

A full-page underwater photograph of a woman with long brown hair wearing a clear diving mask. She is surrounded by numerous small orange fish and bubbles. The water is clear blue with light rays filtering through.

INVESTIGACION

CULTURA CIENCIA Y TECNOLOGIA

VOLUMEN 18
Nº 36
2026

ARTES Y HUMANIDADES · CIENCIAS · CIENCIAS DE LA SALUD · CIENCIAS SOCIALES Y JURIDICAS · INGENIERIA Y ARQUITECTURA

INVESTIGACION

CULTURA CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Revista Nº 36
VOLUMEN 18 2026

Director

José Luis Vázquez López
investigación@galicia.com
36201 Vigo - España

Dirección Creativa e Innovación

María del Mar Vázquez Jiménez
mariadelmarvj@gmail.com

Consejo de Redacción

José Luis Vázquez López
Francisco Javier Rodríguez Berrocal
Almudena Fernández Brieria

Comité Científico

Jesús Souza Troncoso
José Luis Legido Soto
Juan Manuel Vieites Baptista de Sousa
Francisco Javier Rodríguez Berrocal
Almudena Fernández Brieria
Ángel Tomás Camacho García
Antonio De Ron Pedreira
Diana Valverde Pérez
José Fariña Rodríguez

Secretaría y Dep. Divulgación

Raquel María Vázquez

Revista adscrita al

INSTITUTO DE CULTURA,
CIENCIA Y TECNOLOGÍA (ICCT)
www.institutociencia.es

ISSN: 1889 - 4399

DEPÓSITO LEGAL:

VG - 347 - 2009



XUNTA
DE GALICIA Xacobeo 2027

Queda prohibida la reproducción total o parcial de cualquiera de los contenidos de esta publicación, sin citar la procedencia. La revista "Investigación" no se hace responsable, ni se identifica con artículos, ni opiniones que publiquen sus autores y colaboradores.

LOS INVESTIGADORES DE INSTITUCIONES, EMPRESAS, LABORATORIOS Y UNIVERSIDADES INTERESADOS EN REMITIR ARTÍCULOS, PREVIAMENTE DEBERÁN CONTACTAR CON NUESTRO DEPARTAMENTO DE REDACCIÓN PARA RECIBIR INSTRUCCIONES: investigación@galicia.com



índice

SUMARIO

VOLUMEN 18 Nº 36 2026

Editorial

6 **G** **ALICIA, INVESTIGACIÓN DE EXCELENCIA QUE GENERA RIQUEZA**

Román Rodríguez González

Conselleiro de Educación, Ciencia, Universidades y Formación Profesional de la Xunta de Galicia.

Formulación magistral en pediatría

8 **M** **“MEDICINAS DE AUTOR” ELABORADAS A LA CARTA EN EL HOSPITAL: ¿CÓMO Y PORQUÉ SE ELABORAN? ¿CÓMO SE ESTUDIA SU ESTABILIDAD?**

Susana Castro-Luaces^{1, 2, 3}, Noemí Martínez-López de Castro^{2, 3}, Natividad Lago-Riveiro^{2, 3}, Elisa González-Romero^{1, 4*}

¹ Lab. Electroanálisis y Biosensores. Departamento de Química Analítica y Alimentaria. Universidade de Vigo, España.

² Servicio de Farmacia. Complejo Hospitalario Universitario de Vigo. España.

³ Grupo de Innovación en Farmacia Clínica (i-Farma-Vigo). Instituto de Investigación Sanitaria Galicia Sur (IIS Galicia Sur), SERGAS-UVIGO, España.

⁴ Grupo de Nuevos Materiales, Instituto de Investigación Sanitaria Galicia Sur (IIS Galicia Sur), SERGAS-UVIGO, España.

Sedimentación marina

19 **A** **ARCHIVOS SEDIMENTARIOS BAJO EL OCÉANO: RECONSTRUYENDO EL CLIMA DEL PASADO EN GALICIA**

Ángel Enrique López-Pérez, Belén Rubio y Daniel Rey

Centro de Investigación Mariña. Universidade de Vigo. Grupo de Geología Marina y Ambiental (GEOMA) 36310 Vigo. Spain.

