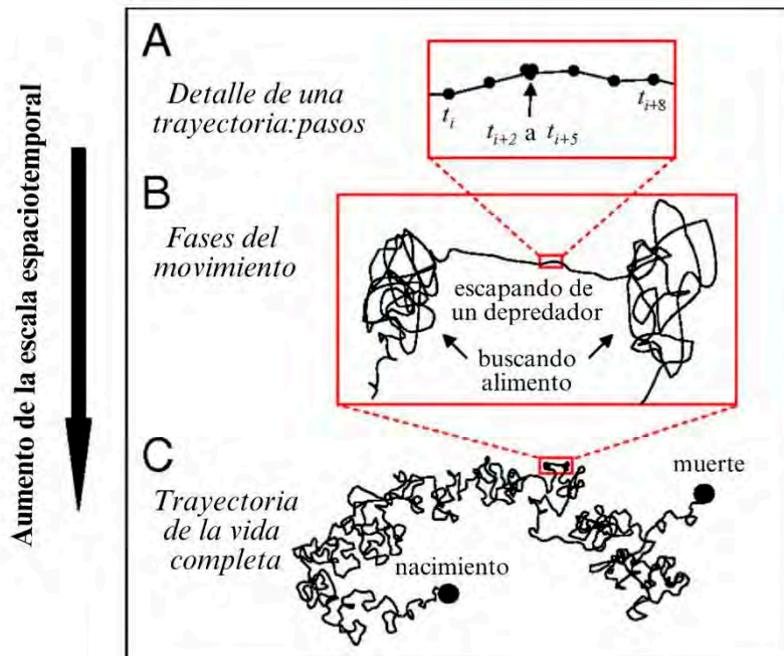


Figura 1. La trayectoria (secuencia temporal de pasos o localizaciones de un individuo) es el principal objeto de análisis para comprender el movimiento. En la figura se muestra una trayectoria ficticia de un animal a tres escalas fundamentales: (A) un desplazamiento corto con cinco pasos y una parada, (B) una trayectoria más larga en la que podemos diferenciar tres fases del movimiento (busca alimento - escapa de un depredador - busca alimento), y (C) la trayectoria que podría mostrar el individuo a lo largo de toda su vida. Figura tomada y traducida de Nathan *et al.* (2008).

Un desafío importante al abordar estas cuestiones reside en averiguar las causas (tanto inmediatas como evolutivas) responsables de las **trayectorias** que obtenemos a partir de los datos de telemetría, que habitualmente es nuestra variable respuesta. ¿Y qué es una trayectoria? Pues no es otra cosa que una secuencia temporal de localizaciones de un individuo (**Fig. 1**). La trayectoria es el registro que tenemos del movimiento del animal, y como tal podemos dividirla en partes funcionales de ese movimiento. Para comprender las partes funcionales de una trayectoria hemos de comprender su estructura, ya que refleja los procesos básicos que la producen. La unidad funcional básica de una trayectoria animal sería una **fase del movimiento**, donde se refleja algún objetivo funcionalmente relevante para el animal, como huir de un depredador o buscar alimento (**Fig. 1B**). Si disponemos de datos de movimiento con la suficiente resolución, el principal desafío sería comprender los factores que determinan las diferentes fases del movimiento (en el ejemplo de la **Fig. 1B**, trataríamos de comprender qué factores llevan al animal a buscar alimento o huir de un depredador en un momento determinado y de la manera observada en la trayectoria). La trayectoria de la vida completa de un animal puede consistir en fases del movimiento repetidas a diferentes frecuencias, que dan como resultado diferentes **fenómenos**

de movimiento, como, por ejemplo: el forrajeo, el aprendizaje, las migraciones estacionales, o la dispersión (Fryxell *et al.*, 2008). Por lo tanto, para comprender la jerarquía funcional que subyace en la trayectoria completa de la vida de un individuo necesitamos investigar los mecanismos y patrones de movimiento a través de múltiples escalas espaciotemporales (Nathan *et al.*, 2008). Jeltsch y colaboradores (2013) establecen tres escalas espaciotemporales del movimiento: (1) movimientos locales (forrajear, territorialidad), (2) movimientos a media escala (dispersión), (3) movimientos a larga distancia (migración y nomadismo).

Para comprender las causas y consecuencias del movimiento animal, podemos pensar en cuatro **componentes básicos** que condicionan la trayectoria: (1) factores de estado interno, (2) capacidad motriz, (3) capacidad de navegación y (4) factores externos al animal (**Fig. 2**). Las tres primeras están relacionadas con el individuo y la cuarta con el entorno. Así, las trayectorias observadas resultarían de dinámicas interactivas de estas cuatro componentes básicas, aunque no todas tienen que estar presentes en todos los tipos de movimiento.



Figura 2. Esquema del marco conceptual de la ecología del movimiento, establecido en Nathan *et al.* (2008) (recuadro amarillo). En él se muestran las relaciones entre las cuatro componentes básicas (factores de estado interno, capacidad motriz, capacidad de navegación y factores externos) y sus efectos sobre la trayectoria (que es lo que observamos). En los rectángulos de otros colores, se muestra el tipo de datos que se pueden obtener actualmente gracias a sensores remotos y que nos ayudan a comprender el efecto de las diferentes componentes, así como las causas y consecuencias, del proceso del movimiento animal. Imagen realizada a partir de Nathan *et al.*, 2008 y Nathan *et al.*, 2022.

La **componente de estado interno** (**Fig. 2**) respondería a la pregunta ¿por qué moverse?, por ejemplo, para obtener energía (p. ej. alimentación), para obtener seguridad (p.ej. huir de un depredador), para aprender (p. ej. seguir a individuos adultos) o para reproducirse (p. ej. buscar una pareja reproductora). Así, la componente de estado interno consistiría en un vector multidimensional formado por múltiples estados que expliquen el objetivo por el que un animal se mueve (Nathan *et al.*, 2008). La segunda componente es la **capacidad motriz** (**Fig. 2**), que responde a la cuestión ¿cómo moverse?,

reflejando la capacidad de locomoción del animal en cuestión. La capacidad de locomoción depende de las propiedades biomecánicas, bien del animal (p. ej. vuela, corre, nada, salta) o de un vector (si es desplazado pasivamente por otro animal o soporte móvil). Excepto en animales con metamorfosis, la maquinaria motriz es similar a lo largo de la vida de un animal. No obstante, su rendimiento puede variar dependiendo de factores de estado interno o de factores externos al animal (p. ej. aumentar la velocidad para atrapar una presa, o desplazarse más despacio o más deprisa cuando hace mucho calor). La tercera componente es la **capacidad de navegación**, que incluye la habilidad de orientarse en el tiempo y en el espacio, y la selección del inicio y fin del movimiento, así como la dirección y sentido. La capacidad de navegación responde, por lo tanto, a la pregunta de “¿cuándo y hacia dónde moverse?” (**Fig. 2**). Esta componente requiere sentir y responder a la información de la estructura espaciotemporal del entorno (incluyendo la presencia de otros individuos), para lo que las diferentes especies dependen de su repertorio sensorial y cognitivo (p. ej. detectar señales químicas de un depredador, orientarse hacia un lugar más cálido o seguir una ruta de migración fijada genéticamente). La cuarta componente son los **factores externos** al individuo que se está moviendo, que pueden ser bióticos (p. ej. presión de depredación, cantidad de potenciales parejas reproductivas, competencia intraespecífica) o abióticos (p. ej. la composición y estructura del sustrato en que se desplaza el animal, o las condiciones de temperatura, humedad o presencia de viento en hábitats terrestres). El marco conceptual integra las relaciones entre estas cuatro componentes básicas (**Fig. 2**).

Como hemos visto, la trayectoria sería la variable que nos indica el movimiento de un animal (variable respuesta). Además, dependiendo de la(s) hipótesis que queramos responder, necesitaremos registrar datos de la(s) variable(s) que determinan la trayectoria observada (variables explicativas). Puede haber variaciones de este modelo, dependiendo de los objetivos del estudio en cuestión, pero este sería el esquema más habitual. Para obtener la trayectoria necesitamos tomar coordenadas de posición del animal a lo largo del tiempo, lo que haremos, habitualmente, mediante sensores de telemetría. Tradicionalmente, se ha utilizado el radio-marcaje, colocando un emisor de radio al animal y una antena receptora –que normalmente portaba el investigador o investigadora de turno– y obteniendo una localización cada vez que se encontraba al animal. Después aparecieron los métodos de satélite (p. ej. GPS, Argos) cuyo sensor –colocado en el animal– se programa para registrar la posición cada periodo de tiempo establecido, proporcionando un mayor número de localizaciones y más regulares en el tiempo (Kays *et al.*, 2015; ver un resumen de los métodos de telemetría para los diferentes grupos animales en la Figura 6C de Nathan *et al.*, 2022). Para obtener las variables explicativas, además de la medición directa, es habitual utilizar *biologgers* (para variables de estado interno del animal; p. ej. acelerómetros para estimar el comportamiento y el uso de energía, termómetros, o medidores de la frecuencia cardíaca) o sensores remotos (*remote sensing*; para variables externas;

p. ej. registradores de temperatura y humedad). Además, se pueden combinar los datos de otros individuos para obtener información sobre las interacciones entre organismos de la misma o distintas especies (**Fig. 2**). En las últimas décadas se ha producido una revolución tecnológica que permite obtener un volumen de datos y una resolución cada vez mayor, a través de un amplio abanico de opciones, por lo que conviene seleccionar cuidadosamente los mejores instrumentos de medida para cada estudio concreto (Williams *et al.*, 2019). Podemos afirmar que la ecología del movimiento ha entrado de lleno en la era del *big data*, lo que ofrece muchas oportunidades de estudio, pero requiere una rápida modernización de los métodos de análisis, que es donde nos encontramos ahora (Nathan *et al.*, 2022).

Principales temas de estudio de la ecología del movimiento

El estudio del movimiento animal se encuentra en un momento de rápido desarrollo, por lo que esperamos que los temas de estudio se amplíen en los próximos años. No obstante, y aunque todos los temas están relacionados y se puede profundizar en las interacciones entre ellos, hasta el momento se suelen abordar cuatro temas principales de estudio, debido a los métodos de análisis que utilizan: (1) análisis de trayectorias, (2) patrones de movimiento, (3) áreas de campeo (y otras áreas de interés), y (4) selección de hábitat.

Respecto al **análisis de trayectorias**, hay diferentes aplicaciones y métodos, pero uno de los más ampliamente investigados es la clasificación de comportamientos (las fases del movimiento de Nathan *et al.*, 2008) utilizando análisis de *Hidden Markov Models* (HMMs) o derivados (Langrock *et al.*, 2012). Los HMMs se basan en que las variables observadas en una trayectoria –longitud del paso y ángulo de giro entre dos localizaciones sucesivas, entre otras– se generan a partir de una secuencia de estados latentes que pueden ser interpretados como “estados comportamentales” del animal, y se modelan como una cadena de Markov. Por ejemplo, en el estudio fundacional de los HMMs, Morales y colaboradores (2004) encontraron que las longitudes de paso y ángulo de giro de las trayectorias de un grupo de alces (*Alces alces*) liberados en Ontario (Canadá) se ajustaban a dos tipos de distribuciones, mediante las cuales se podría clasificar si el animal estaba explorando –con pasos cortos y ángulos de giro grandes– o desplazándose –con pasos largos y ángulos de giro pequeños. Una vez clasificados los comportamientos, se pueden sobreponer variables ambientales, para comprender su efecto en la conducta de los animales. En el ejemplo de los alces, se vio que los animales se desplazan en hábitats abiertos, como campos agrícolas o bosques abiertos, mientras que el comportamiento exploratorio no se asociaba a un hábitat particular (Morales *et al.*, 2004). Este tipo de estudios se está desarrollando rápidamente, permitiendo el modelado a diferentes escalas al incorporar datos con estructuras jerárquicas (Leos-Barajas *et al.*, 2017), o analizar datos de acelerómetros y otros *biologgers* para identificar patrones de comportamiento

muy detallados (p. ej., Connors *et al.*, 2021). Para quien quiera profundizar en estos métodos, Glennie y colaboradores (2023) han elaborado una completa guía.

Normalmente, los HMMs se utilizan para estudiar el movimiento a una escala espaciotemporal fina. Si pensamos en escalas más grandes, podemos clasificar, en general, cuatro **patrones de movimiento**: nomadismo, sedentarismo, dispersión, y migración. La mayoría de las especies de animales se ajustan a uno de estos patrones, bien durante toda su vida, o en ciertas etapas. Por suerte, existe una sencilla métrica, el *Net Squared Displacement* (NSD; i.e., el valor al cuadrado de las longitudes de cada paso de una trayectoria con respecto al punto de inicio) cuya evolución temporal se ajusta a una función determinada para cada patrón de movimiento: (1) una recta con pendiente positiva para el patrón nómada, (2) una curva asintótica para el patrón sedentario, (3) una curva sigmoideal para el patrón de dispersión, y (4) una doble sigmoideal para el patrón de migración (**Fig. 3A**).

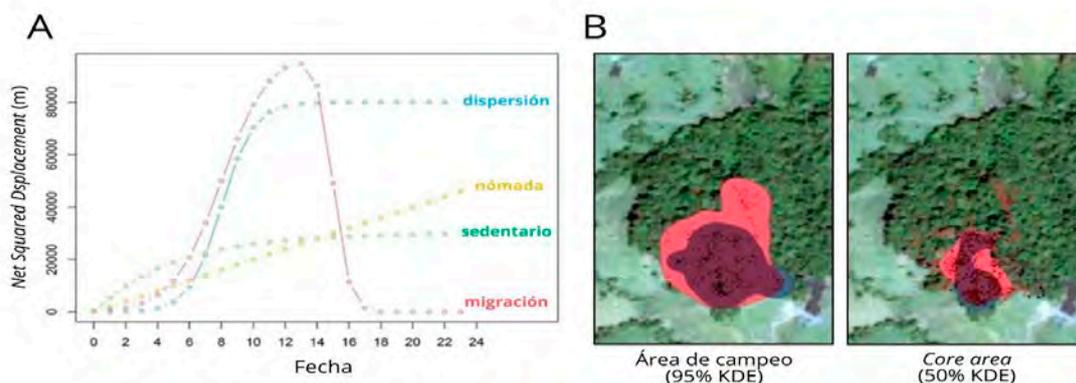


Figura 3. (A) Para conocer el patrón de movimiento general de un individuo, podemos ajustar una función del *Net Squared Displacement* (NDS, ver texto) frente al tiempo, de forma que los animales nómadas se ajustarán a una función recta (amarillo), los sedentarios a una asintótica (verde), los dispersivos, sigmoideal (azul) y los migradores, doble sigmoideal (rojo). Además, los parámetros de cada función informarán sobre el movimiento del animal. (B) Para animales sedentarios, podemos estimar su área de campeo y áreas principales o *core areas*. En el ejemplo, se han utilizado estimaciones de kernel en localizaciones de un grupo de mono tití de Caquetá (*Plecturocebus caquetensis*), una especie amenazada que habita en las selvas de Colombia (rojo: estación de lluvias, gris: estación seca). Se han utilizado el 95 % KDE para el área de campeo y el 50 % KDE para el *core area* (Acero-Murcia *et al.*, 2024).

Si calculamos los valores de NSD de una trayectoria y evaluamos cuál de los cuatro modelos se ajusta mejor, podremos inferir el patrón de movimiento. Además, los parámetros de la respectiva función aportan información relevante. Para patrones nómadas –modelo lineal– la pendiente de la recta indica la velocidad; para sedentarios –modelo asintótico– la asíntota indica el tamaño del área de campeo y el punto de inicio es el centro de esta área. Para movimientos de dis-

persión –modelo sigmoïdal– la asíntota es la distancia hasta el lugar de dispersión, el tiempo en el punto de inflexión de la curva es el que tarda el animal hasta llegar a la mitad del camino, y la pendiente de la curva representa la velocidad de desplazamiento. Para movimientos de migración –modelo sigmoïdal doble– la asíntota representa la distancia del lugar al que se migra; el tiempo en el punto de inflexión de la primera sigmoïdal es lo que tarda en llegar a la mitad del camino de la migración, y la pendiente es la velocidad de ida; y lo mismo con la segunda sigmoïdal y el camino de regreso desde la migración (Bunnefield *et al.*, 2011).

El **área de campeo** es “aquella que atraviesa un animal en sus actividades normales de búsqueda de alimento, apareamiento y cuidado de las crías. Las salidas ocasionales –de naturaleza, quizás, exploratoria– no deben de considerarse parte del área de campeo” (Burt, 1943). Dentro de esta área, el patrón de uso del espacio por parte de un organismo representa un elaborado mapa cognitivo del ambiente percibido por el individuo (Börger *et al.*, 2008). Las técnicas más comunes para estimar el área de campeo son el mínimo polígono convexo (*Minimum Convex Polygon*, MCP) y el estimador de densidad de Kernel (*Kernel Density Estimator*, KDE). Un MCP al 95 % es el mínimo polígono que contiene el 95 % de las localizaciones del individuo, mientras que el 95 % KDE es el contorno que delimita la región que contiene el 95 % de la densidad total de localizaciones del individuo (Hooten *et al.*, 2017; **Fig. 3B**). Además, dentro del área de vida, muchas veces nos interesa estudiar las zonas utilizadas con mayor intensidad, que denominamos *core areas*, y se suelen calcular como el 50 % KDE (**Fig. 3B**). En los últimos años se han desarrollado métodos más sofisticados para estudiar el área de campeo. El más prometedor es el CTMM (*Continuous-Time Movement Modeling*; Flemming *et al.*, 2015) que –además de mejorar la precisión de cálculo del área de campeo– informa sobre la distancia diaria que recorre el animal dentro de ella, la direccionalidad y el tiempo que tarda en atravesar dicha área. Así, por ejemplo, estudiando el área de campeo de osos hormigueros gigantes (*Myrmecophaga tridactyla*) mediante CTMMs, hemos averiguado que los machos hacen un uso más intenso del área de campeo que las hembras –lo que cuadra con su sistema reproductor poligínico. Además, cuando disminuye la proporción de bosque en una zona, los individuos aumentan su área de campeo, probablemente porque dependen de las zonas forestales para su termorregulación (Giroux *et al.*, 2021).

El cuarto gran bloque temático de la ecología del movimiento animal es el de la **selección de hábitat**, que será el objeto de estudio de las próximas secciones.

Selección de hábitat: conceptos y escalas

El análisis de selección de recursos es un marco conceptual amplio, que profundiza en la toma de decisiones por parte de los animales. Los recursos pueden ser de cualquier tipo: alimento, pareja reproductiva, o el hábitat a utilizar. Para conocer el proceso de selección de un recurso, hemos de comparar su uso

con lo que está disponible –pero no está siendo utilizado. Así, deducimos que un animal selecciona un recurso cuando lo utiliza en mayor medida de lo que está disponible, mientras que lo evita cuando lo utiliza en menor proporción de lo que está disponible. Si el animal utiliza el recurso en igual proporción a lo que hay disponible en su ambiente, deducimos que actúa de manera aleatoria con ese recurso, ni seleccionándolo ni evitándolo (Manly *et al.*, 2002). Además, hablamos de preferencia cuando estudiamos la selección de un recurso estando todas las opciones igualmente disponibles en el entorno –normalmente, en experimentos de laboratorio (p. ej., cuando estudiamos el rango de temperaturas preferidas en un animal ectotermo; Hertz *et al.*, 1993).

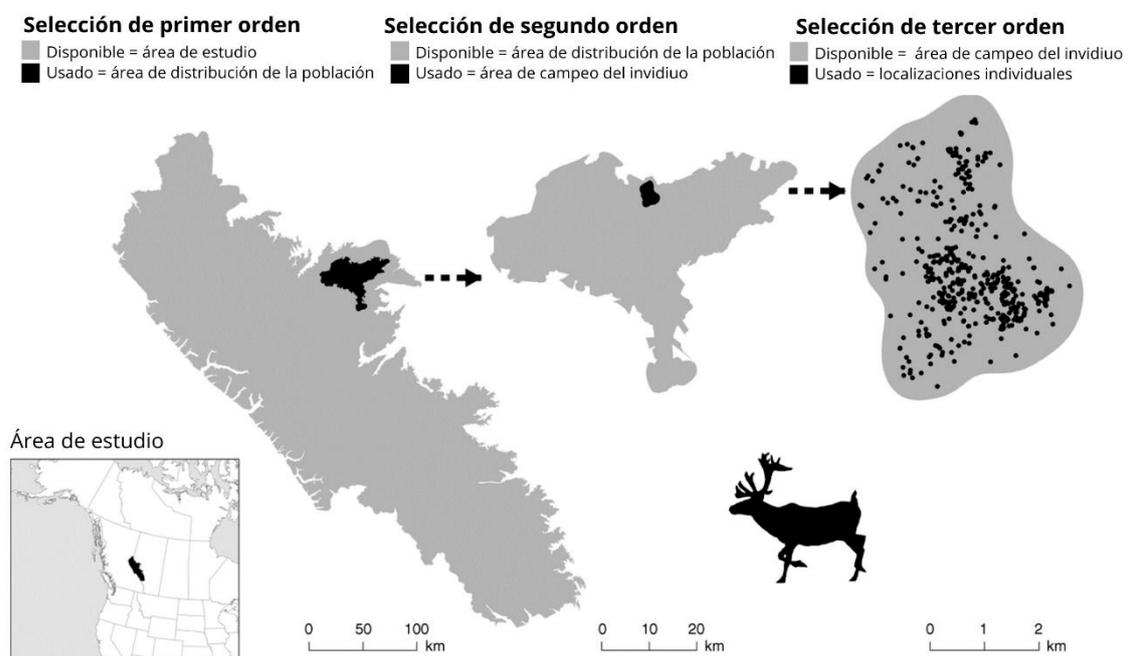


Figura 4. Escalas de selección de hábitat, ilustradas con un ejemplo de un individuo de caribú boreal (*Rangifer tarandus Caribou*). Tomado y traducido de DeCesare *et al.* (2012).

Dado que el hábitat puede considerarse un recurso, podemos estudiar el proceso de selección de hábitat, para relacionar la distribución de los animales con características de este (Boyce y McDonald, 1999). Aquí vamos a utilizar la definición más sencilla de hábitat: “el lugar ocupado por un individuo, una población, una especie, un género o incluso un gremio” (Di Bitetti, 2012). Así, podemos estudiar la selección de hábitat a diferentes escalas, siendo las principales: (1) selección de primer orden: el rango de distribución de la especie, (2) selección de segundo orden: el área de campeo de un individuo o un grupo natural de individuos, (3) selección de tercer orden: selección de características dentro del área de campeo (p. ej., tipos de hábitat dentro del área de campeo, y (4) selección de

cuarto orden: microambiente y comportamiento (p. ej., adquisición de alimento, apareamiento, construcción del nido) (Johnson, 1980; DeCesare *et al.*, 2012).

Selección de hábitat: métodos y ejemplos

El método más utilizado para cuantificar la selección de hábitat son las Funciones de Selección de Recursos (*Resource Selection Function*, RSF; Manly *et al.*, 2002; Hooten *et al.*, 2017), que no es otra cosa que ajustar una función que calcule la distribución de probabilidad de las localizaciones de un animal utilizando diferentes recursos o condiciones ambientales –dada su disponibilidad. El método de ajuste de la RSF puede variar, dependiendo de nuestros objetivos, como veremos más adelante. En cualquier caso, para que los resultados sean robustos, es muy importante que la disponibilidad de cada recurso esté suficientemente representada y que se base en puntos de ausencia real (es decir, dónde el animal podría estar, pero ha decidido no estar). Tras los análisis –utilicemos un método u otro para ajustar la función– las RSFs resultan en unos coeficientes de “fuerza de selección” de cada recurso o condición ambiental. Así, podemos conocer la contribución de cada variable de interés (que formarán parte de alguna de las cuatro componentes principales del marco conceptual de la ecología del movimiento) en la toma de decisiones respecto a la pregunta ¿hacia dónde moverse? (**Fig. 2**). Métodos más avanzados pueden ayudar a responder también el por qué y el cuándo, como veremos en los siguientes ejemplos. Aunque existen más métodos de estudio en selección de hábitat, en este artículo vamos a ver tres, dos de ellos ampliamente utilizados.

Modelos Lineares Generales (GLMs): ejemplo de la selección de microhábitat en un lagarto arborícola

La manera más sencilla y habitual de calcular las RSFs es mediante Modelos Lineares Generalizados (*Generalized Linear Models*, GLMs), lo que permite modelar la probabilidad de ocurrencia de un individuo dada ciertas variables explicativas y sus interacciones. Además, se puede calcular el efecto de cada variable explicativa en un mismo proceso de selección probabilístico (Liedke *et al.*, 2018). La opción tradicional era considerar los puntos de disponibilidad para todos los individuos de la población. No obstante, si ajustamos la RSF utilizando modelos mixtos (GLMM o regresión condicional logística), podemos incorporar al modelo la disponibilidad de cada variable ambiental para cada individuo, simultáneamente al momento de observación de un punto de uso. Esto nos asegura tener puntos reales de disponibilidad (ausencias reales) y aporta una aproximación más potente y mecanicista –es decir, que permite una mejor comprensión de las causas del proceso de selección (Manly *et al.*, 2002; Duchesne *et al.*, 2010).

Veremos este método utilizando como ejemplo un lagarto arborícola que habita en el Pantanal de Brasil: *Tropidurus lagunablanca*. Nuestro objetivo de estudio era averiguar si los individuos de esta especie seleccionaban los árboles dependiendo de sus propiedades térmicas y/o el grosor del tronco (Benício *et al.*,

2021). En este caso, estamos estudiando la selección de hábitat de tercer y cuarto orden (Johnson, 1980; ver más arriba), también llamada selección de microhábitat. Para ello, establecimos un sencillo diseño experimental de caso-control, donde cada vez que se observaba un individuo se anotaban la temperatura del sustrato y el diámetro del árbol (medido a la altura del pecho, siempre por la misma persona). Hacíamos esto tanto para el lugar en el que estaba el animal (uso) como para los cuatro árboles más cercanos con diámetro > 7 cm (disponibilidad; **Fig. 5A**). Así, para cada microhábitat utilizado por un lagarto, obtuvimos cuatro puntos de disponibilidad simultáneos, y analizamos los datos utilizando regresión condicional logística –condicionada por la identidad del individuo. Los modelos revelaron que estos animales seleccionan troncos significativamente más gruesos y, dentro de ellos, lugares más cálidos que el promedio disponible en su área de campeo, probablemente para obtener más oportunidades para refugiarse, alimentarse y regular su temperatura corporal. De hecho, la probabilidad de encontrar a esta especie es más del 50 % para árboles con diámetro > 40 cm y cuya corteza se encuentre por encima de los 34 °C (Benício *et al.*, 2021). Estos resultados ayudan a comprender la toma de decisiones de los individuos de *T. lagunablanca*, ofrecer indicaciones para que futuras expediciones científicas los encuentren y recomendar medidas de conservación –ambos asuntos necesarios, dado que es una especie poco conocida y probablemente muy amenazada (Carvalho, 2016).

Además de la creciente deforestación (Guerra *et al.*, 2020), en los últimos años el Pantanal está sufriendo incendios cada vez más grandes y frecuentes (Marques *et al.*, 2021), que provocan un impacto severo en la fauna de vertebrados (Tomas *et al.*, 2021). Si queremos conservar las poblaciones de *T. lagunablanca* en el Pantanal se recomienda priorizar la protección y conservación de árboles maduros, que puede impulsarse mejorando la prevención de incendios y las políticas de uso sostenible del territorio (Tomas *et al.*, 2024). Con este ejemplo hemos ilustrado cómo estudiar las variables que condicionan la selección de microhábitat de un vertebrado terrestre y obtener resultados prácticos para su conservación.

Modelos de Ecuaciones Estructurales (*mixed*-SRSF): ejemplo con dos especies de lagartos neotropicales

Resolviendo las RSF mediante GLMs (ver apartado anterior) obtenemos la contribución de cada variable de interés en la selección de hábitat, así como las posibles interacciones entre factores. Sin embargo, estos modelos no permiten evaluar relaciones indirectas entre variables. Por ejemplo, en el caso anterior, sabemos que el lagarto selecciona árboles más gruesos que el promedio disponible, pero desconocemos qué motiva esa selección: ¿es porque ofrecen más refugio, porque ofrecen más recursos tróficos, o quizá por otro motivo que no conocemos? Para conocer las causas que llevan a un animal a seleccionar un determinado hábitat, podemos resolver las RSF mediante Modelos de Ecuaciones Estructura-

les (Lefcheck, 2016; Shipley, 2016), incluyendo la identidad del individuo como factor aleatorio. Este método de análisis se denomina *mixed-Structural Resource Selection Function* (*mixed-SRSF*) y permite incorporar variables explicativas que a su vez dependan de otras (**Fig. 5B**), para desentrañar las causas de la selección de hábitat, comprender efectos indirectos y comparar la contribución de cada variable en el proceso de selección (Ortega *et al.*, 2019).

Para ilustrar este método, utilizamos dos especies de lagarto o lagartija del Pantanal de Brasil: *Tropidurus oreadicus* y *Ameivula ocellifera*. En este caso se trata de especies que habitan en el suelo, no en árboles. El diseño muestral fue similar al del ejemplo anterior, con cuatro puntos de muestreo (disponibilidad) por cada observación de cada individuo (uso). En este caso –dado que la selección de microhábitat se considera una de las principales componentes de la termorregulación conductual de ectotermos terrestres– el objetivo era desentrañar el efecto de cada fuente de calor en el proceso de selección. Para ello, cuantificamos las siguientes variables explicativas: (a) temperatura del sustrato, (2) temperatura del aire, (3) tipo de sustrato (roca, hierba seca, hierba, hojarasca o arena), y (4) exposición al sol (sol total, sol filtrado o sombra). Igual que antes, la variable respuesta era la presencia del animal (presente, en los lugares usados, o ausente, en los disponibles) y se incluyó la identidad del individuo como factor aleatorio. Con estas variables podemos comprobar siete hipótesis sobre qué factores externos condicionan la selección de microhábitat de estas especies (**Fig. 5B**).

Ajustamos un *mixed-SRSF* para cada especie, resultando la radiación solar como el principal factor que determina la selección de microhábitat de ambas especies, mientras que ni la convección ni la conducción tuvieron efecto. Las lagartijas de la especie *A. ocellifera* seleccionan lugares en sol filtrado y la sombra –evitando exponerse al sol total– mientras que los lagartos de la especie *T. oreadicus* evitan, con igual magnitud, tanto las zonas soleadas como en sombra. Al contrario de lo que se observa en zonas templadas, donde la mayoría de las especies de lagartijas seleccionan sustratos al sol para termorregularse, en áreas tropicales exponerse a la radiación solar directa puede conllevar un elevado riesgo de sobrecalentamiento. Además, las temperaturas del entorno suelen ser lo suficientemente próximas a las preferencias térmicas de reptiles como los estudiados aquí (Vickers *et al.*, 2011). Este resultado muestra la importancia de conservar la vegetación tropical, con sus microhábitats en sol filtrado y sombra, para la conservación de pequeños ectotermos. El otro gran factor que condiciona la selección de microhábitat son las propiedades no térmicas de los sustratos, de forma que *A. ocellifera* selecciona arena y *T. oreadicus* selecciona roca y troncos. El *mixed-SRSF* nos ha permitido descartar que estos sustratos sean seleccionados por sus propiedades térmicas, así que el siguiente paso sería cuantificar otras variables bióticas –como la disponibilidad de alimento, la presión de depredación o la competencia intraespecífica– y abióticas –como la rugosidad del sustrato o la disponibilidad de refugio–, para tener una comprensión completa de los mecanismos de selección de microhábitat en estas especies (Ortega *et al.*, 2019). Esta

herramienta analítica es poco conocida por el momento, pero es prometedora, ya que, como hemos visto, permite responder a las cuestiones fundamentales del marco conceptual de la ecología del movimiento (**Fig. 2**).

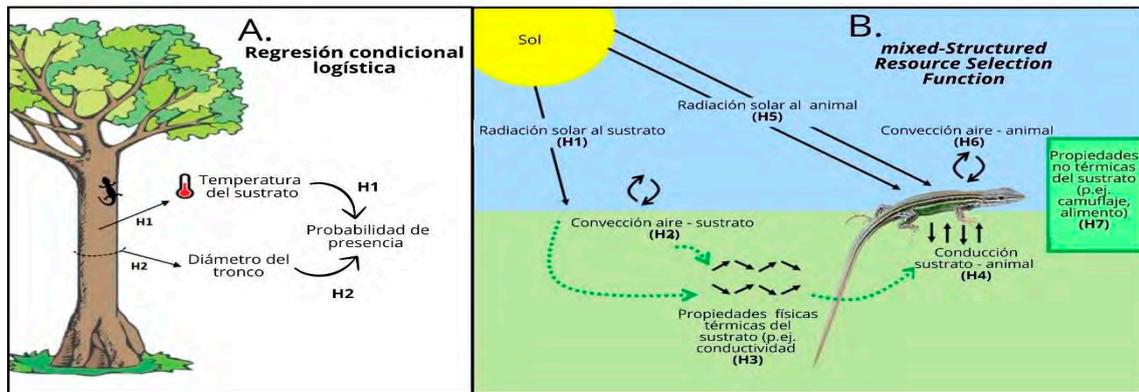


Figura 5. Ejemplos de casos reales de algunos métodos de estudio en selección de hábitat. **(A)** Análisis de la selección de microhábitat de un lagarto arborícola utilizando regresión condicional logística (Benício *et al.*, 2021). **(B)** Incorporando Modelos de Ecuaciones Estructurales a la selección de hábitat, podemos desentrañar el efecto de las diferentes fuentes de calor en el proceso de selección (Ortega *et al.*, 2019).

Selección de hábitat a cada paso: ejemplo del oso hormiguero gigante

Hasta el momento, hemos visto ejemplos de estudios de selección de hábitat con observaciones puntuales de los lugares utilizados y sus correspondientes datos pareados de disponibilidad del hábitat. Si disponemos de datos de localizaciones del mismo animal a lo largo del tiempo –es decir, trayectorias– podemos estudiar cómo es el proceso de selección a lo largo del día. Eso podríamos hacerlo con métodos como los vistos hasta ahora, introduciendo la hora como una variable en los modelos. Sin embargo, existen métodos más avanzados y potentes para el estudio de selección de hábitat con datos de trayectoria: los modelos de selección de paso (*Step Selection Function*, SSF). En estos modelos, para cada paso de la trayectoria observado (uso), se sortean varios tamaños de paso y ángulos de giro que representan la disponibilidad (Thurfjell *et al.*, 2014). Así, a cada paso, se compara el hábitat que ha usado un individuo con el que podría haber usado, pero ha decidido no usar (ausencias verdaderas). Lo más avanzado en esos métodos es el *Integrated Step Selection Analysis* (iSSA), que asume que el movimiento animal puede ser representado en un modelo separado, producto de dos kernels (núcleos): un kernel de movimiento independiente del hábitat (una función que determinaría el movimiento si no hay selección de hábitat) y un kernel de selección de hábitat (Avgar *et al.*, 2016).

Los osos hormigueros gigantes (*Myrmecophaga tridactyla*), a pesar de ser endotermos, tienen una baja tasa metabólica basal, por lo que dependen bastante del comportamiento para regular su temperatura corporal (Giroux *et al.*,

2022). En un estudio reciente, combinamos análisis de trayectorias (HMMs, ver más arriba) con selección de microhábitat (utilizando iSSA) para comprender el efecto de la temperatura ambiental en el comportamiento de esos animales. Así, hemos descubierto que los osos hormigueros gigantes combinan tres estrategias conductuales para termorregularse (Giroux *et al.*, 2023): (1) seleccionan los bosques como refugios térmicos, (2) cambian el periodo de actividad (diurno en condiciones de frío, nocturno en calor) y (3) modulan la duración de sus periodos de actividad (cortos en días de frío, largos en días de calor). En la Fig. 7 de Giroux *et al.* (2023) se resumen e ilustran estos mecanismos. Dadas las predicciones de aumento de la frecuencia e intensidad de los días con temperaturas extremas a lo largo del siglo XXI (IPCC, 2021) y la rápida deforestación que está teniendo lugar en Brasil (Tollefson, 2018; Guerra *et al.*, 2020), urge la conservación de los hábitats forestales, que serán cada vez más escasos y necesarios para estos emblemáticos animales.

Conclusiones

Comprender las causas y consecuencias del movimiento animal es clave para profundizar en el conocimiento de su comportamiento e informar medidas de conservación y gestión de fauna. En concreto, analizar la selección de hábitat de las diferentes especies permite responder a diferentes preguntas del marco conceptual de la ecología del movimiento, dependiendo del método utilizado y las variables que cuantifiquemos. Si resolvemos las funciones de selección de recursos mediante modelos generales lineales, podremos conocer los factores implicados en la toma de decisiones de hacia dónde moverse. Estos modelos serán más potentes si cuantificamos la disponibilidad simultánea para cada punto de observación e incluimos la identidad del individuo como factor aleatorio. Para desentrañar de manera más detallada y mecanicista las causas de la selección de hábitat, podemos resolver las funciones de selección de recursos mediante modelos de ecuaciones estructurales. Además, podemos aplicar estos métodos a trayectorias completas, con diferentes métodos de análisis de selección de paso, para comprender el proceso de toma de decisiones de cada individuo a lo largo del tiempo. Por último, si incorporamos otros análisis de movimiento –como la clasificación de comportamientos o el estudio del área de vida– al estudio de la selección de hábitat, podemos inferir el comportamiento animal a partir de datos de telemetría. Estos métodos son relativamente sencillos de aplicar en cuanto a su diseño experimental –y, algunos de ellos, también en cuanto al análisis de datos– y ofrecen información básica para la gestión de fauna, por lo que sería conveniente incorporarlos a las prácticas de conservación animal.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas las investigadoras e investigadores que han formado parte de los estudios que he utilizado como ejemplos aquí, en especial a Vanda Lúcia Ferreira, Aline Giroux, Ronildo Benício, Abraham Mencía y Luiz

Gustavo Oliveira Santos. Agradezco también a la profesora Daniella Canestrari de la Universidad de León por animarme a escribir este artículo.

Bibliografía

- Acero-Murcia, A. C., Almario-Vaquiro, L., Ortega, Z., Garcia, J., Camacho, R. L. y Defler, T. 2024. Seasonal behavioral patterns of the Caqueta titi monkey (*Plecturocebus caquetensis*). *bioRxiv*. 2024.01.10.573946. Disponible en: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2024.01.10.573946v1.full>
- Avgar, T., Potts, J. R., Lewis, M. A. y Boyce, M. S. 2016. Integrated step selection analysis: bridging the gap between resource selection and animal movement. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(5):619-630.
- Benício, R. A., Passos, D. C., Mencía, A. y Ortega, Z. 2021. Microhabitat selection of the poorly known lizard *Tropidurus lagunablanca* (Squamata: Tropiduridae) in the Pantanal, Brazil. *Papéis Avulsos de Zoologia*, 61:p.e20216118.
- Börger, L., Dalziel, B. D. y Fryxell, J. M. 2008. Are there general mechanisms of animal home range behaviour? A review and prospects for future research. *Ecology Letters*, 11(6):637-650.
- Boyce, M. S. y McDonald, L. L. 1999. Relating populations to habitats using resource selection functions. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(7):268-272.
- Bunnefeld, N., Börger, L., van Moorter, B., Rolandsen, C. M., Dettki, H., Solberg, E. J. y Ericsson, G. 2011. A model-driven approach to quantify migration patterns: individual, regional and yearly differences. *Journal of Animal Ecology*, 80(2):466-476.
- Burt, W. H. 1943. Territoriality and home range concepts as applied to mammals. *Journal of Mammalogy*, 24(3):346-352.
- Carvalho, A. L. G. 2016. Three new species of the *Tropidurus spinulosus* group (Squamata: Tropiduridae) from eastern Paraguay. *American Museum Novitates*, 2016(3853):1-44.
- Connors, M. G., Michelot, T., Heywood, E. I., Orben, R. A., Phillips, R. A., Vyssotski, A. L., Shaffer, S. A. y Thorne, L. H. 2021. Hidden Markov models identify major movement modes in accelerometer and magnetometer data from four albatross species. *Movement Ecology*, 9:1-16.
- DeCesare, N. J., Hebblewhite, M., Schmiegelow, F., Hervieux, D., McDermid, G. J., Neufeld, L., Bradley, M., Whittington, J., Smith, K. G., Morgantini, L. E. y Wheatley, M. 2012. Transcending scale dependence in identifying habitat with resource selection functions. *Ecological Applications*, 22(4):1068-1083.
- Duchesne, T., Fortin, D. y Courbin, N., 2010. Mixed conditional logistic regression for habitat selection studies. *Journal of Animal Ecology*, 79(3):548-555.

- Fleming, C. H., Fagan, W. F., Mueller, T., Olson, K. A., Leimgruber, P. y Calabrese, J. M. 2015. Rigorous home range estimation with movement data: a new autocorrelated kernel density estimator. *Ecology*, 96(5):1182-1188.
- Fryxell, J. M., Hazell, M., Börger, L., Dalziel, B. D., Haydon, D. T., Morales, J. M., McIntosh, T. y Rosatte, R. C. 2008. Multiple movement modes by large herbivores at multiple spatiotemporal scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(49):19114-19119.
- Giroux, A., Ortega, Z., Attias, N., Desbiez, A. L. J., Valle, D., Börger, L., y Oliveira-Santos, L. G. R., 2023. Activity modulation and selection for forests help giant anteaters to cope with temperature changes. *Animal Behaviour*, 201:191-209.
- Giroux, A., Ortega, Z., Bertassoni, A., Desbiez, A. L. J., Kluyber, D., Massocato, G. F., De Miranda, G., Mourao, G., Surita, L., Attias, N. y Bianchi, R. D. C. 2022. The role of environmental temperature on movement patterns of giant anteaters. *Integrative Zoology*, 17(2):285-296.
- Giroux, A., Ortega, Z., Oliveira-Santos, L. G. R., Attias, N., Bertassoni, A. y Desbiez, A. L. J. 2021. Sexual, allometric and forest cover effects on giant anteaters' movement ecology. *PLOS ONE*, e0253345.
- Glennie, R., Adam, T., Leos-Barajas, V., Michelot, T., Photopoulou, T. y McClintock, B. T. 2023. Hidden Markov models: Pitfalls and opportunities in ecology. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(1):43-56.
- Guerra, A., de Oliveira Roque, F., Garcia, L. C., Ochoa-Quintero, J. M., de Oliveira, P. T. S., Guariento, R. D. y Rosa, I. M. 2020. Drivers and projections of vegetation loss in the Pantanal and surrounding ecosystems. *Land Use Policy*, 91:104388.
- Hertz, P. E., Huey, R. B. y Stevenson, R. D. 1993. Evaluating temperature regulation by field-active ectotherms: the fallacy of the inappropriate question. *The American Naturalist*, 142(5):796-818.
- Hooten, M. B., Johnson, D. S., McClintock, B. T. y Morales, J. M. 2017. *Animal Movement: Statistical Models for Telemetry Data*. CRC Press, Florida, Estados Unidos.
- IPCC. 2021. Summary for policymakers. En: V. Masson Delmotte, P. Zhai, A. *et al.* (Eds.), Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Climate change 2021: The physical science basis (pp. 3-32). Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Jeltsch, F., Bonte, D., Pe'er, G., Reineking, B., Leimgruber, P. *et al.* 2013. Integrating movement ecology with biodiversity research-exploring new avenues to address spatiotemporal biodiversity dynamics. *Movement Ecology*, 1(1):6.
- Johnson, D. H. 1980. The comparison of usage and availability measurements for evaluating resource preference. *Ecology*, 61(1):65-71.

- Katzner, T. E. y Arlettaz, R. 2020. Evaluating contributions of recent tracking-based animal movement ecology to conservation management. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7:519.
- Kays, R., Crofoot, M. C., Jetz, W. y Wikelski, M. 2015. Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet. *Science*, 348(6240):p.aaa2478.
- Langrock, R., King, R., Matthiopoulos, J., Thomas, L., Fortin, D. y Morales, J. M. 2012. Flexible and practical modeling of animal telemetry data: hidden Markov models and extensions. *Ecology*, 93(11):2336-2342.
- Lefcheck, J. S. 2016. piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in R for ecology, evolution, and systematics. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(5):573-579.
- Leos-Barajas, V., Gangloff, E. J., Adam, T., Langrock, R., Van Beest, F. M., Nabe-Nielsen, J. y Morales, J. M. 2017. Multi-scale modeling of animal movement and general behavior data using hidden Markov models with hierarchical structures. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, 22:232-248.
- Liedke, A. M., Bonaldo, R. M., Segal, B., Ferreira, C. E., Nunes, L. T., Burigo, A. P., Buck, S., Oliveira-Santos, L. G. R. y Floeter, S. R. 2018. Resource partitioning by two syntopic sister species of butterflyfish (Chaetodontidae). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 98(7):1767-1773.
- Manly, B. F. L., McDonald, L., Thomas, D. L., McDonald, T. L. y Erickson, W. P. 2002. Resource selection by animals: statistical design and analysis for field studies. Kluwer Academic Publishers, Londres, Reino Unido.
- Marques, J. F., Alves, M. B., Silveira, C. F., Silva, A. A. E., Silva, T. A., Dos Santos, V. J. y Calijuri, M. L. 2021. Fires dynamics in the Pantanal: Impacts of anthropogenic activities and climate change. *Journal of Environmental Management*, 299:p.113586.
- Morales, J. M., Haydon, D. T., Frair, J., Holsinger, K. E. y Fryxell, J. M. 2004. Extracting more out of relocation data: building movement models as mixtures of random walks. *Ecology*, 85(9):2436-2445.
- Nathan, R., Monk, C. T., Arlinghaus, R., Adam, T., Alós, J., Assaf, M., Baktoft, H., Beardsworth, C. E., Bertram, M. G., Bijleveld, A. I. y Brodin, T. 2022. Big-data approaches lead to an increased understanding of the ecology of animal movement. *Science*, 375(6582):p.eabg1780.
- Ortega, Z., Mencía, A., Martins, K., Soares, P., Ferreira, V. L. y Oliveira-Santos, L. G. 2019. Disentangling the role of heat sources on microhabitat selection of two Neotropical lizard species. *Journal of Tropical Ecology*, 35(4):149-156.
- Shipley, B. 2016. Cause and correlation in biology: A user's guide to path analysis, structural equations and causal inference with R. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.