Competencias transversales en salud

28 L **A DIMENSIÓN OLVIDADA DE LA FORMACIÓN UNIVERSITARIA: BIENESTAR EMOCIONAL Y COMPETENCIAS RELACIONALES EN LOS FUTUROS PROFESIONALES DE LA SALUD**

María José Ferreira Díaz, PhD

Escuela Universitaria de Enfermería de Lugo. Centro Adscrito a USC. Lugo. España.

Ecosistemas acuáticos

35 C **CUADERNO DE BITÁCORA DE UNA MOLÉCULA DE AGUA: DEL COSMOS A GALICIA. HISTORIA DE UNA LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN**

Jesús M. Torres Palenzuela, Clara Arrimadas Gieseemann, Iván Outomuro Mariño, Nerea Vírveda Olabegogeoascoechea

Grupo ETEA (Ecología y Tecnología de Ecosistemas Acuáticos). Dpteo. Física Aplicada. Facultad de Ciencias de la Universidade de Vigo. Lagoas Marcosende. Vigo.

Comunicación botánica

41 N **OMBRAR PARA CONSERVAR: COMUNICACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD, EXOFITÓNIMOS Y CONSERVACIÓN EX SITU EN EL ARBORETUM-PINETUM LUCUS AUGUSTI**

José Enrique Pérez-Rodríguez

Departamento de Traducción y Lingüística. Facultad Filología y Traducción. Universidad de Vigo. España.

Enfoque STEAM (Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics)

55 D **CONSTRUYENDO EL CUBO DE RUBIK: UNA SITUACIÓN DE APRENDIZAJE TRANSVERSAL STEAM**

Adrián López Mourelle¹, María Lourdes Mourelle Mosqueira²

¹ CPEIBas Arteaga de Sucina, Murcia, España.

² Grupo de investigación FA2, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Vigo, Campus de Vigo, España.

editorial

GALICIA, INVESTIGACIÓN DE EXCELENCIA QUE GENERA RIQUEZA

La ciencia gallega vive un momento de madurez. Durante años hemos hablado de la investigación como una promesa de futuro, como una apuesta necesaria para situar a Galicia en el mapa del conocimiento europeo. Hoy podemos afirmar que esa apuesta está dando frutos visibles. Nuestra comunidad cuenta con personal investigador capaz de competir en las convocatorias más exigentes, con centros que ganan prestigio internacional y con una política científica orientada a crear las condiciones para que el talento encuentre aquí un lugar donde crecer.

La investigación de excelencia no surge de manera espontánea; es una carrera de fondo. Requiere visión, continuidad y confianza. Requiere instituciones que comprendan que el conocimiento necesita tiempo, estabilidad y ambición. También exige una Administración que acompañe a quienes trabajan en la frontera de la ciencia, porque detrás de cada avance hay años de esfuerzo, equipos altamente cualificados y una red de apoyos que permite transformar una idea en una contribución real para la sociedad.

Ese es el sentido del programa *Oportunius*, una iniciativa de la Xunta de Galicia que se ha convertido en una de las piezas más valiosas de nuestra I+G+i, la I+D+i que se

hace en Galicia. Desde su puesta en marcha en 2014, su objetivo ha sido generar, atraer, recuperar y retener talento investigador de primer nivel, especialmente vinculado a las ayudas del Consejo Europeo de Investigación (ERC en sus siglas en inglés). El resultado hoy es un ecosistema más fuerte, más competitivo y con mayor capacidad para proyectarse fuera de nuestras fronteras.

Los datos muestran la dimensión de este avance. Galicia ha pasado de haber conseguido 7 proyectos ERC antes de 2014 a acumular 57 en la actualidad, un salto que nos sitúa como sexta comunidad autónoma en número de proyectos ERC. El impacto económico asociado al programa alcanza los 123 millones de euros, resultado de la captación de fondos europeos y de la actividad investigadora y de transferencia de los grupos liderados por beneficiarios de ayudas ERC. Este retorno multiplica prácticamente por seis la inversión realizada por la Xunta y reafirma la idea de que invertir en ciencia es invertir en conocimiento, en riqueza y en futuro para Galicia.

Pero el valor de *Oportunius* no puede medirse únicamente en términos económicos. Su mayor aportación reside en haber contribuido a crear un entorno atractivo para

que investigadores de referencia desarrollen en Galicia proyectos científicos de alta calidad. Gracias a este programa, nuestra comunidad ha reforzado su capacidad para retener a quienes ya investigaban aquí, facilitar el retorno de talento gallego que trabajaba en otros países y atraer perfiles internacionales que han elegido Galicia como lugar desde el que impulsar su carrera.

Esta transformación tiene un impacto directo en nuestras universidades, en los centros de investigación y en el conjunto del sistema científico gallego. Cada proyecto ERC que se desarrolla en Galicia fortalece equipos, abre nuevas líneas de trabajo, mejora la formación de personal investigador joven y aumenta la presencia internacional de nuestras instituciones. La ciencia excelente genera un efecto arrastre que beneficia al conjunto del ecosistema y contribuye a la “Galicia Calidade”.

El año 2025 marcó un punto de inflexión especialmente significativo. Galicia alcanzó una tasa anual de éxito del 20 % en las convocatorias ERC, con once proyectos obtenidos a partir de candidaturas presentadas desde nuestra comunidad, lo que la situó en una posición destacada en el conjunto de España. Ese resultado es fruto de una trayectoria sostenida, de una mejora progresiva en la preparación de propuestas y de la consolidación de una cultura científica más internacional y más ambiciosa.

La excelencia científica tiene, además, una dimensión humana que conviene subrayar. Detrás de cada proyecto hay personas investigando. En concreto, los proyectos ERC ejecutados en Galicia crearon más de 320 empleos cualificados. Galicia necesita a esas personas. Por eso, *Oportunius* forma parte de una estrategia más amplia de captación y consolidación de talento.

La Xunta de Galicia trabaja para que nuestra comunidad sea un territorio donde resulte posible construir una carrera científica sólida, con oportunidades reales y con una conexión creciente entre investigación, innovación y tejido productivo. En esa estrategia se integran otras iniciativas orientadas a atraer, retener y captar científicos de alto nivel Talentgal, la Fundación Galtia o el programa Retorna Talento I+G+i.

Los resultados científicos alcanzados por los grupos vinculados a *Oportunius* confirman que vamos en la direc-

ción adecuada. Sus publicaciones, tesis doctorales, solicitudes de patente y empleos cualificados reflejan una actividad intensa y de alto impacto. No hablamos solo de ciencia reconocida por la comunidad académica internacional, sino también de conocimiento que se transfiere, que se valoriza y que contribuye a mejorar la competitividad de Galicia.

La investigación de excelencia es una condición necesaria para afrontar los retos que tenemos por delante como el envejecimiento, la sostenibilidad, la transición energética, la digitalización o la necesidad de construir una economía más innovadora. Ninguna de esas respuestas será sólida y duradera sin ciencia, talento y capacidad para conectar el conocimiento con la sociedad.

Miramos al futuro con ambición. Sabemos que la competencia internacional por el talento es intensa y que los mejores investigadores pueden elegir dónde desarrollar sus proyectos. Precisamente por eso, Galicia debe seguir ofreciendo buenas razones para quedarse, para regresar y para venir. Tenemos calidad científica, instituciones comprometidas, una red de centros de alto nivel y una sociedad que comprende cada vez mejor que la ciencia no es un lujo, sino una necesidad estratégica.