- Thurfjell, H., Ciuti, S., y Boyce, M. S. 2014. Applications of step-selection functions in ecology and conservation. *Movement Ecology*, 2:1-12.
- Tollefson, J. 2018. Deforestation ticks up in Brazil's savannah. *Nature*, 12 July.
<https://www.nature.com/articles/d41586-018-05695-9>
- Tomas, W. M., Andrade, M. H., Berlinck, C. N., Bolzan, F., Camilo, A. R. *et al.* 2024. Eight basic principles for the elaboration of public policies and development projects for the Pantanal. *Conservation Science and Practice*, e13207.
- Tomas, W. M., Berlinck, C. N., Chiaravalloti, R. M., Faggioni, G. P., Strüssmann, C. *et al.* 2021. Distance sampling surveys reveal 17 million vertebrates directly killed by the 2020's wildfires in the Pantanal, Brazil. *Scientific Reports*, 11(1):23547.
- Turchin, P. 1998. *Quantitative Analysis of Movement*. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, Estados Unidos.
- Vickers, M., Manicom, C. y Schwarzkopf, L. 2011. Extending the cost-benefit model of thermoregulation: high-temperature environments. *The American Naturalist*, 177(4):452-461.
- Williams, H. J., Taylor, L. A., Benhamou, S., Bijleveld, A. I., Clay, T. A. *et al.* 2020. Optimizing the use of biologgers for movement ecology research. *Journal of Animal Ecology*, 89(1):186-206.

UNO DE LOS NUESTROS

Barbara McClintock, una mujer solitaria entre el maíz

Luis E. Sáenz de Miera¹

¹ Área de Genética. Universidad de León
luis.saenzdemiera@unileon.es



Figura 1. Celebración de los 50 años de McClintock en el CSHL en 1991. De izquierda a derecha, Watson, McClintock y Alfred D. Hershey, tres premios Nobel dedicados a la Genética. Colección de James D. Watson. <https://wellcomecollection.org/works/c62yzujk>

Era como una madre

En el verano de 1948, James Watson (Nobel en 1962 junto a Francis Crick) realizó una estancia en el laboratorio de Cold Spring Harbor (CSHL) de Nueva York. Dos años antes había decidido dejar a un lado su intención de convertirse en ornitólogo y ese mismo año había comenzado su tesis doctoral sobre genética en Indiana, con Salvador Luria como director (Nobel en 1969 junto a Max Delbrück). El joven Watson ha relatado que aquel verano en el CSHL había un campo

de maíz y que cuando jugaba con sus compañeros al beisbol y alguna pelota caía entre el maíz, una mujer salía de entre las plantas para regañarles. Afirmaba que aquella mujer era como una madre, y no lo decía en un tono amable. La mujer era Barbara McClintock y tendría que esperar hasta 1983 para convertirse en la primera mujer en obtener el premio Nobel en solitario en una disciplina científica. Seis mujeres obtuvieron el Nobel antes que ella, pero siempre conjuntamente con algún hombre, dos en Física, dos en Química y ella fue la tercera en Fisiología y Medicina. Watson no sabía que la investigación de McClintock sobre la genética del maíz desafiaría la versión simplificada de la funcionalidad del DNA que él propondría más adelante. En la **Figura 1** puede verse a McClintock con Watson muchos años después en el CSHL.

Ésta es su historia, según cuentan las biografías de McClintock escritas después de su muerte por Ray Spancerburg y Diane Kit Moser; por Cathlen Small y por una serie de entrevistas realizadas por Evelyn Fox Keller en 1983 con motivo de su nominación al Nobel. Y por supuesto, de algunos de los artículos científicos escritos por ella misma.

Eleanor era un nombre demasiado delicado para esa niña

McClintock había nacido en 1902 en Hartford, capital del estado de Connecticut, dos años después del redescubrimiento de los trabajos de Mendel, aunque su traducción del alemán fue publicada por Bateson ese mismo año. En la publicación de Bateson se utiliza por primera vez el término Genética para nombrar a una nueva ciencia.

Hija de Thomas McClintock, un médico, homeópata según algunas fuentes, y Sara Handy, una mujer rebelde, poeta, pintora y pianista, que tuvo que trabajar como profesora de música para completar los ingresos familiares. Sara descendía de uno de los pioneros que llegaron a América en el Mayflower y se casó con un estudiante de medicina en contra de los deseos de su familia; aunque ésta inicialmente apoyaba a su hija en su forma de ser, siempre estuvo en contra de sus estudios universitarios y del tipo de vida que escogería después.

Barbara tuvo dos hermanas mayores y un hermano más joven (**Fig. 2**), pero desde pequeña prefirió la soledad, se escondía entre las cortinas y evitaba incluso el contacto con su madre, era independiente e inconformista. No era una niña sencilla, y sus padres la enviaban largas temporadas a vivir con sus tíos. McClintock estaba encantada con su tío, quien vendía pescado en su propio camión y ella, a veces, lo acompañaba. Disfrutaba del aire libre mientras aprendía de su tío la mecánica necesaria para el mantenimiento del camión. Barbara se aplicaba con pasión en todo lo que le interesaba y eso afectaba a las clases de piano que trataba de darle su madre, e incluso por su forma de ser la expulsaron de la escuela en varias ocasiones. Le gustaba vestir con pantalones y jugar y hacer deporte con los chicos. En 1908 la familia se estableció en Nueva York y durante los veranos, Barbara disfrutaba de largos paseos en solitario por la playa de Long Beach. Inicialmente la llamaron Eleanor, pero decidieron cambiar su nombre a la edad de

cuatro meses. Para Thomas, su padre, aquel era un nombre demasiado femenino para esa niña.

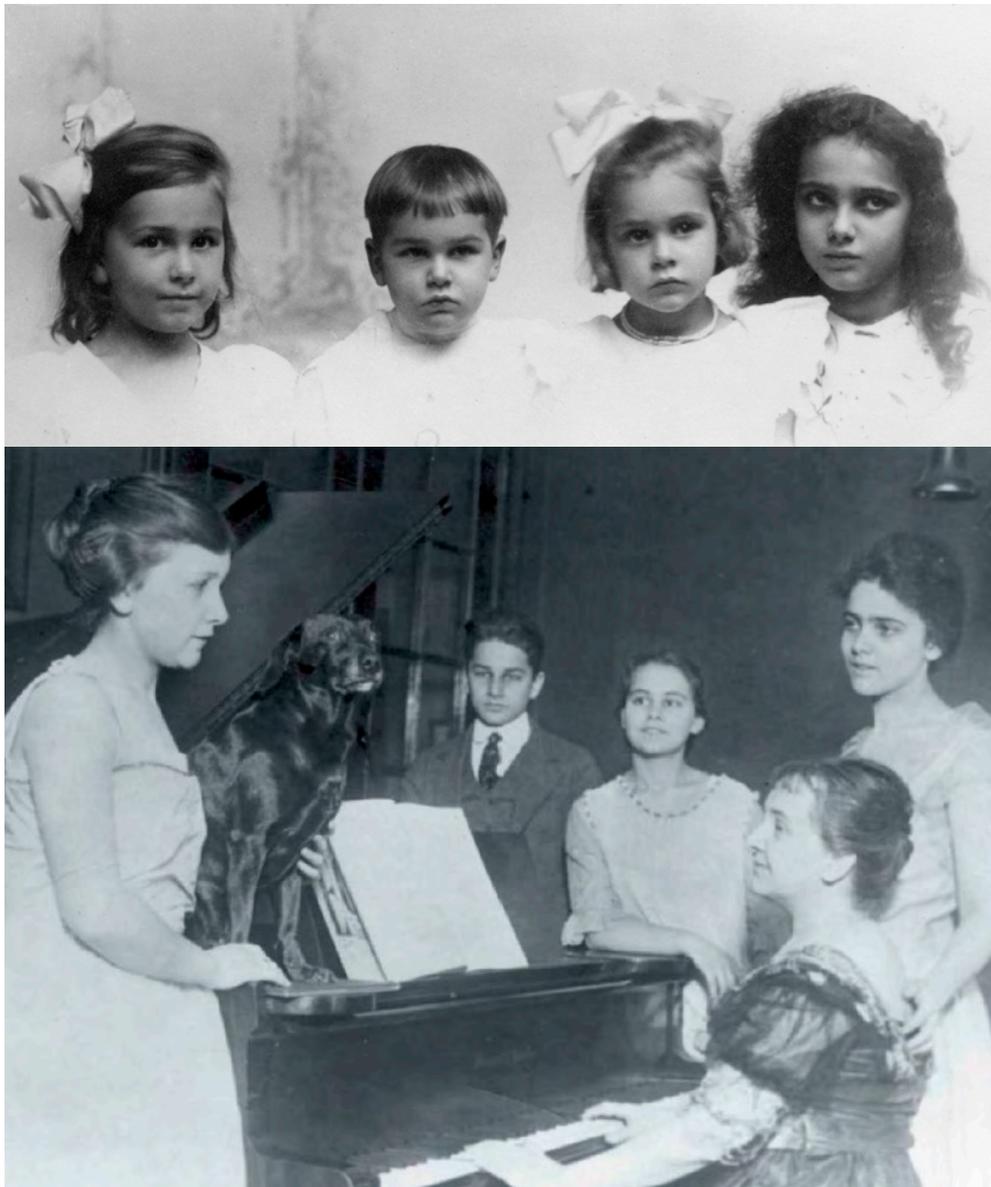


Figura 2. Arriba, Barbara (tercera desde la izquierda) y sus hermanos en 1907. Abajo, también con su madre que toca el piano, es la tercera por la izquierda sin contar al perro.

La única forma en que podía mantener mi cordura

En 1908, la familia se estableció en Brooklin, Nueva York. En la escuela secundaria Erasmus Hall de esa ciudad, McClintock descubrió su amor por la Ciencia, le gustaba resolver los problemas de clase de diferentes formas, y, sobre todo, de forma diferente a como le proponían sus profesores, actitudes que fomentaba aquella escuela, que ha contado entre sus estudiantes con famosos

actores, cantantes e intelectuales, como Barbra Streisand o el ajedrecista Bobby Fisher. En la escuela se convirtió en una persona curiosa que amaba los desafíos intelectuales. Las tres hermanas eran buenas estudiantes y recibieron ofertas para ingresar en diferentes universidades. Su padre estaba en Europa sirviendo en el ejército como cirujano en la Primera Guerra Mundial y su madre convenció a las dos hermanas mayores para que rechazaran las ofertas, porque eso las convertiría en “menos casaderas”. En aquella época las mujeres ni siquiera podían votar en la democracia estadounidense. Sara no pudo convencer a Barbara, que con la ayuda de su padre decidió ir a la Facultad de Agricultura de la Universidad de Cornell. Como temía su madre, Barbara nunca se casó. En sus propias palabras, esa era la única forma en que podría mantener su cordura.

Mientras McClintock estudiaba, el genético inglés Bateson (primer profesor de Genética del mundo) había encontrado segregaciones que no se ajustaban a los experimentos de Mendel, observando características que se heredaban juntas, primer análisis de caracteres ligados. Se publicó en 1905. Mucho más cerca de McClintock, Thomas Morgan, trabajaba en Columbia en su “Fly Room”, la habitación de las moscas en la que buscaba mutantes de *Drosophila melanogaster*. Finalmente encontró un mutante de ojos blancos cuya segregación estaba ligada al sexo. El resultado era sumamente importante, por primera vez la herencia de un carácter había quedado unida al cromosoma X, una estructura celular. La información de una mutación y su herencia se vinculaba y se situaba sobre un cromosoma. Morgan publicó sus resultados en 1910 y obtuvo el premio Nobel en 1933. El estudio de los cromosomas y de la información que portaban sería el tema sobre el que McClintock investigaría.

La Universidad de Cornell donde estudió de 1919 a 1923 era mixta, aceptaba mujeres, pero no en todos sus programas. Bárbara no pudo estudiar Mejora Vegetal que estaba reservada para hombres y se inscribió en el departamento de Botánica. Su vida social cambió e hizo numerosos amigos, tocaba el banyo en un grupo de jazz e incluso le propusieron unirse a una hermandad universitaria, pero lo rechazó por sus prácticas discriminatorias. Sí aceptó la invitación de un profesor para que se inscribiera en un curso de postgrado de Genética. Desde ese momento la Genética sería su vida.

Me dejó libre para hacer lo que quisiera, completamente libre

Durante su licenciatura, McClintock se había apuntado a un seminario de Citología impartido los sábados por su profesor de Botánica Lester W. Sharp. Barbara debió mostrar rápidamente su habilidad y su capacidad con el microscopio porque inmediatamente se convirtió en asistente de Sharp en las clases de Citogenética. Una vez obtenida la licenciatura, continuó con estudios de postgrado y Sharp pasó a ser su director de tesis. El tema lo escogió ella. Según sus propias palabras, Sharp simplemente la dejó libre para hacer lo que quisiera, completamente libre. Su elección fue la de estudiar los cromosomas del maíz durante la meiosis.

En 1924 ocupó una plaza de asistente remunerado de un investigador postdoctoral, Lowell F. Randolph. Había sido doctorando de Rollins A. Emerson, principal genético del maíz de la Universidad de Cornell y en ese momento trabajaba para el departamento de Agricultura (USDA). Randolph y McClintock tuvieron desacuerdos científicos y personales. Trataban de determinar el número de cromosomas del maíz e identificarlos. No todas las líneas que analizaban tenían los mismos cromosomas y discutían por los resultados obtenidos, y también discutieron sobre los méritos de cada uno de los autores en un trabajo publicado en *American Naturalist* de 1926. A partir de ese momento, McClintock pasó a trabajar en solitario y escogió como tema la citogenética de las células madre del polen de una planta de maíz que había encontrado. Era triploide, con tres juegos de cromosomas.

Se doctoró en Botánica en 1927 por la Universidad de Cornell. Los resultados de su tesis doctoral se mostraron en la revista *Genetics* en 1929, su primera publicación importante en solitario. Randolph pudo adelantarse en la determinación del número cromosómico del maíz, al menos lo publicó antes, pero McClintock identificó cada uno de los cromosomas atendiendo a su tamaño y la posición de “estrechamientos”, los centrómeros. Mientras que otros investigadores estudiaban la primera metafase meiótica en la que los cromosomas están más contraídos, Barbara “miró en otro sitio”, en la metafase de la división mitótica de las células haploides del polen que se produce tras la meiosis (*Science*, 1929) o en paquitene, cuando los cromosomas no están tan condensados como en la metafase (**Fig. 3**). La paquitene es una de las etapas de la primera profase de la meiosis.; en ella los cromosomas homólogos ya están emparejados observándose al microscopio como parejas de cromosomas o bivalentes; en esta etapa no se distinguen, aunque existen, las dos cromátidas de cada cromosoma.

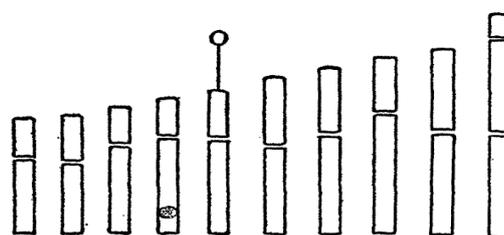
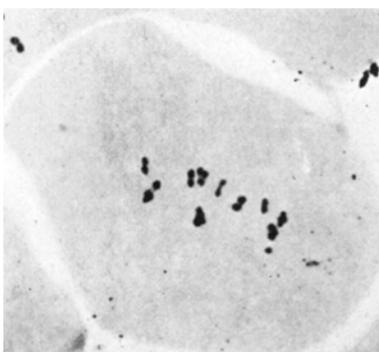


FIG. 1

Figura 3. Izquierda, metafase I de un individuo $2n+4$ que incluye 7 bivalentes, 3 trivalentes (tres cromosomas se han unido por tener fragmentos homólogos) y un univalente (cromosoma sin pareja), *Genetics* 1928. Derecha, primer idiograma de maíz, publicado por McClintock en 1929 en *Science*. Para distinguir los cromosomas, Barbara tuvo que observar las células en paquitene en lugar de metafase

Al terminar la tesis doctoral obtuvo un contrato (1927-31) como instructor de Citogenética de maíz en la propia Universidad de Cornell. Posteriormente lideró el grupo de citogenética del maíz, su campo de interés a lo largo de toda su carrera. En el grupo de investigación se encontraban otros dos doctorandos de Emerson, George Beadle y Marcus Rhoades. Beadle publicó parte de su tesis con McClintock en *Science* (1928) y obtendría el premio Nobel en 1958 con Edward Tatum por sus estudios sobre la relación de un gen una enzima, en *Neurospora crassa*. Rhoades llegó a ser presidente de la *Genetics Society of America* y editor jefe de la revista *Genetics*.

Cuando veo una célula, desciendo hasta allí y miro alrededor

McClintock, Rhoades y Beadle (**Fig. 4**) formaron el núcleo principal del grupo de Genética o Citogenética Vegetal y trataron de demostrar que los genes se encontraban en los cromosomas, algo parecido a lo que Morgan y su equipo estaban haciendo en *Drosophila*. Los tres investigadores trabajaban por su cuenta, generalmente sin la presencia de ningún profesor. McClintock indica que el mérito del éxito del grupo recaía en su supuesto jefe, el profesor Emerson, que ignoró sus comportamientos aparentemente extraños. Rhoades y Beadle han dicho de ella que era algo especial, fantástica, espectacular o el único científico al que considerar un genio. Otros colaboradores la calificaron de irritante y difícil, Randolph no fue el único. En una ocasión Rhoades le preguntó cómo podía ver tanto con el microscopio; ella contestó “Bueno, ya sabes, cuando veo una célula, desciendo hasta allí y miro alrededor”.



Figura 4. Izquierda, Beadle (agachado), Rhoades, Emerson y McClintock formaban el grupo de investigación de genética del maíz en 1929. Derecha, McClintock y Creighton, amigas durante toda su vida, la foto es de 1950

En 1929 Harriet Creighton se incorporó al grupo. Inicialmente quería trabajar en cuestiones de fisiología, pero al conocer a McClintock sus planes cambiaron de inmediato. Trataría de encontrar una prueba física de que durante la meiosis alguno de los genes de uno de los padres, junto con el fragmento cromosómico en el que estaba, se intercambiaba con el cromosoma homólogo del otro parental. Para conseguirlo, las dos mujeres tendrían que encontrar cromosomas con diferencias morfológicas entre las plantas utilizadas como parentales y encontrar caracteres con fenotipos diferentes cuyos genes se situasen en los cromosomas “marcados”. Pero eso no sería nada fácil.

¿Ya habéis enviado vuestros resultados a una revista...?

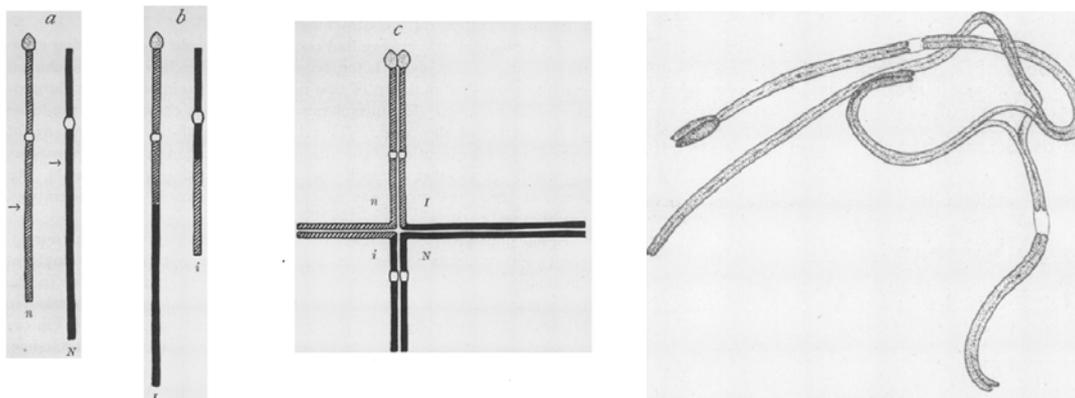


Figura 5. Imágenes del trabajo de 1930 en *PNAS* de McClintock. A la izquierda, obtención del cromosoma con las dos anomalías morfológicas utilizado para demostrar la relación entre recombinación genética e intercambios cromosómicos. En centro formación del tetravalente. A la derecha, esquema de un tetravalente en anillo en el que interviene el cromosoma obtenido.

McClintock proporcionó a Creighton semillas de plantas en las que había detectado anomalías cromosómicas, entregaba el material más valioso del que disponía a una recién llegada. Sembraron, cuidaron las plantas y realizaron cruzamientos manuales con aquel material. El experimento se describe en todos los libros de Genética. Los parentales diferían en dos caracteres típicamente mendelianos y observables en los granos de maíz, el color de la aleurona (coloreada o transparente; locus *C,c*) y la morfología del endospermo que podía ser amilácea o cética (*waxy*; locus *Wx,wx*). Los caracteres estaban controlados por sendos genes situados en el cromosoma 9 del maíz. Pero tenían una planta con un cromosoma 9 anómalo, con un nudo o bulto (*Knob*) y una translocación con un fragmento del cromosoma 8 que produce meiosis en las que se agrupan cuatro cromosomas formando una estructura en anillo. Este detalle se suele simplificar en los libros de texto por su complejidad, pero no había problema suficientemente complejo para que McClintock no pudiera solucionarlo.

En un cruzamiento prueba se encuentran descendientes recombinantes (para los marcadores observables en la semilla), es decir, con ordenaciones diferentes a las de las plantas parentales que coinciden con los que portan una u otra alteración del cromosoma 9, pero no las dos. Habían demostrado el proceso de la recombinación genética al mismo tiempo que habían localizado los genes ordenados de forma lineal sobre un cromosoma concreto. Durante la meiosis se producen intercambios cromosómicos, entrecruzamientos observables que van acompañados del intercambio de información entre cromosomas homólogos de los individuos parentales. Los resultados se muestran en las **Figuras 5 y 6**. Es un poco complejo, pero no podía ser de otra forma tratándose de un experimento de Barbara. Con los trabajos de Morgan en *Drosophila* y el experimento de Creighton y McClintock quedaba demostrada definitivamente la teoría cromosómica de la herencia, propuesta por Walter Sutton y Theodor Boveri en 1902, los genes están dispuestos linealmente sobre los cromosomas. De la naturaleza y estructura del material hereditario todavía se sabía muy poco, Watson ni siquiera se había acercado a los campos de maíz de McClintock.

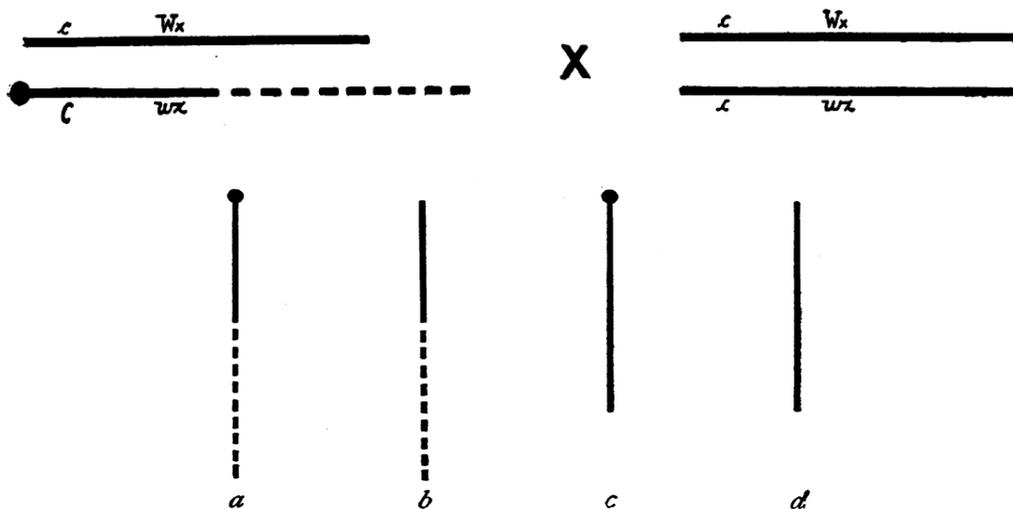


FIGURE 1

TABLE 2

	$\frac{\text{KNOB-C-wx}}{\text{KNOBLESS-c-Wx}} \times \frac{\text{KNOBLESS-c-wx}}{\text{C-Wx}}$		
	$\frac{\text{C-wx}}{\text{c-Wx}}$		$\frac{\text{c-wx}}{\text{C-Wx}}$
Knob	Knobless	Knob	Knobless
12	5	5	34
		4	0
		0	3

Figura 6. Imágenes tomadas del trabajo clásico de Creighton y McClintock de 1931. De arriba abajo: i) esquema del cruzamiento realizado, ii) cromosomas obtenidos, los centrales son recombinantes, y iii) tabla de la segregación obtenida. Las clases de descendientes obtenidas con 5 individuos son recombinantes entre el primer marcador y el telómero, las clases con 4 y 3 individuos son recombinantes entre los dos marcadores morfológicos. Los individuos o gametos parentales corresponden a las clases con 34 y 12 individuos, estos últimos son menos porque portarían la translocación y eso reduce su fertilidad. Un apunte importante, los cromosomas dibujados por McClintock están en paquitene, y en esta fase no se distinguen las cromátidas. Las parejas de los esquemas se corresponden con los cromosomas homólogos y no se distinguen las cromátidas.

Durante el verano siguiente, Morgan, el genético más importante de Estados Unidos, con su segunda nominación al Nobel (aunque tendría que esperar tres años más para obtener el galardón), acudió a la Universidad de Cornell para impartir unas charlas. Quiso visitar y hablar con McClintock y con Creighton y ellas le expusieron sus experimentos y sus planes para confirmar sus conclusiones con la cosecha de 1931. La primera pregunta de Morgan fue si ya habían enviado sus resultados a una revista revisada por pares. No podían esperar. Además, ofreció su invitación para publicar los trabajos en la revista *PNAS*, ya que hasta 1995 la publicación en esta revista estaba limitada a los miembros de la Academia Nacional de Ciencias o a trabajos invitados. Algunas de las imágenes de las publicaciones, dos de McClintock en solitario y otra firmada por las dos investigadoras, se muestran en las **Figuras 5 y 6**.

A partir de 1930 el grupo de citogenética de Cornell desapareció. Beadle se fue al Instituto Caltech (California Institute of Technology). En 1935, Rhoades empezó a trabajar para el USDA y Creighton en una universidad para mujeres de Connecticut. McClintock dejó el grupo en 1931.

Fue una experiencia traumática, no estaba preparada para eso

Desde 1931 a 1936, McClintock obtuvo diferentes becas, como la del Consejo Nacional de Investigación, la de la Fundación Guggenheim y la de la Fundación Rockefeller, que la llevaron a diferentes laboratorios de Estados Unidos y Alemania. Fue la época más productiva en cuanto a número de publicaciones de Barbara. En el Caltech se reencontró con Beadle y el propio Morgan. Su llegada al Caltech no fue sencilla, era un instituto exclusivo para hombres y los administradores se mostraron reticentes a la entrada como investigadora de la que sería la primera mujer. En la Universidad de Missouri trabajó con Lewis Stadler, a quien había conocido en Cornell. Stadler utilizaba rayos X para obtener mutantes de maíz y McClintock conseguiría conocimientos y material para el trabajo que le daría el premio Nobel. Irradiaban polen con el que fecundaban plantas sanas, McClintock observaba meiosis de las plantas obtenidas y pudo distinguir roturas y reordenaciones cromosómicas. Encontró plantas con fenotipos alterados y cromosomas anormales, incluidas plantas variegadas y cromosomas en anillo. Los cromosomas en anillo se producían por la ruptura de los extremos de los cromosomas y la fusión de las zonas rotas, los extremos rotos se unían formando cromosomas en anillo, mientras que los extremos normales, telómeros, prevenían la circularización de los cromosomas.

En 1933 con la beca Guggenheim, McClintock viajó a Alemania para trabajar con Curt Stern en Berlín. Stern había obtenido resultados semejantes a los de Creighton y McClintock en los que se relacionaba recombinación genética y reordenación cromosómica, aunque ellas los publicaron antes (animadas por Morgan). Stern era judío, estaba haciendo una estancia de investigación en Estados Unidos y había decidido quedarse permanentemente en California dada la situación política que se estaba viviendo en Alemania. McClintock fue “acogida” por

Richard Goldschmidt, genético y pensador que veía la evolución como un proceso en que las grandes mutaciones producían ocasionalmente monstruos afortunados. Se llevó bien con él por su carácter innovador e inconformista, aunque no le gustaba cómo basaba sus trabajos en suposiciones con pocos datos experimentales. Para McClintock sus días en Berlín fueron una experiencia muy traumática para la que no estaba preparada y Goldschmidt le aconsejó viajar a Friburgo donde el nazismo no campaba tanto por las calles como lo hacía en Berlín. En Friburgo se dejó influir por Hans Spermann, embriólogo ganador del Nobel en 1935, que había propuesto la existencia de grupos celulares que actuaban como organizadores de distintas estructuras durante el desarrollo.

Ese mismo año, McClintock había trabajado en el Caltech con una región extraña del cromosoma 6 de maíz que relacionó con el nucleolo. Siguió trabajando con este material en Friburgo y la denominó Región del Organizador Nucleolar (NOR), al estilo de los organizadores de Spermann. Los resultados los publicó en la revista *Zeitschrift fur Zellforschung*, aunque más tarde confesó que no le gustaba cómo estaba escrito el artículo, ya que seguía alterada por la situación política, aunque hubiera dejado Berlín. La **Figura 7** muestra una de las fotografías del artículo acompañada de su esquema en la que se puede ver la maestría de McClintock interpretando las imágenes del microscopio.

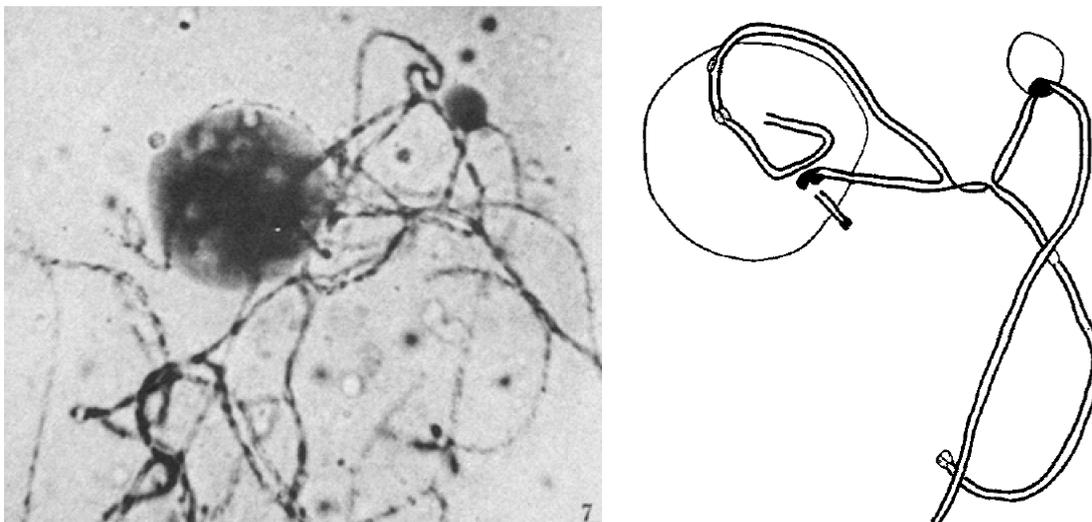


Figura 7. Fotografía y esquema de una paquitene de maíz de una planta heterocigota para una translocación que afecta al nucléolo. Publicadas en 1934 en *Z Zellforsch Mikrosk Anat.*

Después de su estancia en Alemania, Barbara volvió a Cornell para continuar su periodo de becaria, pero deseaba conseguir cierta sensación de seguridad y eso requería un trabajo más estable. Conseguiría una plaza de profesor asistente en la Universidad de Missouri por medio de su antiguo colaborador, Stadler, y trabajaría en esta universidad desde 1936 hasta 1941. Volvería a la investigación de las reorganizaciones cromosómicas provocadas por los rayos X y en este caso,

analizaría el efecto de las inversiones que producen ciclos de roturas y reparación que llevan emparejadas pérdidas de fragmentos cromosómicos (**Figura 8**).

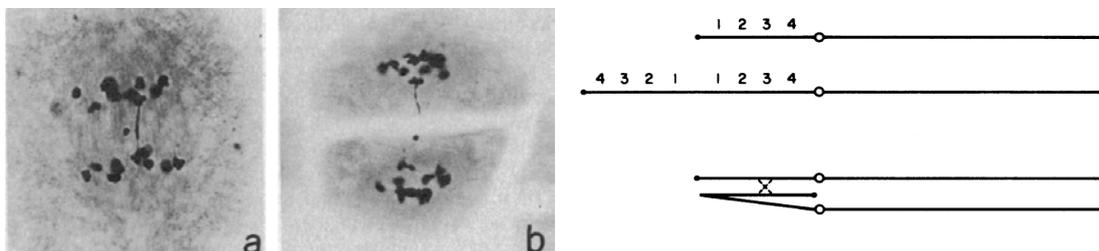


Figura 8. Puentes cromosómicos observables durante la anafase I de la meiosis, se producen rupturas de los cromosomas implicados y pérdidas de fragmentos que carecen de centrómeros. El esquema muestra que las translocaciones y las inversiones serían los responsables de estos puentes cromosómicos. Tomado del artículo de McClintock de 1984.

En 1940 McClintock sintió que su plaza no iba a consolidarse. Aunque comenzaba a recibir reconocimiento exterior -en 1939 fue nombrada vicepresidente de la *Genetics Society of America*-, la administración de la Universidad de Missouri no parecía dispuesta a ofrecer una plaza de titular a una mujer, al menos a una mujer tan reivindicativa, problemática e independiente como Barbara. Además, el cupo de mujeres con plaza fija en la Universidad de Missouri ya estaba cubierto con la zoóloga Mary Jane Guthrie, que no se llevaba muy bien con ella. Finalmente, y por mediación de Stadler, en 1941 la Universidad de Missouri le ofreció una plaza, pero era demasiado tarde. McClintock había hablado con su colaborador y amigo Rhoades que ya era profesor en la Universidad de Columbia en Nueva York y este le propuso trabajar juntos ese verano en el Cold Spring Harbor (CSHL). A finales de 1941 había conseguido trabajo como investigadora en el CSHL, inicialmente temporal y en 1943 fijo. Trabajaría en el CSHL durante 50 años, desde 1942 hasta 1992. Desde 1967 como investigadora emérita. Aunque no sería hasta 1948 cuando tuviera que reñir al joven Watson por estropear su plantación de maíz.

Pensé que no podía decepcionar a las mujeres

En el CSHL McClintock continuó trabajando con las alteraciones cromosómicas del maíz. Tenía su propia parcela experimental donde crecía, reproducía y cruzaba sus plantas. Publicaba regularmente sus resultados casi siempre en solitario. Su última publicación, *Science*, 1984, recoge su discurso de entrega del premio Nobel, aunque su producción científica había decaído enormemente desde 1953. En un momento determinado empezaron a llegar los premios y el reconocimiento de su trabajo. En 1944 entró como miembro de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos (NAS) y en 1945 obtuvo la presidencia de la *Genetic Society of America*. La fama saltó fuera del mundo académico y científico y se convirtió en un modelo para muchas mujeres, Barbara pensó que otras no

habían tenido tanta libertad en un mundo de hombres y que no podía decepcionar a tantas mujeres que seguían sus logros.

Beadle, que por aquel entonces trabajaba en la Universidad de Standford en California, también había ingresado en la NAS en 1944. Aprovechando la ocasión, Beadle invitó a McClintock a visitar su laboratorio. En Stanford estaban trabajando en *Neurospora*, un típico moho del pan, con el que Beadle junto a Tatum habían determinado que las mutaciones en ciertos genes provocaban pérdidas de actividades enzimáticas (su publicación principal es un artículo en *PNAS* de 1941), investigación que les haría merecedores del Nobel de 1958. Pese a que se había convertido en un organismo modelo, los cromosomas de *Neurospora* eran tan pequeños que se desconocía su número y se sabía muy poco de su citología. McClintock pasó dos meses en Stanford con el objetivo de resolver el problema. Los dos primeros días los pasó con el microscopio y se desanimó por no tener buenos resultados. Fue suficiente un paseo de 30 minutos fuera del laboratorio para resolver el problema y en siete días pudo distinguir los siete cromosomas de *Neurospora*. El resto de la estancia la dedicó a describir todo el proceso meiótico del hongo. Eso sí, Barbara aclaró en la publicación de 1945 donde describe los siete cromosomas que la posición de los centrómeros de los cromosomas más pequeños necesitaba confirmación.

En 1957, Paul C. Mangelsdorf invitó a McClintock a viajar a Perú para formar a jóvenes investigadores en el análisis citogenético del maíz. Después, a través de un proyecto de la NAS financiado por la Fundación Rockefeller que duraría de 1963 a 1969, realizaría cortas estancias en diferentes países de Latinoamérica. El objetivo principal del proyecto era estudiar el origen del maíz cultivado. Los viajes a Latinoamérica continuarían una vez finalizado el proyecto hasta 1981. Es posible que estos viajes supusiesen un escape para Barbara si se considera lo que había ocurrido en un congreso en el CSHL en 1951. Sus ideas sobre genes que cambiaban de posición y regulaban la expresión génica, los llamados “genes saltarines” habían tenido una pésima acogida entre otros investigadores, los más amigables se mostraron escépticos, otros utilizaban calificativos como el de “ideas locas”, e incluso algunas risas. Había perdido el respeto de sus colegas.

Un silencio sepulcral, un anticipo de la recepción de sus hallazgos

Desde el nacimiento de la Genética o de la propia McClintock, los genes se consideraban entidades estables, dispuestos en un patrón lineal ordenado en los cromosomas; eso proponía la Teoría Cromosómica de la Herencia que McClintock había contribuido a probar. El modelo del DNA de Watson y Crick lo reafirmaría después; la visión general del DNA era el de una larga molécula sumamente estable. La existencia de genes capaces de cambiar de posición (transponerse) desafiaba el paradigma de lo que los genes eran capaces de hacer. Barbara propuso que dependiendo del lugar en el que los “genes saltarines” se insertaran como resultado de la transposición, podían alterar la expresión de otros genes de forma reversible. Nada menos que un gen al que llamó “Dissociator” o

Ds sería capaz de regular a un gen estructural inactivándolo (en su experimento, el gen de color de la semilla, *C*) y esta regulación se basaba en su propio movimiento. Más complicado aún, el movimiento de *Ds* dependía de un segundo gen regulador, “Activator” o *Ac*. La regulación era reversible y *Ds* podía abandonar su posición permitiendo la actividad del gen estructural.

Esta hipótesis revolucionaria lanzada por McClintock se basaba en la aparición de granos de maíz manchados o moteados y la observación de cromosomas en meiosis que sufrían roturas siempre en la misma posición. En la Figura 9, se puede observar cómo el cromosoma 9 forma un bivalente durante la paquitene, pero en ocasiones uno de los cromosomas se ha roto en el punto (c). En algunos casos, McClintock considera que a partir de ese punto de ruptura sólo queda uno de los cromosomas homólogos. La ruptura de la posición en la que se localizaría *Ds* va acompañada de la pérdida del color. El proceso de ruptura y movimiento estaría controlado por el otro gen, *Ac*; únicamente se observan cromosomas rotos en individuos que incluyen un alelo dominante de este gen.

McClintock presentó sus datos y propuso sus explicaciones en un trabajo clásico publicado en 1950 en *PNAS* y lo presentó en un congreso en el CSHL en 1951. Las imágenes de la **Figura 9** corresponden a la publicación de ese congreso. Uno de los asistentes a la presentación relata que cuando McClintock terminó su explicación hubo un silencio sepulcral, un anticipo de la recepción inicial que recibirían sus hallazgos. Barbara comentó después que se asustó cuando descubrió que no lo entendían y que no lo tomaban en serio. En 1950, descubriría otro elemento móvil de funcionamiento aún más complejo *Spm* o Supresor-Mutator; este gen podía alternar una forma activa y otra inactiva durante el desarrollo (se trataba de una cuestión de regulación a largo plazo de tipo epigenético), faltaban muchos años y mucho conocimiento para interpretar este resultado.

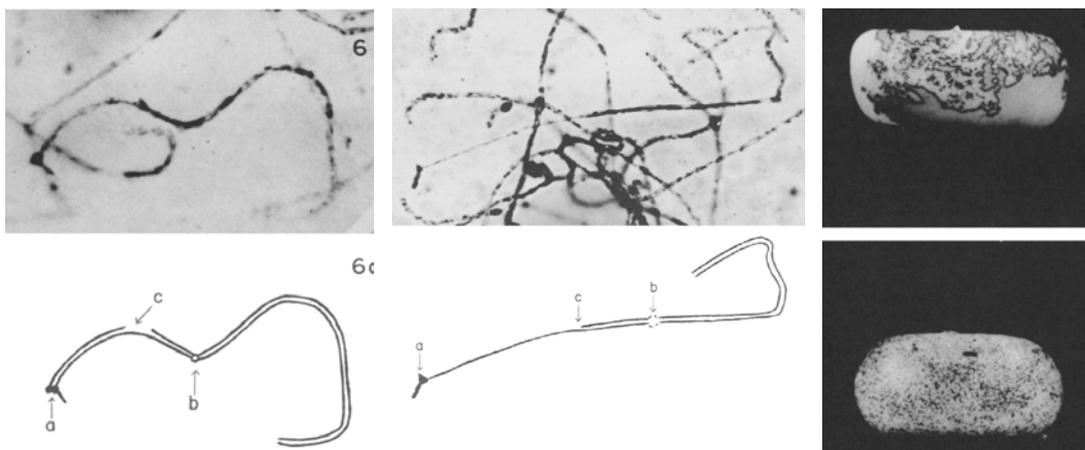


Figura 9. Fotografías en las que puede verse la ruptura repetida en un punto en el que se localizaría un gen regulador, capaz de “saltar” (cuando hay una ruptura) a la posición en el que se encuentra el gen responsable de la coloración del grano, que pasa a tener un fenotipo moteado. Las figuras pertenecen a un artículo publicado en un congreso del CSHL de 1951, el artículo clásico de *PNAS* de 1950 carece de imágenes.

...si lo dice McClintock será verdad

Cuentan algunas fuentes que después de la presentación de los “genes saltarines” en el congreso de CSHL de 1951, preguntaron su opinión a Alfred Sturtevant, heredero de Morgan en el estudio de la Genética de *Drosophila* y autor del primer mapa genético con tres genes. Contestó: “No he entendido absolutamente nada, pero si lo dice Barbara será verdad”. Posiblemente la anécdota es falsa, porque al menos ese Sturtevant no asistió al congreso. Pero cualquiera de los científicos que sí lo hicieron podría haber dicho algo semejante, o al menos la primera de las dos frases. Por su parte McClintock reducirá sus publicaciones, y comenzará con sus viajes por Latinoamérica.

A mediados de la década de 1960, se describen los mecanismos relacionados con el flujo de información desde el DNA a las proteínas, incluyendo la estructura del propio DNA o la función de los distintos tipos de RNA. Se descifraron los secretos del código genético y los genes dejaron de ser conceptos abstractos. Desde que Watson y Crick publicaron en 1953 la estructura del DNA y sus posibilidades en la replicación, la adquisición de conocimientos sobre biología molecular entró en una dinámica vertiginosa.

En 1963, Taylor describió cómo los bacteriófagos producían mutaciones al insertarse en el genoma de *Escherichia coli*. Shapiro en 1969 encontraría material genético que podía moverse dentro de la misma bacteria. En su experimento, un transposón se insertaba e inactivaba el operón de la galactosa, era el primer transposón que se había aislado. En 1981, 30 años después de la presentación de los “genes saltarines” de McClintock, Engels y Preston identificaron los elementos P de *Drosophila* que eran capaces de cambiar de posición, se trataba nada menos que de transposones en eucariotas, Barbara tenía razón, hay transposones en eucariotas. Finalmente, en 1983, Fedoroff, Wessler y Shure aislarían los elementos *Ac* y *Ds* de maíz. Los dos elementos son transposones, son homólogos y muy semejantes, pero *Ds* ha perdido un fragmento que codifica para la transposasa. *Ds* necesita de la transposasa de *Ac* (el “gen” regulador de McClintock) para realizar la transposición, o lo que es lo mismo, saltar a otra posición. Por fin se podían entender los experimentos y las explicaciones de McClintock en 1951 y 1953. Puede que la anécdota de Sturtevant no sea cierta, pero Barbara tenía razón. Ese mismo año, 1983, McClintock recibiría el premio Nobel en solitario (**Fig. 10**), nueve años antes de su muerte por causas naturales en 1992.

Los transposones forman una parte importante de prácticamente todos los genomas. Son asombrosamente abundantes, el porcentaje de DNA en plantas correspondiente a transposones varía entre un 7 % en chopos a el 76 % en el maíz. En humanos hay más de 3 millones de transposones o fragmentos de transposones que representan cerca de la mitad del genoma. Los transposones participan en la regulación de la expresión génica, son fuentes de mutación, están relacionados con el cáncer y con otras enfermedades, como la hemofilia, la distrofia de Duchenne o el Alzheimer y son responsables de diferentes fenotipos en todo tipo

de especies, incluidas la resistencia a antibióticos de numerosas bacterias o el fenotipo oscuro típico del melanismo industrial de *Biston betularia*, ejemplo clásico de la selección natural. También han participado en la “domesticación” de la cianobacteria que dio lugar a los cloroplastos de las plantas. Su movilización depende del ambiente y suelen activarse en situaciones de estrés celular. Con su capacidad de provocar mutaciones esto supone un mecanismo de evolución asociado a los cambios ambientales y esta idea roza con el lamarckismo. Una nueva herejía asociada a los “genes saltarines” descubiertos por Barbara McClintock.



Figura 10. McClintock recogiendo el premio Nobel de manos de Carlos Gustavo, rey de Suecia.

Bibliografía

- Beadle, G. W. y McClintock, B. 1928. A genic disturbance of meiosis in *Zea mays*. *Science*, 68:433.
- Creighton, H. B. y McClintock, B. 1931. A correlation of cytological and genetical crossing-over in *Zea mays*. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 17:492-497.
- Federoff, N., Wessler, S., y Shure, M. 1983. Isolation of the transposable maize controlling elements *Ac* and *Ds*. *Cell*, 35:235-242.
- Federoff, N. V. 1994. Barbara McClintock (June 16, 1902-September 2, 1992). *Genetics*, 136:1-10.
- Keller, E. F. 1983. A feeling for the organism, the life and work of Barbara McCintock. Freeman., U.S.A.
- McClintock, B. 1929. A cytological and genetical study of triploid maize. *Genetics*, 14:180-222.
- McClintock, B. 1929. Chromosome morphology in *Zea mays*. *Science*, 69:629.
- McClintock, B. 1930. A cytological demonstration of the location of an interchange between two non-homologous chromosomes of *Zea mays*. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 16:791-796.
- McClintock, B. 1931. The order of the genes *C*, *Sh* and *Wx* in *Zea mays* with reference to a cytologically known point in the chromosome. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 17:485-491.
- McClintock, B. 1934. The relation of a particular chromosomal element to the development of the nucleoli in *Zea mays*. *Zeitschrift fur Zellforschung und mikroskopische Anatomie*, 21:294-335.
- McClintock, B. 1945. Neurospora. I. Preliminary observations of the chromosomes of *Neurospora crassa*. *American Journal of Botany*, 32:671-678.
- McClintock, B. 1950. The origin and behavior of mutable loci in maize. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 36:344-355.
- McClintock, B. 1953. Induction of instability at selected loci in maize. *Genetics*, 38: 579-599.
- McClintock, B. 1984. The significance of responses of the genome to challenge. *Science*, 226:792-801.
- Ravindran, S. 2012. Barbara McClintock and the discovery of jumping genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 109:20198-20199.
- Small, C. 2017. Barbara McClintock. Cytogeneticist and discovered of mobile genetic elements. Colección Women in Science. CavendishSquare, Nueva York.
- Spangerburg, R. y Moser, D. K., 2008. Barbara McClintock: Pioneering Geneticist. Chelsea House, Nueva York.

AMBIÓLOGOS DE AQUÍ

Bióloga, empresaria, investigadora y panadera

María Franco

Fue un encuentro fortuito en un tren lo que me ha llevado a escribir estas líneas. Curiosamente, esa ha sido una constante en mi vida, encuentros casuales que han ido dejando huella de alguna forma. De aquel encuentro surgió la propuesta de escribir sobre mi trayectoria, que acepté con gratitud e ilusión. Sin embargo, pronto me invadieron dudas y miedos: *¿Quién soy yo para contar mi experiencia? ¿Qué puedo aportar con mi recorrido?* Revisé ediciones anteriores de la revista y descubrí que Sara García, una antigua compañera de la facultad, había colaborado en esta misma sección. Y pensé: *de panadera a astronauta, ¿cómo puedo comparar mi historia con la suya?*

Reconocí entonces esa voz interna tan familiar, la misma que, en otros momentos de mi vida, me decía que no era suficiente y me hacía temer ser juzgada. Entre dudas e inseguridades, recordé las palabras de José Luis Acebes, quien me animó a escribir este artículo: «Espero que puedas contar tu experiencia; sin duda será de ayuda para muchos». Eso espero, que estas líneas puedan inspirar a alguien, sea cual sea su situación personal. Así que aquí va, ésta es mi historia.

De la panadería familiar a la ciencia

Mi nombre es María Franco. Si tuviera que definirme profesionalmente, diría que soy bióloga, empresaria, investigadora y panadera. Crecí en el negocio familiar «La Tahona de Sahagún», rodeada de harina, pan y dulces, donde jugar y ayudar se fundían en una sola cosa. Mi padre, historiador y panadero de tercera generación, y mi madre, trabajadora social, decidieron emprender juntos este camino. Para mi hermana y para mí, la panadería fue nuestra infancia, el lugar que nos enseñó a ver el mundo con otros ojos. Sin saberlo, entre juegos y tareas, desarrollamos habilidades y cualidades que aún hoy nos acompañan.

Siempre fui una niña curiosa, de esas que piden microscopios como regalo y desean entender lo que no pueden ver. Como muchos niños, creía que podía hacer cualquier cosa que me propusiera; no había límites. Esa curiosidad me acompañó durante la adolescencia y me llevó a participar activamente en movimientos estudiantiles, impulsada por el deseo de mejorar el sistema y ser agente de cambio. Fueron años de preparación y de sueños sobre la universidad, aunque con la presión de sentir que esa decisión definiría quién sería o en quién me convertiría.

Finalmente, la biología fue la opción ganadora, lo que dio lugar a un sinfín de preguntas de familiares y amigos: *¿Esa carrera tiene salidas? ¿De qué vas a trabajar?* o incluso *“¿Bióloga? ¿Como Ana Obregón?”*. Imagino que muchos de

mi generación escucharon lo mismo. Afortunadamente, hoy en día, la percepción de la biología está cambiando, y me enorgullece pensar que formamos parte de ese cambio.

Comenzó el primer curso de los cinco que vendrían, ya que mi promoción fue una de las últimas de licenciatura. Fueron unos primeros pasos difíciles, e hizo que mi mundo y lo que conocía hasta el momento se tambalease. Sin embargo, gracias al apoyo de mis compañeros y amigos, esos años de esfuerzo fueron también de crecimiento. Largas noches de estudio, apuntes compartidos y sobre todo ser el apoyo los unos de los otros cuando perdíamos la confianza en nosotros mismos. Ellos son de lo mejor del regalo que me dejó esa etapa. A medida que avanzaban los cursos, comencé a disfrutar de verdad la carrera. Si tuviera que elegir de nuevo, no lo dudaría; escogería otra vez el mismo camino. Creo que la biología debería ser parte fundamental de nuestra educación desde pequeños: entender el frágil equilibrio de nuestro entorno a través de la ecología, nuestras raíces a través de la zoología y antropología, y descubrir lo invisible mediante la bioquímica, la fisiología o la biología molecular.

Llegó el tercer año de carrera, momento de decidir qué tipo de bióloga quería ser: *¿de bata o de bota?* Aunque con el corazón un poco dividido, siempre tuve claro que me veía llevando una bata blanca. En ese momento, gracias a unas jornadas sobre bancos de germoplasma organizadas en la universidad, tuve la oportunidad de realizar mis primeras prácticas, y descubrí que ese campo integraba muchas de mis áreas de interés: fisiología vegetal, genética, ecología, botánica. Jamás imaginé que esas primeras prácticas serían el inicio de mi futuro.

Encontrando un propósito

Finalmente llegó el momento de graduarnos y salir al mundo real, la burbuja donde habíamos estado se desvanecía, y con ello llegaron las dudas de decidir qué camino tomar: estudiar un máster, buscar trabajo, realizar prácticas... Entonces, de nuevo sin avisar y como resultado de llamar a muchas puertas y buscar muchas opciones, me encontré firmando un contrato laboral en el Banco de Germoplasma de Olarizu (Vitoria-Gasteiz), donde había realizado mis prácticas durante la carrera. Fue un período en el que me formé en un campo especializado, lo que me permitió participar en un proyecto de conservación en el “Millennium Seed Bank” del Royal Botanic Gardens, Kew, en Londres. Cuando comencé a trabajar en Inglaterra empecé a tomar conciencia de la excelente formación que había recibido. Allí tuve la oportunidad de colaborar en la conservación de un grupo específico de especies amenazadas y endémicas de la cordillera cantábrica. Los bancos de germoplasma son reservorios de información genética, en el caso de las plantas, donde se almacenan semillas para mantener su viabilidad a largo plazo. Estos bancos son esenciales para la conservación de la biodiversidad, la investigación genética y la mejora de cultivos, ya que permiten disponer de recursos genéticos que pueden ser utilizados para desarrollar nuevas variedades más resistentes a enfermedades, condiciones climáticas extremas o para mejorar

características agronómicas y nutricionales. Había encontrado en mi trabajo un propósito, conservar y proteger nuestro medio, nuestro presente y nuestro futuro.

Fue una experiencia profundamente enriquecedora: realizar colaboraciones internacionales, ver nuevas oportunidades y tener perspectivas diferentes a la mía, me hizo volver a recuperar esa ilusión de cuando era niña, y creer que no había límites. Gracias a encontrarme en esa posición, y empujada por mis compañeros (de nuevo de los mejores regalos de mi experiencia), decidí solicitar una beca internacional de doctorado, que, por supuesto creía que no estaba cualificada para conseguir: yo había sido una estudiante normal, *¿cómo iba a poder competir con mi expediente?* Para mi sorpresa me la concedieron. No podía sentirme más agradecida, el esfuerzo, trabajo e ilusiones habían dado sus frutos.

Un nuevo rumbo

Pero una mañana recibí una llamada que cambiaría todo, tenía que volver a casa. En ese momento, aunque no sabía lo que había ocurrido, algo dentro de mí comenzó a prepararme. Mi padre había fallecido, y de repente mi mundo se paró, aunque yo sentí que desde ese momento no podría parar de correr. Él era el centro de nuestra familia y del negocio familiar, y todos los que hayan vivido un negocio familiar saben que tu vida va ligada a él. Sin dudarlo, decidí regresar a casa para asumir mi responsabilidad en el negocio y brindar estabilidad a mi familia. En ese momento tenía 25 años y carecía de conocimientos específicos en gestión empresarial o en el sector. Sin embargo, creo que todo lo que había vivido hasta ahora me preparó para poder hacer frente a la situación. No había “plan b”, y esa confianza que había adquirido, me permitió seguir hacia adelante. En realidad, sí que conocía el sector, había crecido en él. Toda una vida observando y ayudando había calado en mí. Tampoco sabía cómo gestionar una empresa, pero durante años me había formado para tener un pensamiento crítico, entender los procesos, abordar proyectos y resolver problemas. Gracias a la metodología científica, abordé la panadería como un proyecto (eso sí sabía cómo hacerlo): primero observé y analicé, luego me formé en el área de panificación y gestión, y finalmente implementé una estrategia.

Tras ocho años de gestión, crecimiento, renovación de nuestras instalaciones, creación de nuevos puntos de venta..., se podría decir que habíamos conseguido nuestro objetivo. Como resultado de todo este trabajo he recibido premios como el de “Mujer rural emprendedora” en 2022 (**Figura 1**), también he podido formar parte de diferentes plataformas de divulgación, que me han permitido dar voz a nuestro sector, a las mujeres y al medio rural. Además del reto laboral, el mayor reto fue a nivel emocional, aunque por desgracia este suele quedar en un segundo plano. La decisión que tomé tenía asociada dejar ir a una parte de mí, planes, ilusiones, futuro... Y, aunque mucha gente me decía que podría encontrar maneras de volver a investigar, a mí me parecía imposible.



Figura 1. En “La Tahona de Sahagún”, Sahagún, León. Premio mujer rural emprendedora 2022.

Volver a la ciencia

De nuevo la oportunidad llegó de forma casual, como la mayoría de las cosas relevantes en mi vida: mientras organizaba unas jornadas de formación para la Asociación de Panaderos de Palencia, conocí a Manuel Gómez, catedrático del área de tecnología de los alimentos de la Universidad de Valladolid. Tras una reunión con él y una larga conversación, me ofreció la oportunidad de hacer un doctorado y unir mis dos mundos, la panadería y la investigación. Al salir de aquella reunión, tuve que tomarme un tiempo hasta poder volver a casa, estaba abrumada, sorprendida y sobre todo agradecida por esta oportunidad. Durante dos años y con una pandemia y una crisis económica de por medio, dediqué mi tiempo libre a investigar en el área de mejora nutricional y tecnológica del pan. Esos momentos eran solamente para mí, lo disfrutaba, y volver a ponerme la bata blanca y entrar en el laboratorio me renovó la ilusión.

En 2022 tuve la oportunidad de realizar una estancia en la Universidad de Aarhus, en Dinamarca, en el grupo de Mario Martínez-Martínez. Tomar la

decisión de ir no fue fácil: después de años dedicando toda mi energía a la panadería, soltar el control resultaba difícil (tanto que consideré rechazar la oferta). Sin embargo, una vez que di el paso, volví a encontrar algo que había dejado atrás. Esta experiencia me llevó a tomar una de las decisiones más difíciles de mi vida: darme la oportunidad de seguir el camino de la investigación, gracias al apoyo de mi familia -de mi madre y mi hermana, la cual ahora está al frente del negocio familiar-. Desde hace dos años, me encuentro en Dinamarca, dedicada a la investigación con el objetivo de doctorarme en los próximos meses y comenzar un postdoctorado (**Figura 2**).



Figura 2. En el Food department, Agro Food Park, Aarhus University (Dinamarca).

Actualmente, mi propósito sigue enfocado en unir mis dos áreas de experiencia: la panadería y la investigación (**fig. 3**). Con el objetivo de mejorar la calidad y el valor nutricional del pan mediante el entendimiento de los mecanismos moleculares y estructurales que influyen en sus propiedades, especialmente a través de la mejora de ingredientes y procesos para potenciar sus cualidades funcionales. Además de contribuir a la sostenibilidad del sector, minimizar el

desperdicio y desarrollar panes más saludables sin sacrificar las propiedades nutricionales y organolépticas que los consumidores valoran.

Cada uno debe aprender a jugar con las cartas que tiene, no siempre hace falta tener un “póker” para ganar, y aunque a veces se pierda..., siempre se puede volver a barajar y jugar de nuevo. La vida puede ser difícil y complicada, pero está formada por muchos capítulos, también está llena de azares y oportunidades que llegan de formas inesperadas: un encuentro fortuito en un tren, un café, una conversación... Y no sabemos cuál de estos azares determinará el capítulo siguiente de nuestra historia.



Figura 3. María Franco en el I Foro de mujeres panaderas, Intersicop, Madrid (2022).

MI PROYECTO DE TESIS

Desentrañando el papel de p73 en la adhesión celular y sus implicaciones en contextos sanos y tumorales

Nicole Martínez-García^{1,2}

¹ Instituto de Biomedicina (IBIOMED), Universidad de León.

² Departamento de Producción Animal, Área de Producción Animal. Facultad de Veterinaria. Universidad de León.

nmartg@unileon.es

El grupo de investigación en el que estoy desarrollando mi tesis doctoral está interesado en el estudio de la familia génica de p53, cuyos miembros (p53, p73 y p63) son factores de transcripción implicados en múltiples procesos fisiológicos. Nuestro grupo, junto con otros, ha demostrado que el gen *TP73*, en el que se centra mi proyecto, regula procesos como la angiogénesis (Fernandez-Alonso *et al.*, 2015), o el mantenimiento de las células troncales neurales (Gonzalez-Cano *et al.*, 2010), siendo esencial para la organización del nicho neurogénico de la zona subventricular del cerebro murino (Gonzalez-Cano *et al.*, 2016), o para el mantenimiento de la red vascular (Maeso-Alonso *et al.*, 2022). Todo ello apunta a que p73 desempeña un papel central durante el desarrollo embrionario, siendo esencial para la organización estructural de algunos microambientes complejos, lo cual nos ha llevado a proponer que este gen actúa como un arquitecto tisular. En ese escenario, también resulta fácil imaginar cómo alteraciones en la expresión de este gen podrían favorecer la generación de tumores y la progresión tumoral. Dado que el mantenimiento de la homeostasis y la arquitectura tisular depende, en gran medida, de las adhesiones que establecen las células tanto entre ellas como con la matriz extracelular (ECM), mi tesis doctoral se ha centrado en elucidar los mecanismos moleculares mediante los cuales p73 regula la adhesión celular en contextos fisiológicos y patológicos.

La adhesión celular se lleva a cabo a través de una red de proteínas estructurales y de señalización denominada adhesoma. Las células expresan en su superficie una serie de receptores específicos, denominados moléculas de adhesión, que al unirse a su ligando desencadenan cambios en la señalización celular y en el citoesqueleto, regulando así determinadas respuestas celulares (Alberts *et al.*, 2022). De esta manera el adhesoma es fundamental para el mantenimiento de la arquitectura tisular y controla diversos procesos celulares, como la proliferación, la muerte, la pluripotencia o la migración celular.

Las adhesiones **célula-célula** juegan un papel crucial no solo en la integridad estructural de los epitelios, sino también en la regulación de la capacidad de autorrenovación y pluripotencia (*stemness*) de las células troncales embriona-

rias (ESCs; Soncin y Ward, 2011), a partir de las cuales se derivan todos los tejidos embrionarios. Por lo que respecta a las adhesiones **célula-ECM**, son claves en la migración celular, involucrada en el desarrollo, la respuesta inmunitaria y en la invasión y metástasis tumoral, entre otros (Ridley *et al.*, 2003).

La hipótesis planteada es que p73 regula, directamente y/o indirectamente, la composición y funcionamiento de las adhesiones celulares e influye en procesos clave, como el mantenimiento de la arquitectura tisular, el *stemness* de las ESCs y la capacidad de migración celular, teniendo su eliminación implicaciones importantes tanto en células sanas como tumorales.

Para abordar este proyecto, hemos empleado diferentes modelos celulares (**Fig. 1**). En primer lugar, generamos células ESCs murinas en las que inactivamos *Trp73* mediante el sistema de edición génica CRISPR/Cas9. En estas células analizamos tanto la función de p73 en las adhesiones celulares como en el mantenimiento del *stemness* (López-Ferrerías *et al.*, 2021). Debido al bajo número de adhesiones célula-ECM que forman las ESCs, decidimos utilizar fibroblastos embrionarios de ratón (MEFs) para desentrañar la función de p73 en el establecimiento y maduración de dichas adhesiones y la migración celular. Para ello, hemos caracterizado las adhesiones célula-ECM mediante microscopía confocal y realizado análisis proteómicos para determinar la composición de los complejos de adhesión, al tiempo que hemos estudiado, mediante microscopía de *time-lapse*, las consecuencias funcionales de la falta de p73 sobre la migración celular. Por último, estamos utilizando células de cáncer de mama metastático, con o sin expresión de p73, (SUM159, Lambert *et al.*, 2022) para investigar la función de este gen en un contexto tumoral, centrándonos en el estudio de las adhesiones célula-ECM y la capacidad de migración. En estos momentos estamos optimizando un modelo de invasividad en 3 dimensiones para analizar el papel de *TP73* durante la invasión y metástasis tumoral.

Los resultados de este proyecto permitirán comprender mejor los mecanismos moleculares mediante los cuales p73 regula la adhesión celular. Estas adhesiones son necesarias para el correcto mantenimiento de la arquitectura tisular, el *stemness* de las células troncales y la migración celular. Estos procesos tienen una gran relevancia en la progresión, invasión y metástasis tumoral, por lo que nuestros resultados podrían contribuir al desarrollo de nuevos agentes terapéuticos.

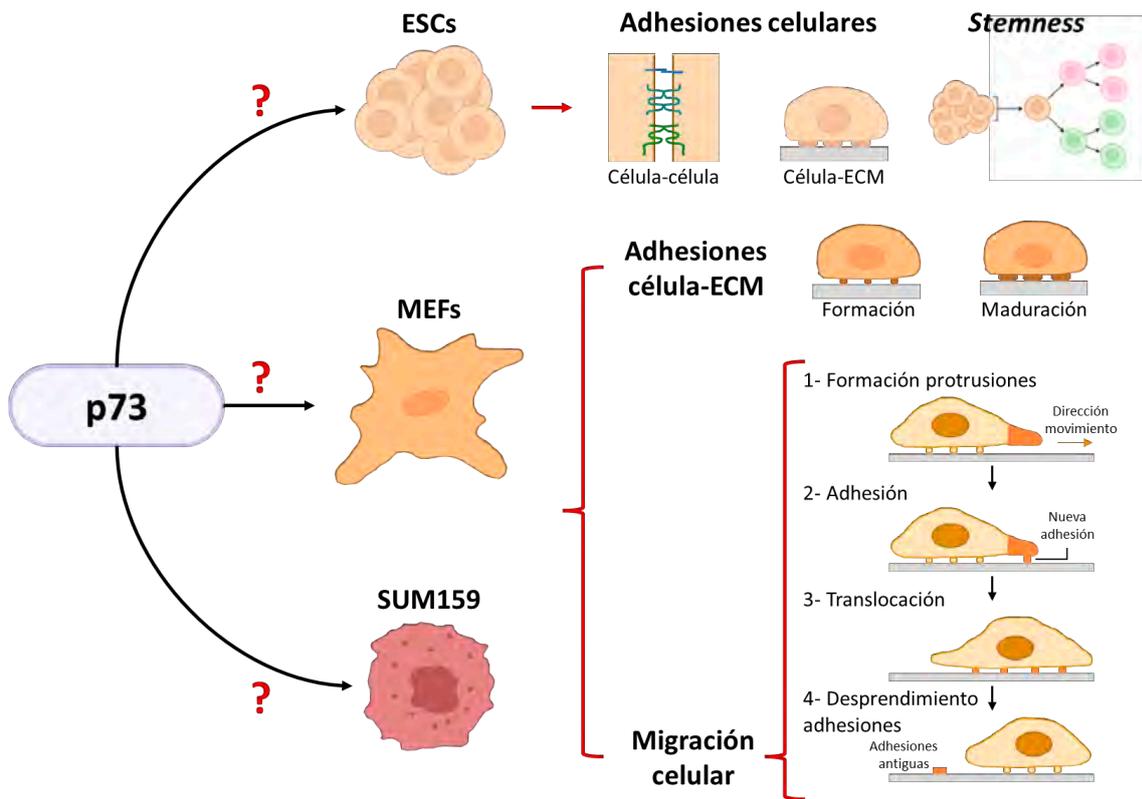


Figura 1. Estudio del papel de p73 en la adhesión celular y sus implicaciones funcionales en contextos sanos (ESCs, MEFs) y tumorales (SUM159).



Foto de la autora Nicole Martínez-García; directoras de la tesis doctoral: Dra. Carmen Marín (Dpto. de Biología Molecular) y Dra. Margarita Marqués (Dpto. de Producción Animal).

Referencias

- Alberts, B., Heald, R., Johnson, A., Morgan, D. *et al.* 2022. Cell junctions and the extracellular matrix. En *Molecular Biology of the Cell*, seventh edition (ed. Twitchell, B.), pp. 1105-1163, W.W. Norton & Company, Inc., Nueva York, Estados Unidos.
- Fernandez-Alonso, R., Martin-Lopez, M., Gonzalez-Cano, L., Garcia, S. *et al.* 2015. p73 is required for endothelial cell differentiation, migration and the formation of vascular networks regulating VEGF and TGF β signaling. *Cell Death & Differentiation*, 22:1287-1299.
- Gonzalez-Cano, L., Fuertes-Rabanal, S., Robledinos-Anton, N., Biz, A., Villena-Cortes, A. *et al.* 2016. p73 is required for ependymal cell maturation and neurogenic SVZ cytoarchitecture. *Developmental Neurobiology*, 76:730-747.
- Gonzalez-Cano, L., Herreros-Villanueva, M., Fernandez-Alonso, A., Ayuso-Sacido, A. *et al.* 2010. p73 deficiency results in impaired self-renewal and premature neuronal differentiation of mouse neural progenitors independently of p53. *Cell Death & Disease*, 1:e109.
- Lambert, A. W., Fiore, C., Chutake, Y., Verhaar, E. R., Strasser, P. C. *et al.* 2022. Δ Np63/p73 drive metastatic colonization by controlling a regenerative epithelial stem cell program in quasi-mesenchymal cancer stem cells. *Developmental Cell*, 57:2714-2730.
- López-Ferreras, L., Martínez-García, N., Maeso-Alonso, L., Martín-López, M. *et al.* 2021. Deciphering the nature of Trp73 isoforms in mouse embryonic stem cell models: Generation of isoform-specific deficient cell lines using the CRISPR/Cas9 gene editing system. *Cancers*, 13:3182.
- Maeso-Alonso, L., Alonso-Olivares, H., Martínez-García, N., López-Ferreras, L. *et al.* 2022. p73 is required for vessel integrity controlling endothelial junctional dynamics through Angiomotin. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 79:535.
- Ridley, A. J., Schwartz, M. A., Burridge, K., Firtel, R. A., Ginsberg, M. H. *et al.* 2009. Cell migration: integrating signals from front to back. *Science*, 302:1704-1709.
- Soncin, F. y Ward, C. W. 2011. The function of e-cadherin in stem cell pluripotency and self-renewal. *Genes*, 25:229-259.

EDUCANDO EN LO NUESTRO

Biometac: proyectos para aprender y enseñar Biología fuera del aula

Esperanza Fernández Martínez¹, Margarita M. Marqués², Iván Prieto Aguilar³, Rosa María Valencia Barrera⁴

- ¹ Área de Paleontología. Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Campus de Vegazana, s/n. Universidad de León. 24007 León. e.fernandez@unileon.es
- ² Área de Producción Animal. Facultad de Veterinaria, Campus de Vegazana, s/n. Universidad de León. 24007 León. mmarm@unileon.es
- ³ Área de Ecología. Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Campus de Vegazana, s/n. Universidad de León. 24007 León. ipria@unileon.es
- ⁴ Área de Botánica. Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Campus de Vegazana, s/n. Universidad de León. 24007 León. rm.valencia@unileon.es

Resumen

Biometac es un grupo de innovación educativa constituido por profesorado que imparte docencia en los tres grados de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales de la Universidad de León (Biología, Ciencias Ambientales y Biotecnología). A lo largo de sus diez años de existencia ha llevado a cabo ocho proyectos centrados en la metodología de trabajo Aprendizaje-Servicio, preparando a estudiantes de segundo y tercer curso de la facultad para diseñar materiales e impartir talleres destinados tanto a alumnado de enseñanza secundaria como al público general. A lo largo de estos proyectos, el trabajo conjunto entre profesorado y alumnado ha permitido desarrollar material muy diverso, publicado en formato tanto analógico como digital, y que funciona como apoyo para la enseñanza de la Biología en diversos ámbitos. Este “aprendizaje fuera del aula” no se centra solo en contenidos, sino que también busca que los estudiantes sean conscientes del papel que, como científicos y divulgadores, pueden desarrollar en la sociedad. Con esta finalidad en mente, los dos últimos proyectos se han dirigido al mundo rural, centrándose en identificar y trabajar problemáticas relacionadas con los objetivos de la Agenda 2030.

Palabras clave

aprendizaje-servicio, Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, innovación docente, medio rural, recursos educativos

Introducción

En el año 2014, la Universidad de León (ULE) comenzó la implantación del Plan de Apoyo a la Innovación docente (PAID) con el objetivo de “fomentar la calidad y la innovación en la docencia” (<https://servicios.unileon.es/innovacion-docente/>). Entre otras acciones, este plan se tradujo en la creación de los denominados Grupos de Innovación Docente (GID), los cuales desarrollan proyectos parcialmente financiados por la Escuela de Formación de la Universidad y orientados a la mejora de diferentes aspectos relacionados con el proceso de enseñanza-aprendizaje. Uno de los grupos pioneros en este plan fue Biometac (**Metodologías Activas de Aprendizaje en Biología, Figura 1**), formado por profesorado y alumnado principalmente vinculado a la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales (en adelante FCCBA). Sus componentes, trayectoria y actuaciones pueden consultarse en el sitio web <https://biometac.unileon.es/>.

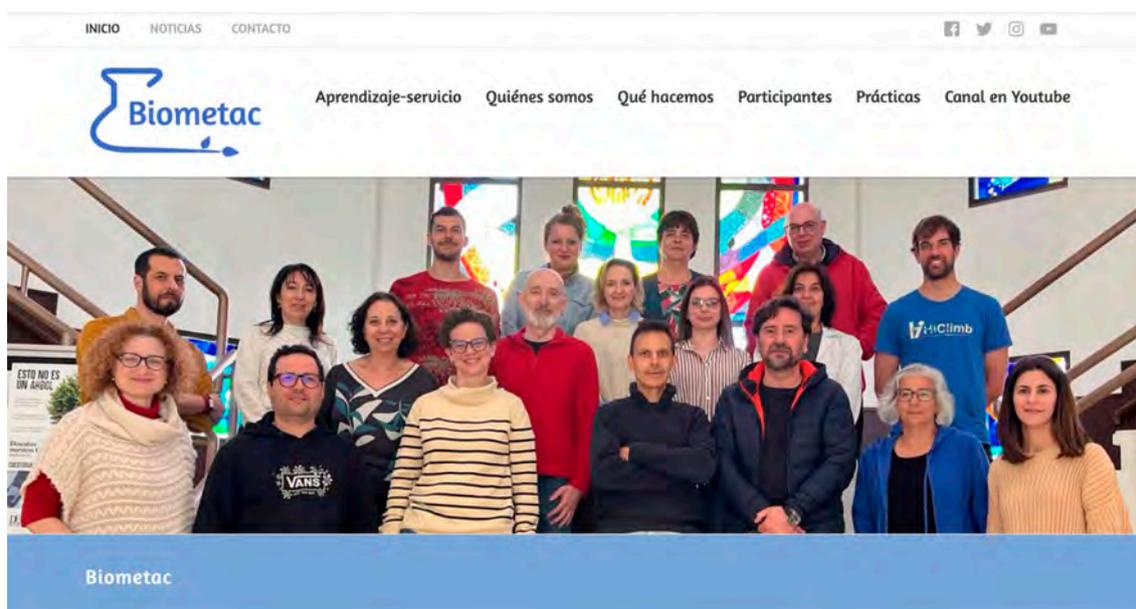


Figura 1. Captura de pantalla de la página de inicio del sitio web de Biometac, con algunos de los profesores integrantes en el curso 2023-24. En la parte superior izquierda aparece el logo del grupo.

La actividad de Biometac se estructura en base a dos ejes centrales: 1/ la aplicación de metodologías de aprendizaje-servicio, y 2/ la enseñanza-aprendizaje de saberes y competencias relacionados con las ciencias de la Tierra y la Vida, que son aquellos que se estudian en los tres grados impartidos en la FCCBA: Biología, Ciencias Ambientales y Biotecnología. Es imprescindible señalar que esta orientación metodológica se apoya especialmente en el contexto del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), que incide en la necesidad de un aprendizaje no sólo de contenidos y habilidades profesionales, sino también de

capacidades sociales y cívicas. Unas capacidades que permiten poner nuestros conocimientos científicos al servicio de la sociedad (Razquin, 2017).

Al tratarse de un grupo de innovación educativa, los proyectos propuestos involucran al profesorado que pertenece al grupo en cada momento, el cual ha ido variando a lo largo de los años. También participan, como actores imprescindibles, los y las estudiantes de Grado que, de forma voluntaria, se presentan para trabajar en estas experiencias. Este alumnado puede proceder de los tres Grados que imparte la FCCBA, aunque hasta la fecha ha sido mayoritario el procedente del Grado en Biología. Además, y por desarrollar metodologías de aprendizaje-servicio, hay que añadir un tercer grupo de participantes: las personas externas a la universidad, que son las destinatarias del “servicio” realizado. La composición de este último grupo es diferente en función del proyecto desarrollado en cada etapa de Biometac. Hasta la fecha, la mayor parte de participantes entran en las categorías de estudiantes de educación secundaria, población vinculada a centros sociales y a asociaciones de la tercera edad, y público diverso que habita o tiene vínculos estrechos con el mundo rural.

Se trata, visto en perspectiva biológica, de una búsqueda de la innovación docente a través de los intercambios y de las relaciones simbióticas entre tres grupos. Su funcionamiento coordinado permite obtener resultados positivos en los proyectos realizados, unos resultados que repercuten en la preparación del alumnado de la FCCBA de cara a su formación no sólo como profesionales sino también como personas con un papel esencial frente a varios de los retos globales que afronta nuestra sociedad.

En este artículo comentaremos brevemente la trayectoria de Biometac, describiendo algunos de los resultados obtenidos y analizando las principales fortalezas de los últimos proyectos realizados.

Biometac y la metodología aprendizaje – servicio

El Aprendizaje-Servicio (ApS) (**Figura 2**) es un método activo de enseñanza-aprendizaje centrado en el compromiso social. Un análisis general de este método y diversos enlaces a proyectos y grupos que trabajan con él en España puede encontrarse en la web de la Red Española de Aprendizaje-Servicio <https://www.aprendizajeservicio.net/>. En la Universidad de León coexisten diversos GID que trabajan con esta metodología. Centrándonos en la actividad desarrollada por el GID Biometac, la información detallada sobre nuestras primeras experiencias con este modelo pedagógico puede consultarse en un artículo en esta misma revista (Ambiociencias) en el año 2017, donde la Dra. Blanca Razquin, fundadora del grupo, contextualiza el ApS y expone los rasgos básicos de este método educativo (Razquin, 2017).

A lo largo de estos años, Biometac ha propuesto y desarrollado diferentes proyectos de innovación docente aplicando las tres fases que caracterizan a estos proyectos: 1) Diagnóstico y planificación; 2) Ejecución y 3) Cierre. A estas, habría

que añadir una fase previa de enorme importancia, consistente en la definición de dos aspectos vinculados entre sí y que caracterizan cada proyecto: los objetivos concretos que se pretenden conseguir y el tipo de público al que van dirigidos. Son precisamente estos dos aspectos, los objetivos y el público, lo que más ha ido cambiando en los diferentes proyectos que Biometac ha llevado a cabo en sus, hasta la fecha, diez años de existencia.



Figura 2. Esquema de la aplicación del método aprendizaje-servicio en el proyecto *La Ciencia a tu alcance* (2016-2019).

Evolución de los proyectos del grupo

En la **Tabla 1** se muestran los diferentes proyectos desarrollados por Biometac. Durante los primeros años, en cada curso académico se llevaba a cabo un proyecto, pero la pandemia Covid-19 (que se expande en España a partir de marzo de 2020) supuso un parón obligatorio en la actividad docente presencial. Dicho cese se tradujo, tras los momentos álgidos de la pandemia, en una ralentización de las dinámicas de trabajo y en la continuación del mismo proyecto durante tres cursos consecutivos. A partir del curso 2021-2022 los proyectos evolucionaron y se hicieron cada vez más complejos, por lo que pasaron a tener una duración de dos cursos académicos.

El elemento unificador de todos estos proyectos, el ApS, implica que jóvenes estudiantes de Biología, Ciencias Ambientales y Biotecnología se organicen, junto con algunos de sus profesores, para transmitir conocimientos científicos a diversos públicos previamente seleccionados. Esta transmisión se realiza mediante actividades muy diversas: charlas, talleres, diseño de materiales, tanto manuales como digitales, y también mediante acciones más informales como la

realización de rutas de campo o diversos encuentros con población de entornos rurales en sus ayuntamientos.

La **Tabla 1** permite también observar el público objetivo al que han sido dirigidos los diferentes proyectos durante este periodo, que encaja en dos grupos básicos: 1) profesorado y estudiantes de centros de enseñanza educativa, y 2) población local, usualmente en varios ayuntamientos pequeños de la provincia de León. El primero de estos grupos ha sido el receptor mayoritario de nuestros proyectos (cinco de ocho) pero tanto el proyecto inicial como los dos últimos han tenido como público a habitantes de núcleos rurales que son usualmente adultos, en su mayoría de la tercera edad.

En cuanto al número de estudiantes, y si exceptuamos el curso 2017-18, ha ido en aumento progresivo con el tiempo. Este hecho se debe, en parte, a la mejor difusión del GID entre el alumnado de la FCCBA, pero también influye el grado de satisfacción de las personas que participan, una satisfacción que trasladan a sus compañeros y que se refleja en las encuestas realizadas al final de cada actividad.

Tabla 1. Proyectos realizados por el GID Biometac, público al que van dirigidos y número de estudiantes de Grado participantes.

Curso	Título	Dirigido a	Nº estudiantes /actividades
2014-15	Los retos de la ciencia contados por futuros científicos	Ayuntamientos pequeños de la provincia de León	20 estudiantes 10 charlas
2015-16	Viaje por la ciencia contado por futuros científicos	Alumnado de 1º Bachillerato	24 estudiantes 12 talleres
2016-17	La ciencia a tu alcance: prácticas para la enseñanza de Ciencias elaboradas por futuros científicos	Alumnado de educación secundaria	26 estudiantes Elaboración de materiales docentes
2017-18	La Ciencia a tu alcance: dinamizando la difusión de la enseñanza de Ciencias a través de recursos digitales	Alumnado y profesores de educación secundaria	17 estudiantes Edición de vídeos, Web y redes sociales
2018-19	Desarrollo de competencias profesionales "6C" en los estudiantes de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales mediante la divulgación de la enseñanza de las ciencias a la sociedad	Alumnado de educación secundaria de León capital y alrededores	27 estudiantes Talleres en los centros
2019-20 y 2020-21		Alumnado de CEPA y educación secundaria de la provincia de León	38 estudiantes Talleres en los centros
2021-22 y 2022-23	Sostenibilidad ambiental y salud en el medio rural de León: Oportunidades para el desarrollo del Aprendizaje-Servicio en el marco de la Agenda 2030	Habitantes del mundo rural	38 estudiantes Diversas actividades en 3 localidades
2023-24	Caravana Biometac: talleres itinerantes para llevar la Biología al mundo rural	Habitantes del mundo rural	47 estudiantes Diversas actividades en 3 localidades

El primer proyecto que se consigna en la tabla, *Los retos de la ciencia contados por futuros científicos*, se centró en la preparación y realización de charlas divulgativas a públicos generales sobre temas científicos de actualidad que se

ofertaron a diez ayuntamientos pequeños de la provincia de León (Calvo-Galván *et al.*, 2017). La experiencia, que aportó beneficios tanto para los estudiantes y los docentes implicados como para la propia Universidad y las comunidades del entorno, fue merecedora del Accésit del Premio a la Innovación en la Enseñanza 2015 otorgado por el Consejo Social de la ULE.

Los cinco proyectos siguientes consistieron principalmente en preparar material, tanto escrito como en formato audiovisual, sobre diferentes prácticas de laboratorio que se realizan habitualmente a lo largo de los estudios de ciencias biológicas, ambientales y biotecnología. Estos materiales estuvieron estrechamente vinculados a la impartición, por parte de nuestro alumnado, de prácticas de laboratorio en varios centros educativos de enseñanza secundaria. Varios de estos talleres fueron elaborados en vídeos y pueden ser visualizados a través de la página web del grupo (ver apartado Biometac digital). Además, han dado lugar a diversas comunicaciones en congresos, así como publicaciones (Marqués y Razquin, 2019; Marques *et al.*, 2020), entre las que destaca un libro recientemente editado por el Servicio de publicaciones de la ULE (Rúa Aller *et al.*, 2024) (**Figura 3**).

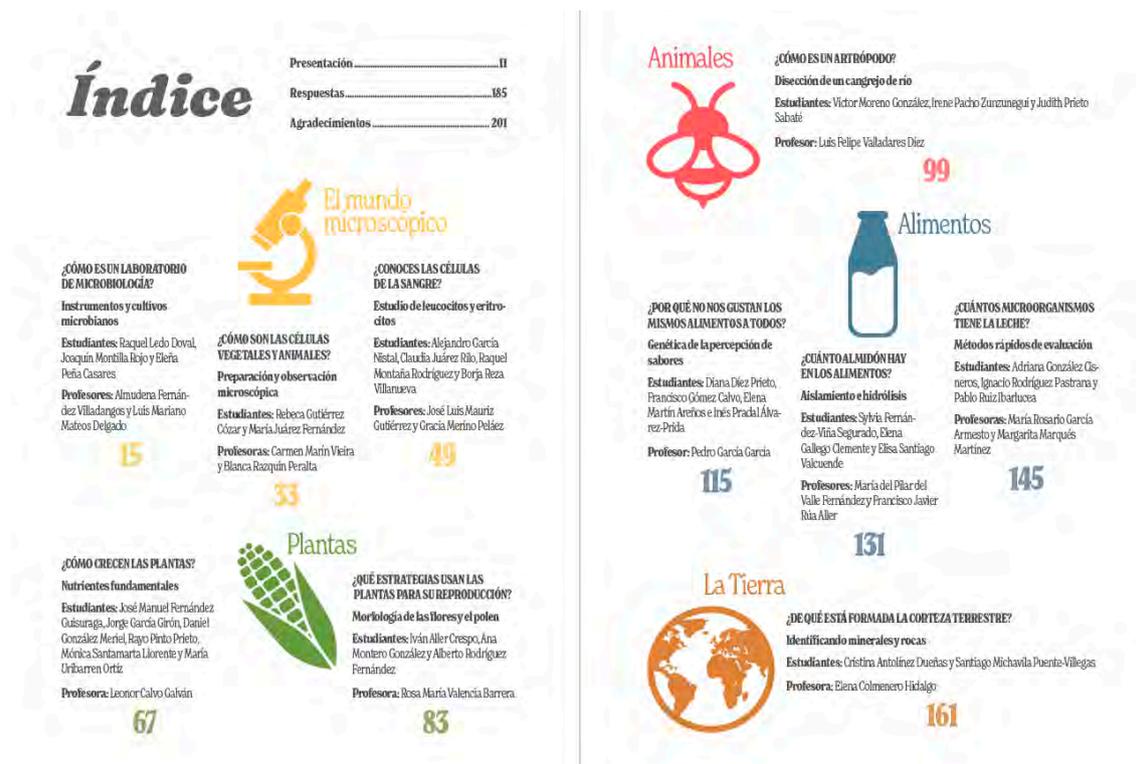


Figura 3. Portada e índice del libro que incluye los guiones de las prácticas desarrolladas en varios proyectos de Biometac destinados a estudiantes y docentes de enseñanza secundaria.

Desarrollo de competencias profesionales "6C" en estudiantes de Biología, Ciencias Ambientales y Biotecnología mediante la divulgación de la enseñanza de las ciencias a la sociedad

Marqués M.M*, Calvo Galván, Colmenero Hidalgo, E., García Armesto, M.R., García García, P., Fernández Martínez, E., Fernández Villadangos, A., López Campano, L., Marín, M.C., Mateos Delgado, L.M., Mauriz Gutiérrez, J.L., Merino Peláez, G., Rúa Aller, F.J., Valencia Barrera, R.M., Valladares Díez, L.F., Valle Fernández M.P. & Raquín Peralta B.

Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales. Universidad de León (ULE), Campus de Vegazana s/n, León (España)

El "aprendizaje-servicio" (ApS) es una propuesta educativa con un gran potencial pedagógico, puesto que contextualiza los objetivos de aprendizaje en un proyecto dirigido a satisfacer una necesidad real del entorno, lo que favorece el crecimiento personal de los estudiantes y estimula su compromiso cívico más allá del aula. Desde el año 2014, un grupo de 17 profesores de la ULE, de diferentes áreas de conocimiento, tiene como objetivo afianzar la aplicación de la metodología ApS en las enseñanzas de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, como forma de complementar la formación científica de nuestros estudiantes y contribuir a que adquieran las competencias básicas en la educación del siglo XXI, conocidas como competencias "6C": pensamiento Crítico, Creatividad, Colaboración, Comunicación, Carácter y Ciudadanía.

Objetivos:

Curso 2015-16	Organización de un programa de doce sesiones prácticas dirigidas a estudiantes de Bachillerato. Participantes: 24 estudiantes de Grado; 14 IES de León capital y provincia
Curso 2016-17 2017-18	Elaboración de un manual de prácticas sencillas y vídeos didácticos a partir de las prácticas del curso anterior. Participantes: 26 estudiantes de Grado
Curso 2018-19	(1) Implementación de las prácticas de laboratorio en IES, donde los estudiantes de Grado actúan como profesores; y (2) Divulgación de la Ciencia a través de las redes sociales. Participantes: 27 estudiantes de Grado; 13 IES de León capital y alrededores

La Ciencia a tu alcance

Pensamiento Crítico
Los estudiantes, acompañados por sus tutores, acudieron a los IES para presentarse a los profesores de Biología y realizar un análisis crítico de las instalaciones y medios disponibles para la realización de la práctica.

Creatividad
La adaptación de la práctica a las nuevas condiciones estimuló su capacidad de reflexión, de gestión de los recursos disponibles y su creatividad para la búsqueda de alternativas.

Comunicación
En todo el proceso, se fomentó el desarrollo de una capacidad de comunicación efectiva en diferentes contextos, así como la capacidad para transmitir información compleja a un público no especializado.

Colaboración
Durante la preparación de la práctica, los estudiantes adquirieron una visión integrada del tema, lo que les permitió aplicar sus conocimientos de forma significativa. La interacción y el trabajo cooperativo con sus compañeros y con el profesorado mejoró su habilidad para las relaciones interpersonales.

Carácter
La impartición de la práctica no sólo permitió el perfeccionamiento de las destrezas de laboratorio adquiridas durante el Grado, sino que favoreció el desarrollo de competencias personales, incluyendo aspectos como la autonomía, la autoestima, la iniciativa, etc.

Ciudadanía
La dimensión de servicio a la comunidad es clave para el éxito de estos proyectos que no sólo promueven el compromiso social de los estudiantes, sino que son una excelente herramienta de presentación de la Universidad en su entorno social.

Principales resultados de aprendizaje

- Contribución al desarrollo de las competencias "6C", incluidas en las competencias básicas definidas para los Grados en Biología, Biotecnología y Ciencias Ambientales de la ULE.
- Fomentación del aprendizaje activo de los estudiantes al situarlos en el papel de profesores.
- Fomento del interés de los estudiantes por la divulgación científica.

TEEM'19 **BiometaC** <https://biometac.unileon.es/>
@biometac   

Biología Celular
Microscopía
Física
Ecología
Fisiología Animal
Genética
Geología
Microbiología
Producción Animal Nutrición y Bromatología
Zoología

Figura 4. Póster presentado por Biometac en el congreso TEEM'19 y que resume el proyecto desarrollado por el grupo en el curso 2018-19 (Marqués Martínez *et al.*, 2019).

En el transcurso de estos proyectos, uno de los objetivos del grupo fue afianzar la adquisición de una serie de competencias básicas en la educación del siglo XXI, conocidas como *competencias "6C"* (revisado por Maggio, 2018). De este modo, los estudiantes mejoraron las competencias interpersonales para una *Comunicación* efectiva dentro de los equipos de trabajo y con los IES donde, guiados por sus profesores, pudieron efectuar una valoración *Crítica* de los recursos disponibles para la realización de las prácticas de laboratorio y reflexionar sobre posibles alternativas.

Posteriormente, los estudiantes aplicaron sus conocimientos y su *Creatividad* para la preparación y la impartición de las prácticas, desarrollando competencias personales (*Carácter*), como la autonomía, la autoestima, etc., siendo este último uno de los aspectos mejor valorados en las encuestas de satisfacción. Asimismo, se trabajaron la habilidad para *Colaborar* con el grupo e interactuar de forma *Cívica*, tanto de manera presencial como a través de las redes sociales (**Figura 4**).

Biometac y el desarrollo del aprendizaje-servicio en el marco de la Agenda 2030

A partir del curso 2021-22 se inició un giro en la orientación de algunos aspectos de los proyectos del grupo, aunque manteniendo el núcleo central, es decir, el ApS con estudiantes de la FCCBA llevando sus conocimientos científicos fuera de la universidad. El título del proyecto *Sostenibilidad ambiental y salud en el medio rural de León: Oportunidades para el desarrollo del Aprendizaje-Servicio en el marco de la Agenda 2030* apunta ya algunos cambios.

Para empezar, las actividades se dirigieron al medio rural de la provincia de León. Según la Comisión Europea (<http://enrd.ec.europa.eu/>) el medio rural es aquel en el cual la densidad de población es inferior a 150 habitantes/km². En la provincia de León, la densidad suele ser mucho menor y, en el caso de los municipios seleccionados en este proyecto, es inferior a 25 habitantes/km². Aunque las actividades agropecuarias y extractivas han sido las que, históricamente, han sustentado estas poblaciones, en la actualidad muchas de ellas pertenecen a la llamada “España vaciada” cuyos escasos habitantes suelen ser personas ya retiradas que ejercieron labores agrícolas o ganaderas y que pasan algunas temporadas en las casas familiares del pueblo. En menor medida, hay personas que siguen laboralmente activas o que habitan en el pueblo durante todo el año. Este tipo de público es muy diferente de los estudiantes y docentes de educación secundaria a quienes se dirigían proyectos previos. Una vez determinado este aspecto del proyecto, se seleccionaron tres municipios: Cistierna, Villablino y Truchas.

En segundo lugar, este proyecto se centró en reconocer algunas de las carencias o problemáticas relacionadas con dos temáticas concretas: la salud y la sostenibilidad ambiental en los tres municipios seleccionados. Estas dos materias entroncan directamente con la Agenda 2030, de ahí que las actividades se desarrollarán en torno a varios objetivos concretos de esta agenda, en concreto los ODS 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13 y 15 (**Figura 5**).

Sin embargo, posiblemente el cambio más significativo fuese el incremento en la implicación, relaciones y trabajo realizado por los tres grupos (estudiantes, docentes, público general) que integraron estos proyectos. Hasta este curso, las actividades realizadas consistían en una cadena clara de acciones: selección de estudiantes, organización en diversos grupos de trabajo, enseñanza de temas concretos a estos alumnos por parte del profesorado de Biometac y aplicación de lo aprendido mediante la realización de talleres y elaboración de materiales. Frente a este esquema, el proyecto del curso 2021-22 funcionó como una expe-

riencia piloto y, en parte, fue construido a medida que se detectaron necesidades y capacidades de acción en las diferentes poblaciones.

Por este motivo, el proyecto se construyó en dos fases consecutivas. La fase 1, o de diagnóstico, desarrollada durante el curso 2021-22, consistió en la toma de contacto con las administraciones de las localidades seleccionadas y en la realización de una primera reunión del alumnado de Biometac con agentes sociales de dichas comunidades (asociaciones, centros de salud y de educación, residencias de mayores, pequeños empresarios, etc.). Esta primera fase permitió, utilizando un protocolo estandarizado, conocer y seleccionar los problemas o carencias de cada municipio y contextualizarlos en relación con los ODS.



Figura 5. Objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030. Fuente: Naciones Unidas (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>).

La fase 2, o de acción, fue realizada por el mismo grupo de alumnos durante el curso 2022-23. Consistió en el diseño y puesta en marcha de diversas actividades y estrategias que permitieran un acercamiento a algunas de las problemáticas detectadas. Esta fase finalizó con la realización de actividades presenciales (charlas, talleres, análisis de aguas, rutas de naturaleza, etc.) y con la elaboración de materiales, digitales y analógicos, que recogen algunos de los resultados principales.

Más concretamente, el grupo de Cistierna comenzó recogiendo información sobre las problemáticas del municipio a través de la web del mismo y también en una reunión realizada en el ayuntamiento con diversos agentes comunitarios. Durante ese día, el grupo de la Universidad de León fue invitado a visitar

el Museo del Ferroviario, situado en esta localidad. De este encuentro surgieron ideas para llevar a cabo diversas actividades entre las que destacan:

- Elaboración de una presentación y exposición de la misma sobre las principales características y problemáticas detectadas en el municipio.
- Realización de una ruta de naturaleza balizada, localizada en el entorno de Santa Olaja de la Varga, que fue guiada por Alberto Cantoral, egresado de la Facultad que actualmente trabaja como agente medioambiental en la zona.
- Recopilación de información sobre gea, flora, funga y fauna en la ruta anterior y elaboración de un tríptico sobre la misma (**Figura 6**).

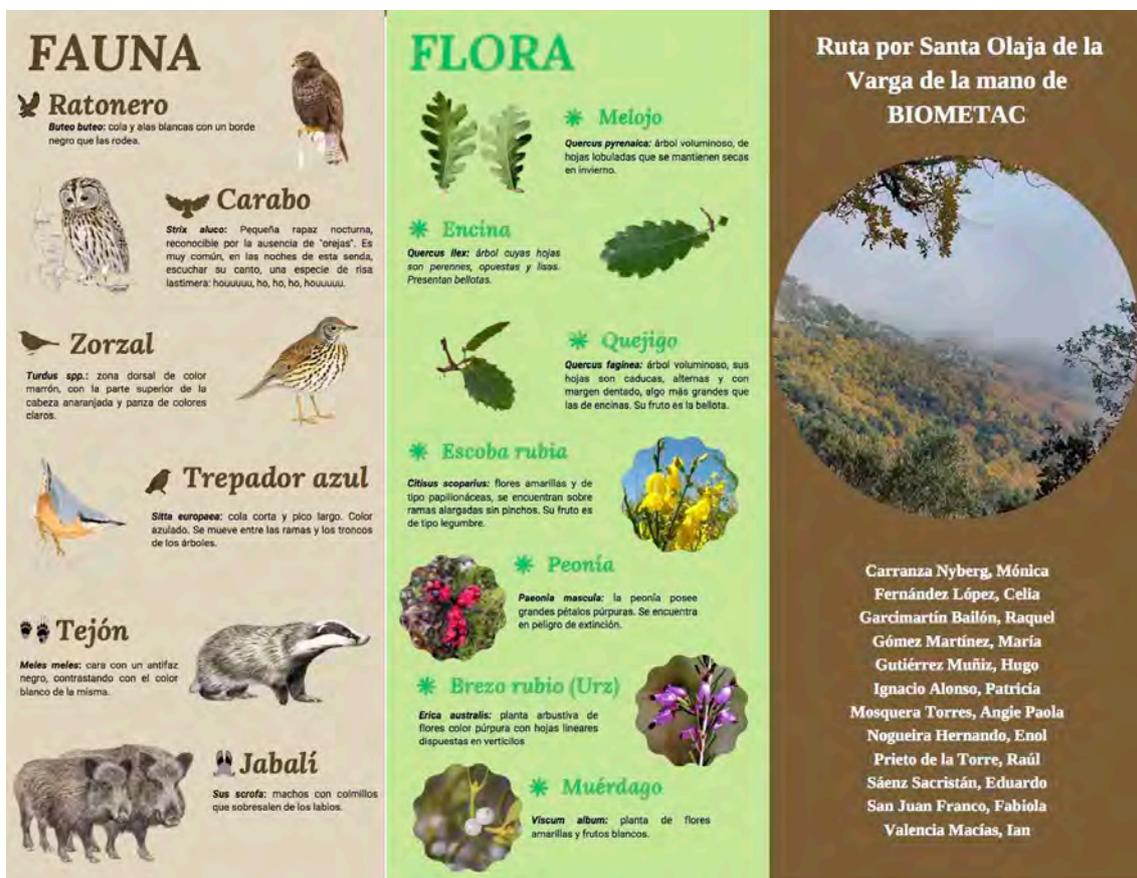


Figura 6. Imagen parcial del tríptico realizado por el grupo del municipio de Cistierna en relación con una ruta naturalista por el entorno de Santa Olaja de la Varga.

- Visita al complejo ganadero del Grupo Miguel Vergara en la pedanía de Vidanes, certificado en bienestar animal, y que realiza prácticas ganaderas respetuosas para el medio ambiente.

- Toma de muestras y análisis microbiológicos de agua procedentes de 8 fuentes situadas en diversos pueblos del municipio. Los resultados de estos análisis fueron enviados a las respectivas juntas vecinales.
- Realización de talleres en el IES Vadinia de Cistierna, en colaboración con Jara Juan, profesora de Biología y Geología en el centro y egresada de la FCCBA.
- Realización de una actividad tipo “feria de la ciencia” en la localidad de Modino.

El grupo de Villablino realizó acciones similares a las del grupo de Cistierna, aunque en una localidad muy diferente por el número de personas que la habitan y su alto nivel de implicación. Entre las actividades realizadas destacan las siguientes.

- Elaboración de una presentación y exposición de la misma sobre las principales características y problemáticas detectadas en el municipio y muy especialmente sobre el estado de la ribera del río Sil a su paso por Villablino.
- Visita al Aula Geológica de Robles de Laciana y realización de una ruta de naturaleza hasta la cascada de Lumajo. Ambas actividades fueron guiadas por José Gatón, impulsor y uno de los gestores del centro visitado.
- Recopilación de información sobre gea, flora, funga y fauna en la ruta anterior y elaboración de un tríptico sobre la misma (**Figura 7**).



Figura 7. Imagen parcial del tríptico realizado por el grupo del municipio de Villablino en relación con una ruta naturalista por el entorno del río Almozarra.

- Toma de muestras y análisis microbiológicos de agua procedentes de 7 fuentes situadas en diversos pueblos del municipio.
- Realización de charlas y talleres de naturaleza en los dos IES de la localidad: Obispo Argüelles y Valle de Laciana.
- Realización de una actividad tipo “feria de la ciencia” en la localidad de Villablino.



Figura 8. Dos momentos de las comunicaciones presentadas por el grupo Biometac en el congreso *Educar para convivir con el fuego*.

Por su parte, el proyecto en el municipio de Truchas fue algo diferente. Se trata de un ayuntamiento con población muy escasa, dispersa en localidades pequeñas y con un sistema natural fuertemente afectado por incendios. De hecho, ya en la primera reunión con personal del ayuntamiento, surgió la problemática de los incendios forestales como una de las preocupaciones principales de los vecinos. Por este motivo, el trabajo se centró en abordar este tema, primero con los alumnos mediante la elaboración de un informe de diagnóstico de necesidades, y, posteriormente, con los habitantes del municipio a través de distintas actividades. En la primera fase, los alumnos realizaron un informe sobre la metodología para caracterizar el mapa de recurrencia de incendios en el municipio utilizando sistemas de información geográfica (SIG). Esta cartografía permitió evaluar el efecto de la litología o tipo de roca

en la recurrencia, así como la importancia de esta sobre la diversidad de fauna (aves, mamíferos, reptiles, anfibios e invertebrados) y flora vascular amenazada. Como es habitual, esta metodología se transmitió al alumnado siguiendo un esquema de ApS y con la finalidad de que la puedan aplicar a otra fauna y flora amenazada, extrayendo conclusiones de forma autónoma para cada situación. En una segunda fase, los alumnos realizaron la presentación de resultados a la población asistente a unas jornadas, desarrolladas en la localidad de Valdavidó, en las que se resaltó la importancia ambiental de los efectos de los incendios forestales. Además, los estudiantes impartieron dos charlas sobre su experiencia de ApS en unas jornadas sobre esta metodología desarrolladas *on-line* en el año 2022 y en el Congreso *Educación para Convivir con el Fuego* que se celebró en Santiago de Compostela en 2023 (**Figura 8**).

Presente y futuro cercano de los proyectos de Biometac

El enorme trabajo desarrollado a lo largo de los cursos 2021-22 y 2022-23 permitió extraer varias enseñanzas que fueron tenidas en cuenta a la hora de diseñar el siguiente proyecto.

En primer lugar, se comprobó que, entre las actividades que mejor funcionaron, se encuentran los talleres científicos realizados en locales municipales y dirigidos a habitantes permanentes de estas poblaciones. Su buena acogida se demostró en el alto grado de satisfacción por estos talleres, manifestado por los tres grupos implicados (estudiantes, docentes y asistentes). Por este motivo, el proyecto actual, *Caravana Biometac: talleres itinerantes para llevar la Biología al mundo rural*, se centra en la realización de actividades de este tipo, aunque con una selección más cuidada de los municipios en donde se va a trabajar y una elaboración más protocolizada de los talleres (**Tabla 2**).

Tabla 2. Talleres realizados en el marco del proyecto Caravana Biometac.

Título del taller	Áreas implicadas
Super-bacterias. La pandemia silenciosa	Microbiología
De la Tierra a la mesa	Anatomía y Anatomía Patológica Comparadas Bioquímica y Biología Molecular Nutrición y Bromatología Producción animal
Adentrándonos en la fisiología animal: si no lo ves, coloréalo	Fisiología animal
Sonidos de la fauna en un mundo cambiante.	Zoología
Descubriendo la relación entre la geología, la botánica y los usos tradicionales	Botánica, Paleontología
Entrelazando ciencias	Genética, Antropología
El fuego en los cuatro sentidos: ver, oír, tocar y oler	Ecología
Grupo de redes sociales	



Figura 9. Imágenes de los talleres realizados en las localidades de Valencia de Don Juan (A, B y C), Reyero (D y E) y Carrizo (F).

En consecuencia, el proyecto del curso 2024-25 se organiza en torno a la realización de tres pequeñas ferias de ciencia en las localidades de Reyero (un municipio ganadero, de unos 100 habitantes, de la montaña central leonesa), Valencia de Don Juan (un pueblo de unos 5.000 habitantes situado en el curso medio del río Esla y cuya economía se basa en algunas industrias y en el sector servicios) y Carrizo de la Ribera (municipio de unos 2.000 habitantes conocido por el cultivo de lúpulo y su industria cervecera). En cada una de estas ferias se desarrollaron los siete talleres dedicados a diferentes aspectos científicos (**Tabla 2, Figura 9**). Tanto el

diseño de los talleres como la elaboración de los materiales y el trabajo que requiere su puesta en marcha han sido llevados a cabo por sendos grupos de profesores y alumnos. Paralelamente, un grupo de estudiantes, ayudados por el profesor Rayo Pinto, ha generado diversos materiales para presentar los talleres y difundirlos a redes sociales. Además, todas estas actividades conllevan la realización de encuestas a los diferentes grupos (docentes, estudiantes y asistentes) que participan en ella. El análisis de las encuestas realizadas al público asistente durante estos talleres y las respuestas a encuestas específicas para estudiantes y docentes será clave para definir la trayectoria a seguir en los próximos años.

Biometac digital: web y redes sociales

En Biometac, el desarrollo de material digital y la presencia en redes sociales ha sido siempre un pilar central de los proyectos realizados a partir del curso 2017-18. Por ello, se comenzó desarrollando un sitio web (<https://biometac.unileon.es/>) donde se reúne y actualiza una información muy diversa sobre el grupo. En esta web se puede consultar qué docentes forman y han formado parte de Biometac, qué estudiantes han participado en cada proyecto, los proyectos y actividades realizadas, así como congresos a los que se ha asistido, publicaciones y diverso material de apoyo generado, además de otra información.

Entre este material, que puede consultarse y descargarse en <https://biometac.unileon.es/category/practicas/>, destacan varios vídeos elaborados a raíz de diversas prácticas para educación secundaria y que son presentados por los estudiantes que realizaron el proyecto del curso 2017-18. Estos vídeos se encuentran también en el canal de YouTube del grupo (<https://www.youtube.com/@grupobiometac5826>), que da acceso a algunos datos de uso como visualizaciones, comentarios y “me gusta” en los 5 años que estos vídeos están en funcionamiento. En total, el canal de YouTube tiene 238 seguidores y se contabilizan 77.485 visualizaciones entre sus ocho vídeos. Aunque habría que hacer un análisis en profundidad, parece obvio que la enorme diferencia de visualizaciones entre los más visitados (67.000, 5.700 y 2.100 visualizaciones) y los menos visualizados (128, 235 visitas) no está tanto en la calidad del vídeo sino en la temática tratada y en la inclusión de esta dentro de currículos de educación secundaria en países de habla hispana. De hecho, como indican algunos comentarios del vídeo más visto (*Estudio de células animales y vegetales con el microscopio óptico*), hay profesores que encargan la visualización del vídeo a su alumnado, lo que redundará en un aumento exponencial del número de visitas.

Biometac tiene también presencia en varias redes sociales y, en los dos últimos años, un grupo de estudiantes se dedica casi en exclusiva a trabajar contenidos para ellas. Actualmente se utilizan las redes sociales Instagram, X (antiguamente llamada Twitter) y Facebook, teniendo una actividad y presencia muy diferente en cada una de ellas. A medida que los estudiantes participantes de los proyectos de Biometac han comenzado a gestionar las redes del grupo para realizar la difusión de los proyectos, Instagram (@biometac) se ha convertido en la

red social prioritaria. Gran parte de nuestro público en esta red social se encuentra entre 18 y 24 años, reflejando que se trata, en gran medida, de estudiantes universitarios.

La publicación de contenidos en redes sociales no se ha limitado a fotografías o vídeos cortos de las actividades. Por ejemplo, en el proyecto *Caravana Biometac*, se ha generado tanto un logo del proyecto como imágenes propias de cada taller. La publicidad de estos talleres ha incluido vídeos muy cortos realizados por los propios estudiantes o por algunos profesores. Algunos de estos vídeos siguen la tendencia de otras plataformas, como TikTok, para animar al público a asistir a los talleres, mientras que otros grupos de alumnos se decantan por subir a Instagram las actividades en forma de “*stories*”.

Conclusiones

Tras una década de recorrido, el Grupo de Innovación Docente Biometac ha llevado a cabo ocho proyectos que implican a más de treinta profesores y 238 estudiantes de Grado, la mayoría de los cuales pertenecen al tercer curso del Grado en Biología. Aunque la pandemia Covid-19 impuso un parón en la actividad y la necesidad de alargar algunos proyectos, este episodio también sirvió como un revulsivo para la actividad del grupo. En concreto, se pasó de realizar proyectos más sencillos destinados a profesorado y alumnado de enseñanza secundaria, a diseñar proyectos más complejos centrados en el mundo rural. Este cambio ha supuesto un aumento de la organización y del trabajo realizado, comenzado por el diseño de las actividades y terminando por la siempre compleja logística que supone desplazar a estudiantes y profesores con agendas difíciles de coordinar, así como llevar equipos de laboratorio a locales no siempre adecuados para ellos.

En contraposición, una de las actividades más satisfactorias de los proyectos realizados en estos últimos años han sido las salidas de campo compartidas por profesores, estudiantes y personas que trabajan el territorio y que, en varias ocasiones, eran egresados de la FCCBA. Por este motivo, el Proyecto *Caravana Biometac* incluyó una jornada de mañana en la que, aprovechando el viaje a Rezero, se realizaron de manera informal varias actividades relacionadas con la naturaleza y el conocimiento del medio natural y cultural en el cual se realizaron los talleres. Entre estas actividades puede citarse una ruta por una senda natural bajo bosques de hayas y robles, una visita a un centro de interpretación de un parque regional, una comida en un albergue municipal que busca dinamizar el turismo en la zona y un encuentro con varias personas que trabajan en la montaña central leonesa, donde se localiza el municipio de Rezero.

En resumen, a pesar de este incremento en el trabajo de los últimos proyectos, el cambio nos parece positivo ya que ha posibilitado un aprendizaje más allá de los contenidos, que obliga a conocer un territorio e intercambiar información con sus habitantes. Además, las actividades secundarias vinculadas a estos talleres favorecen la relación entre las diferentes personas que integran el grupo al trabajar en ambientes más distendidos y con temáticas fuera de los currículos

oficiales. En la opinión de los docentes que hemos intervenido en los dos últimos proyectos, el resultado principal de estos cambios es un aprendizaje más autónomo y significativo, que se enfoca a problemas reales afrontados por nuestra sociedad, muchos de los cuales constituirán los retos a los que tendrán que responder, con sus conocimientos y capacidades, nuestros futuros graduados.

Agradecimientos

Además de por los firmantes de este artículo, durante el curso 2023-24, Biometac está formado por los siguientes docentes: César Joao Benetti Rama, Esther Blanco Paniagua, Leonor Calvo Galván, Camino Fierro Castro, Antonio García Taberner, Luis Mariano Mateos Delgado, Susana Martínez Flórez, José Luis Mauriz Gutiérrez, Carolina Méndez Blanco, Gracia Merino Peláez, Zaida Ortega Diago, Rayo Pinto Prieto, Alberto Rodríguez Fernández, Laura Rodríguez García, Francisco Javier Rúa Aller y Vega Villar Suárez. Nuestro agradecimiento especial a todos los estudiantes que participaron en los proyectos citados, por su trabajo y por su buena disposición a aprender y enseñar.

Bibliografía

- Calvo Galván L., Centeno Martín M. L., Colmenero Hidalgo E., García García P., Fernández Villadangos A., López Campano L., Marqués Martínez M., Marín Vieira C., Mateos Delgado L. M., Máuriz Gutiérrez J. L., Rúa Aller F. J., Valencia Barrera R. M., Valladares Díez L. F., Valle Fernández M. P. y Razquin Peralta B. 2017. Incorporación de la metodología “Service-learning” en la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales de la Universidad de León. *Teaching and Learning Innovation Journal*, 1, 14–18; 10.18002/tele(in)2j.v1i0.5147
- Maggio, M. 2018. Habilidades del siglo XXI: cuando el futuro es hoy. XIII Foro Latinoamericano de Educación, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Fundación Santillana.
- Marqués M. M., Calvo Galván L., Colmenero Hidalgo E., Fernández Martínez E., Fernández Villadangos A., García Armesto M. R., García García P., López Campano L., Marín Vieira M. C., Mateos Delgado L. M., Mauriz Gutiérrez J. L., Merino Peláez G., Rúa Aller F. J., Valencia Barrera R. M., Valladares Díez L. F., Valle Fernández M. P. y Razquin Peralta B. 2020. Contribuyendo a una enseñanza de ciencias atractiva en Bachillerato mediante la implicación de estudiantes de Grado como profesores de prácticas de laboratorio. En: *El papel del Aprendizaje-Servicio en la construcción de una ciudadanía global*, pp. 143-149, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid.
- Marqués M. M., Calvo Galván L., Colmenero Hidalgo E., Fernández Martínez E., Fernández Villadangos A., García Armesto M. R., García García P., López Campano L., Marín Vieira M. C., Mateos Delgado L. M., Mauriz Gutiérrez J. L., Merino Peláez G., Rúa Aller F. J., Valencia Barrera R. M., Valladares Díez L. F., Valle Fernández M. P. y Razquin Peralta B. 2019. En: *Libro de actas de las XVII Jornadas de Redes de Investigación en Docencia Universitaria y III Workshop Internacional*

de Innovación en Enseñanza Superior y TIC- “Investigación e Innovación en la Enseñanza Superior. Nuevos contextos, nuevas ideas”, pp. 203-204, Instituto de Ciencias de la Educación de la Universidad de Alicante.

Marqués, M. M. y Razquin Peralta, B. 2019. La Ciencia a tu alcance: dinamizando la enseñanza de Ciencias a través de recursos digitales. En: “EDUcación con TECnología: un compromiso social”. Iniciativas y resultados de investigaciones y experiencias de innovación educativa, pp. 1167-1176, Universidad de Lleida y Asociación EDUTEc.

Razquin, B. 2017. El Aprendizaje-Servicio como respuesta a la responsabilidad social de la Universidad. *Ambociencias*, 15, 63-69.

Rúa Aller, F. J., Marqués Martínez, M. y Valencia Barrera, R. M. coords. 2024. La ciencia a tu alcance, León, Universidad de León.

DE TODO UN POCO

En este año 2024 la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales ha continuado organizando y participando en numerosos eventos de carácter formativo, científico y cultural.

Nuevamente figuramos, y ya van nueve años consecutivos, en el ranking que elabora el Diario El Mundo sobre las mejores universidades de España, para cursar, en esta ocasión, la titulación de Ciencias Ambientales.

Jornadas, congresos y conferencias

Terminamos el año 2023 con la celebración en nuestra Facultad, los días 17 y 18 de noviembre, del **IV Simposio de Botánica Española**, este año bajo el tema: “Colecciones Científicas: Patrimonio Cultural y Natural para la Investigación” y organizado por las profesoras Carmen Acedo y Estrella Alfaro-Saiz. Durante esos días se realizaron diversos talleres, mesas de discusión y conferencias. La conferencia de clausura titulada: “*The herbarium of the future*” fue impartida por el Dr. Charles C. Davis de la Universidad de Harvard (**Figs. 1a y b**).



Figura 1a. Cartel informativo IV Simposio de Botánica Española.



Figura 1b. Asistentes al IV Simposio de Botánica Española.

En el mes de febrero se conmemoró el **Día Internacional de la mujer y la niña en la Ciencia**. Desde la Unidad de Cultura Científica se coordinó un variado programa de actividades, charlas y talleres con el objetivo de visibilizar el trabajo de las investigadoras y promover iniciativas que favorezcan la igualdad de género en el campo científico y fomentar las vocaciones científicas y tecnológicas en niñas y adolescentes. Entre las diversas charlas y talleres realizados destacan: “Principales problemas asociados a los incendios forestales y la importancia de nuestro comportamiento en la reducción de los mismos” organizado por Leonor Calvo Galván y Rayo Pinto Prieto; “Ciencia por un tubo: despierta tu curiosidad científica con las investigadoras de la ULE”, organizado por Lorena López Ferreras y “Entre espinas y trampas: El legado de mujeres botánicas en cactus y plantas carnívoras” organizado por Raquel Alonso Redondo, Sara del Río González y Norma Yolanda Ochoa Ramos (**Fig. 2**).



Figura 2. Taller del Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia impartido en la FCCBA.

El 13 de febrero la **Asociación de Investigadores en Formación de la Universidad de León** (AIF-ULE), organizó la charla/coloquio: “Inicio en la carrera investigadora” con el objetivo de aclarar todas las posibles dudas de los futuros investigadores.

La Asociación de Biotecnólogos de León (ABLE), organizó una nueva edición del ciclo de conferencias de divulgación científica **ConCiencia**. Este proyecto, que tiene como objetivo la divulgación científica facilitando el acceso a todos

los públicos, se realizó los viernes 1 y 8 de marzo, y el 5 de abril en la Fundación Sierra Pambley. Las ponencias fueron las siguientes:

“¿Dónde está la sobreexplotación?, A ver a ver, que yo la vea” (Dr. Eduardo González Gómez de Agüero); “La fuerza y el lado oscuro de la comunicación científica en medios de comunicación” (Dr. Alfredo Corell Almuzara) y “Microbiota y cáncer, una amistad inexplicable” (Dr. Álvaro Mourenza Flórez).

También organizadas por ABLe, se realizaron, un año más, las Jornadas **Con Ciencia, Té**. Las charlas fueron impartidas, en el café Varsovia, los días 23 y 30 de octubre y el 6 de noviembre por estudiantes de los Grados de Biotecnología, Biología y Ciencias Ambientales de nuestra Facultad.

Los días 14 y 15 de marzo en Vila Real (Portugal) se celebraron las **VI Jornadas Ibéricas de Genética y Biotecnología** organizadas por estudiantes y profesores de la Universidad de León y con la colaboración de profesores del departamento de Genética y Biotecnología de la Universidad de Trás-os-Montes y Alto Duero en Portugal. Los principales objetivos de estas Jornadas son el intercambio de conocimientos científicos entre estudiantes, docentes e investigadores, así como la actualización de las diferentes áreas de la Genética y la Biotecnología. En esta ocasión se desplazaron más de 30 estudiantes del Grado en Biotecnología que participaron presentando comunicaciones y conferencias relacionadas con la temática de las Jornadas. La profesora María Muñoz Amatriain, del área de Genética, impartió la conferencia titulada: “*Exploiting cowpea genetics and genomic resources for a crop improvement*”.

Los días 19, 20 y 21 de marzo se celebraron las **V Jornadas de Puertas Abiertas** organizadas por los Vicerrectorados de Estudiantes y Empleo y de Relaciones Institucionales y con la Sociedad, consistentes en un programa de charlas y visitas guiadas, entre otras actividades, con el objetivo de dar a conocer al futuro estudiante universitario la oferta de Grados de la ULE, las instalaciones y las actividades complementarias a la formación académica.

Desde la Facultad también se organizaron, como en años anteriores, las **Jornadas de Orientación Profesional** los días 10 y 11 de abril. En las cuales participaron el ILDEFE, el Colegio Oficial de Biólogos de Castilla y León y la FGULEM impartiendo charlas sobre becas, ofertas de empleo y salidas profesionales.

También participaron como egresados de la Facultad, hablando de su trayectoria profesional en distintas empresas e institutos de investigación, Almudena Fernández Villadangos, Luis Getino Alonso, Carmela Cañedo-Padín y Patricia de la Madrid Salmerón.

El día 18 de abril se impartió en el Aula Magna de la Facultad la conferencia titulada: “Ecología y conservación del gato montés (*Felis silvestris*) en un paisaje humanizado” a cargo del Dr. Héctor Ruiz Villar.

Durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre se impartieron en el marco del **II Ciclo de Conferencias de Investigación y Divulgación Científica de la FCCBA** las siguientes charlas: “Incendios forestales y nuevas

tecnologías para el estudio de sus impactos ecológicos” (Dr. José Manuel Fernández Guisuraga); “Efecto de las variables ambientales en el comportamiento animal: anfibios, reptiles y mamíferos” (Dra. Zaida Ortega Diago); “Desarrollo de terapias multidiana frente a *Staphylococcus aureus* intracelular” (Dr. Álvaro Mourenza Flórez); “Los rasgos vegetales como herramienta para entender la ecología funcional” (Dr. Enrique García de la Riva); “*A cell wall journey: desde el metabolismo a sus aplicaciones*” (Dr. Asier Largo Gosens); “La infección como desencadenante de la enfermedad celiaca” (Dra. África Sanchiz Giraldo) e “Inmunidad de plantas inducida por glucanos derivados de pared celular” (Dr. Diego Rebaque Morán).

El objetivo de estas charlas es que los profesores de nueva incorporación den a conocer sus líneas de investigación y que podamos, no solo conocernos mejor, sino establecer futuras colaboraciones de investigación.

En la Facultad hemos celebrado también otras conferencias como la realizada el 17 de octubre por la Dra. Maddie Cusimano titulada: “*Learning to be fluent in crow. AI for understanding animal communication*” y el 22 de octubre la Dra. Violette Chiara, del Museo e Instituto Zoológico de Varsovia impartió la conferencia: “¡Siga a ese animal! Entendiendo el comportamiento a través de las trayectorias del desplazamiento”.

El 12 de noviembre se celebró en el Aula Magna de la Facultad la **Jornada de Investigación ‘Impulsamos el talento’**. En dicha Jornada Helena Álvarez Ferrero, egresada del Grado en Biotecnología, recibió el diploma y la concesión oficial de la nueva ayuda predoctoral 2024 de la Asociación Española contra el Cáncer y explicó en qué se va a centrar su investigación titulada: “Impacto de los estafilococos intracelulares en el desarrollo del cáncer de mama”, junto con su director de tesis, el profesor Michal Letek. En esta Jornada, presidida por la Rectora de la Universidad y el presidente de la Asociación Española contra el Cáncer (AECC) de León el Dr. Estandislo de Luis Calabuig, el profesor José Luis Mauriz, miembro del Comité Técnico de la AECC y director de IBIOMED, explicó cómo es el funcionamiento y los objetivos del Comité Técnico de la Asociación. El Dr. Mauriz, además, ha dirigido el proyecto de Tania Payo, beneficiaria de la Ayuda Predoctoral 2022, que comentó en qué consiste la investigación que está llevando con su tesis: “Efecto del silenciamiento estable de los factores inducibles por hipoxia en el tratamiento del carcinoma hepatocelular”.

Cursos y talleres

Varios profesores de la Facultad participaron, como en ediciones anteriores, en la organización, dirección e impartición de **Cursos 0 y Cursos de Verano**.

Los Dres. Roberto López González y Fernando José Pereira García dirigieron y participaron como ponentes en el curso: “Química para titulaciones de grado en Ciencias Experimentales”, que tuvo lugar del 2 al 23 de septiembre. Dirigido a los alumnos de nuevo ingreso con el objetivo de repasar, afianzar y

completar algunos conceptos fundamentales y básicos, ya estudiados en el Bachillerato y en la Formación Profesional, relacionados con la Química y su lenguaje, proporcionando bases metodológicas que faciliten el estudio de la Química de primer curso de Grado.

El Dr. Eduardo García Ortega dirigió e impartió del 2 al 13 de septiembre el Curso titulado: “Física para estudiantes de Ciencias”. El objetivo del curso es actualizar la formación preuniversitaria de Física de los estudiantes que van a acceder a la Universidad.

Del 10 al 12 de julio se celebró el **Curso de Verano**: “Gestión integral de incendios forestales: soluciones innovadoras basadas en la naturaleza y la tecnología” organizado por los profesores Leonor Calvo Galván y José Manuel Fernández Guisuraga en el que participaron diversos profesores de la Facultad, y del 15 al 18 del mismo mes el curso titulado: “Diagnóstico de la calidad de las aguas fluviales mediante índices diatomológicos” bajo la dirección del profesor Saúl Blanco Lanza.

Innovación docente, divulgación científica y otras actividades

El PDI de la Facultad ha continuado durante este curso organizando y participando en actividades de innovación docente y divulgación científica.

El 2 de febrero tuvo lugar en nuestra Facultad la Fase Autónoma de Castilla y León de la **XIX Olimpiada de Biología**. En ella participaron un total de 253 estudiantes de 2º de Bachillerato. Las Olimpiadas de Biología surgieron en un intento de promocionar y popularizar la materia de Biología y reflejar la importancia que tiene esta disciplina en la sociedad actual, promoviendo su progreso y divulgación.



Figura 3. Cartel informativo Expociencia Unileon 2024.

Del 20 al 22 de febrero se celebró en el Palacio de Exposiciones de León la **Expociencia Unileon 2024**. Organizada por la Unidad de Cultura Científica e Innovación de la Universidad de León con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) del Ministerio de Ciencia e Innovación y el Ayuntamiento de León, en ella participaron, organizando diversos talleres, numerosos profesores e investigadores de la Facultad (**Fig. 3**). Así mismo las asociaciones de Estudiantes de Biotecnología y de Biología participaron con un taller denominado: “¿Bio qué?” donde mediante concursos y experimentos se descubrían curiosidades de las diferentes áreas de la Biología.

El día 13 de mayo se celebró en el Café Rock Le Bon la novena edición del **Festival Pint of Science (Fig. 4)**. El evento tiene como objetivo ofrecer charlas interesantes, divertidas y cercanas sobre las últimas investigaciones científicas, en un formato accesible al público, siendo los bares el escenario elegido para ello. La profesora Esperanza Fernández Martínez ha participado en esta edición con la charla titulada: “¿Está en riesgo nuestro planeta?”.



Figura 4. Cartel informativo Pint of Science León 2024.

Con motivo de la celebración del octavo **Día Internacional de la Fascinación por las Plantas**, el 18 de mayo, la Facultad preparó un extenso programa de actividades. Desde el 15 hasta el 22 de mayo se desarrollaron talleres, jornadas prácticas, visitas, el Biomaratón de Flora Española, y otras propuestas orientadas a estudiantes universitarios, estudiantes de educación primaria y secundaria y público en general.

Estas actividades han sido organizadas y coordinadas por profesores de las Áreas de Botánica, Fisiología Vegetal y Ecología, con la participación de estudiantes de los Grados en Biología, Biotecnología y Ciencias Ambientales. El programa se inició con unas **Jornadas de Biotecnología Vegetal**, sobre temas de actualidad relacionados con la Biotecnología Vegetal y sus múltiples aplicaciones, tanto en la mejora de los cultivos como en la producción de compuestos de interés.

Entre los talleres realizados destacan: el Taller de experimentos fascinantes con plantas; el Taller del fuego 1: “Severidad a la vista: las estrategias de resistencia y resiliencia de dos especies propensas al fuego *Pinus pinaster* y *Erica australis*”; el Taller del fuego 2: “Raíces pivotantes de las plantas como elementos clave en la resistencia a las condiciones séricas después del incendio” y el Taller de adaptaciones de las plantas.

El viernes día 5 de julio se desarrolló en el Aula Magna San Isidoro del Rectorado de la ULE el acto de **Graduación de las promociones 2023-24 de la FCCBA (Fig. 5)**. La conferencia: “Los microorganismos: cómo modelan nuestro planeta, nuestra historia y nuestra vida cotidiana” fue pronunciada por el Dr. Juan José Rubio Coque, Catedrático de Microbiología de la Universidad de León.



Figura 5. Acto Académico de la Graduación de las Promociones 2023-24 de la FCCBA.

El viernes 27 de septiembre tuvo lugar una nueva edición de la **Noche europea de I@s investigador@s**, organizada por la Unidad de Cultura Científica de la ULE. Esta jornada, que se replica simultáneamente en 400 ciudades, busca acercar la ciencia a la sociedad y fomentar el interés por la investigación a través de una amplia programación de actividades, entre las que destacan las microcharlas, conferencias y talleres divulgativos.

La Facultad ha organizado este año el **XVII Curso de Actualidad Científica y Cultural de la ULE**. Desde el 9 de octubre al 27 de noviembre se impartieron, en el Aula Magna de la Facultad, doce conferencias de divulgación científica sobre temas muy diversos. Con el objetivo de que los alumnos adquieran conocimientos de temas de actualidad científica y cultural, fundamentalmente relacionados con la Inteligencia Artificial y la investigación, enfocados desde diversos ámbitos (Biología, Derecho, Veterinaria, Filosofía, etc.).

El curso se inauguró por el Dr. César de la Fuente Núñez, *Presidential Assistant Professor* en el Departamento de Bioingeniería de la Universidad de Pennsylvania (Estados Unidos) con la conferencia titulada: “La inteligencia artificial en el descubrimiento de antibióticos”.

El Dr. César de la Fuente fue nombrado *Alumni Destacado (Alumni de Honor)* de la Comunidad de egresados de la Universidad de León el 18 de marzo de 2024 a propuesta de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales. El 9 de octubre asistió al descubrimiento de una placa conmemorativa en su honor en el laboratorio Ambiental de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, acto al que acudió también la rectora de la Universidad de León, Nuria González Álvarez (**Fig. 6**).



Figura 6. Descubrimiento de la placa conmemorativa en honor del Dr. César de la Fuente Núñez.

Otros destacados conferenciantes fueron: el Director de Viticultura de Viña Costeira (Ourense) Carlos Alberte; el Coordinador del Programa de Bioinformática y Genómica en el Centro de Regulación Genómica (CRG, Barcelona) Roderic Guigo i Serra; el Director del Departamento de Ciencias de la Vida en el Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (BSC-CNS) Alfonso Valencia Herrera y el Director del Grupo de Ética Aplicada en el Instituto de Filosofía del Consejo Superior de Investigaciones Científica Francisco José Ausín, entre otros.



Figura 7. Cartel Campaña de Reciclaje.

La **Delegación de Estudiantes de la Facultad** realizó diversas actividades como el 17 de mayo la Celebración del Día Internacional del Reciclaje (**Fig. 7**); la realización el 23 de noviembre del seminario: “Importancia en la conservación de especies en su entorno natural y en parque de conservación” que consistió en una visita al parque de Cabárceno (Cantabria) y la organización de tres ponencias, impartidas por Santiago Borragán (jefe de veterinarios del Parque de Cabárceno), Jaime Galán (NJOVU e ICOFAUNA) y Jorge Barciela (Wild Insight) (**Fig. 8**).



Figura 8. Participantes en el Seminario y visita al Parque de Cabárceno.

Por otra parte, la Delegación de Estudiantes de la Facultad, junto con la ABL de León y la Asociación Cultural de Estudiantes de Biología (BIOMA), han participado en acciones solidarias como la recogida de material, que se realizó en nuestra Facultad del 4 al 7 de noviembre, para ayudar a las personas afectadas por la Dana. Todo ese material fue entregado en el ayuntamiento de Catarroja (Valencia) (**Figs. 9a y b**).



Figura 9a. Cartel informativo de recogida de donaciones para los afectados por la DANA.



Figura 9b. Alumnos de la Facultad con parte del material recogido para Valencia.

BIOMA también ha organizado diversas actividades durante este año entre las que destacan: la visita que realizaron el 17 de febrero al Real Jardín Botánico de Madrid y al Museo Nacional de Ciencias Naturales; el visionado y posterior debate de la película “Gorilas en la nieve”. Los días 16 y 18 de mayo se celebró el Biomaratón de Flora Española, en colaboración el área de Botánica y el grupo de investigación TaCoBi, en el que se realizaron tres salidas de campo en distintas localizaciones donde se registraron e identificaron especies vegetales; el 1 de noviembre tuvo lugar una ruta micológica.

Entre las actividades de formación y divulgación científica que organiza **ABLE**, destaca la realización del Curso de Expresión Oral y Comunicación Científica el 11 de marzo por Dña. Patricia de la Madrid Salmerón, expresidenta de **ABLE** y actual *Business Development and Marketing Manager* en la empresa *53Biologics*, así como la visita al Instituto de Biomedicina de León (IBIOMED) realizada el 18 de marzo.

Este año tuvo lugar la **XIII Edición de Biotechnofarm** organizado por **ABLE**, junto con la Federación Española de Biotecnólogos. En Biotechnofarm se desarrollan talleres de Biotecnología orientados a estudiantes de 4º de E.S.O. y de Bachillerato con el objetivo de fomentar la cultura científica y la innovación en la sociedad destacando la importancia de la innovación en los diferentes campos que abarca la Biotecnología.

El grupo de investigación educativa **Biometac** realiza diversas experiencias en el marco de Proyectos de Innovación Docente de la Universidad de León. Este grupo está formado por profesores, pertenecientes a diversas áreas de conocimiento relacionadas con las ciencias de la vida y la tierra, y por estudiantes voluntarios de tercer y cuarto curso de los Grados de Biología, Biotecnología y Ciencias Ambientales.

El GID Biometac desarrolla este curso 2024-25 un proyecto titulado: “Caviana Biometac: talleres itinerantes para llevar la Biología al mundo rural”. El mencionado proyecto organizó tres pequeñas ferias de ciencia en las localidades de Reyero, Valencia de Don Juan y Carrizo de la Ribera de la provincia de León. En cada una de estas ferias se desarrollaron siete talleres dedicados a diferentes aspectos científicos del ámbito de la Biología (**Fig. 10**). Tanto el diseño de los talleres como la elaboración de los materiales y el trabajo que requiere su puesta en marcha han sido llevados a cabo por profesores y alumnos de la Facultad. Paralelamente, un grupo de estudiantes ha generado diversos materiales para presentar los talleres y difundirlos en redes sociales.

En nuestra Facultad también ha tenido lugar la presentación de diversos libros. El 16 de mayo en el Salón de Grados se presentó el libro: “Las Claves del Río” editado por AEMS-Ríos con vida; el 7 de noviembre se presentó el libro de prácticas: “La Ciencia a tu alcance: experimentos para comprender el mundo natural” que reúne un total de 10 prácticas que abordan temas vinculados a los Grados de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales y han sido creadas por estudiantes y docentes de la Facultad; el 11 de noviembre tuvo lugar en el Aula Magna una Charla-presentación del libro “Bestiario Leonés: en el punto de encuentro entre la zoología, la ecología y la etnografía”.



Figura 10. Taller del grupo Biometac en la localidad de Reyero.

Festividad de San Alberto Magno

El viernes 15 de noviembre celebramos, un año más, la festividad de nuestro patrón, San Alberto Magno. Dentro de las actividades organizadas en el programa de San Alberto destaca el *GIScape-room* en las aulas de la Facultad, organizado por el grupo de Investigación Q-GEO y las conferencias: “Aplicación de la IA al mundo del vino: el caso de Aiwine” a cargo del Dr. Juan Vicente García Manjón, Director de la Cátedra de Empresa Familiar de la Universidad Europea Miguel de Cervantes (Valladolid); “IA en biomedicina: del dato al reposicionamiento de fármacos” por el Dr. Alejandro Rodríguez González, Catedrático del Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos e Ingeniería del Software de la Universidad Politécnica de Madrid e “Inteligencia artificial en Gastronomía” cuyo ponente fue el Dr. Eneko Axpe, Gastrofísico de la NASA e investigador de la Universidad del País Vasco.



Figura 11. Licenciados en Biología de la promoción 1994-99 en su 25 aniversario.

El acto académico tuvo lugar en el Aula Magna de la Facultad y fue presidido por el Vicerrector de Actividad Académica D. Julio Abad González y la Decana de la Facultad Dña. Laura López Campano. La conferencia titulada: “25 años de evolución de la consultoría ambiental en España: experiencias, reflexiones, conclusiones y lecciones aprendidas” fue pronunciada por D. David Llamas Alonso, egresado de nuestra Facultad, licenciado en Biología en 1996 y licenciado en Ciencias Ambientales en 1999 y hoy Director de Sostenibilidad y ESG para España y Portugal de la consultora internacional WSP.

Se entregaron distinciones honoríficas a los Profesores y Personal Técnico de Gestión y Administración y Servicios de la Facultad jubilados durante el curso 2023-24, se impusieron las becas a los licenciados en Biología (**Fig. 11**) y a los licenciados en Ciencias Ambientales (**Fig. 12**) de la promoción 1994-99. También se realizó un homenaje a los alumnos de la 3ª promoción de Biología (1974-24) por su 50 aniversario (**Fig. 13**).

Se anunció además la concesión de los Premios Extraordinarios Fin de Carrera de los Grados de Biología, Biotecnología y Ciencias Ambientales, así como la concesión de los Premios Anuales: “*DSM-Firmenich-Vitatene Awards for Academic Excellence*” y “Premio Fin de Carrera a la Excelencia Académica Insud Pharma S.L.”.



Figura 12. Licenciados en Ciencias Ambientales de la promoción 1994-99 en su 25 aniversario.



Figura 13. Tercera promoción de Biología (1974-79) en su 50 aniversario.



Si tienes alguna sugerencia o quieres enviarnos tus artículos, tu proyecto de tesis o alguna fotografía para la portada, ponte en contacto con nosotros:

ambiociencias@unileon.es

La edición electrónica de la revista se puede consultar en:

<http://centros.unileon.es/biologia/ambiociencias1/>

Ambio ciencias



REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA E INNOVACIÓN DOCENTE

En contraportada: logotipo diseñado por el Dr. Estanislao de Luis Calabuig como anuncio del quincuagésimo aniversario de los estudios de Biología en León.



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES. UNIVERSIDAD DE LEÓN