Como conselleiro de Educación, Ciencia, Universidades y Formación Profesional, quiero reafirmar el compromiso de la Xunta de Galicia con una investigación excelente, abierta al mundo y conectada con las necesidades de nuestro tiempo. Seguiremos trabajando para que quienes investigan encuentren aquí apoyo, reconocimiento y estabilidad y, para ello, seguiremos reforzando los instrumentos que nos permiten competir en Europa.

La Galicia del futuro se está escribiendo también en sus universidades y centros de conocimiento. Cada avance científico y cada investigador que apuesta por Galicia nos acercan más a una comunidad más innovadora, más preparada y más capaz de decidir su propio futuro. Porque cuando la ciencia crece, Galicia crece con ella.

Román Rodríguez González

Conselleiro de Educación, Ciencia, Universidades y Formación Profesional de la Xunta de Galicia.

“MEDICINAS DE AUTOR” ELABORADAS A LA CARTA EN EL HOSPITAL: ¿CÓMO Y POR QUÉ SE ELABORAN? ¿CÓMO SE ESTUDIA SU ESTABILIDAD?

Susana Castro-Luaces^{1, 2, 3}, Noemí Martínez-López de Castro^{2, 3},
Natividad Lago-Riveiro^{2, 3}, Elisa González-Romero^{1, 4}

¹ Lab. Electroanálisis y Biosensores. Departamento de Química Analítica y Alimentaria. Universidade de Vigo. España.

² Servicio de Farmacia. Complejo Hospitalario Universitario de Vigo. España.

³ Grupo de Innovación en Farmacia Clínica (i-Farma-Vigo). Instituto de Investigación Sanitaria Galicia Sur (IIS Galicia Sur). SERGAS-UVIGO. España.

⁴ Grupo de Nuevos Materiales. Instituto de Investigación Sanitaria Galicia Sur (IIS Galicia Sur). SERGAS-UVIGO. España.

Palabras clave: *Formulación oral de fosfatos, sistema ácido-base del ortofosfórico/fosfato, disolución tampón, técnicas analíticas, valoración por retroceso.*

RESUMEN

La labor del farmacéutico hospitalario es determinante para resolver el vacío terapéutico derivado de la necesidad de ciertos tratamientos y la ausencia de presentaciones comerciales adecuadas para ellos como son el abordaje de enfermedades raras, siendo una situación recurrente en la población pediátrica. En este escenario, la formulación magistral se constituye como una herramienta indispensable y, en múltiples ocasiones, como el último recurso fármaco-terapéutico disponible. Esta actividad tiene por objeto garantizar que cada paciente reciba un tratamiento ajustado a su patología y estrictamente a sus requerimientos clínicos e individuales. No obstante, la elaboración de formas farmacéuticas orales líquidas personalizadas enfrenta retos críticos, tales como la complejidad en la adquisición y en la manipulación de los principios activos o en la carencia de evidencia científica sobre la estabilidad de estas preparaciones extemporáneas. Ante la falta de estudios específicos sobre estabilidad de medicamentos, las guías de consenso suelen restringir el plazo de validez a solo 14 días, lo que compromete la logística hospitalaria,

la adherencia al tratamiento y la conveniencia o comodidad del propio paciente.

Este artículo describe el proceso de rediseño de la formulación magistral conocida como “**Solución oral de Joulie**” que dará lugar a una **nueva formulación oral de fosfatos**. Se hará el seguimiento de la estabilidad por varias técnicas analíticas de esta nueva forma farmacéutica, analizando la transición hacia el uso de materias primas puras para mejorar la seguridad y la calidad del preparado. Se exponen, además, las técnicas instrumentales seleccionadas para el seguimiento de la integridad química que proporcionen resultados rápidos y fiables –turbidimetría, potenciometría y conductimetría–, subrayando cómo la colaboración entre el ámbito hospitalario y académico permite transformar una preparación artesanal en una opción terapéutica segura y eficiente cara a la atención al paciente. Por último, los resultados obtenidos por las técnicas mencionadas fueron validados por el método oficial que implica una valoración ácido-base por retroceso, llevando a cabo la detección del punto final de la valoración por potenciometría con electrodo selectivo de iones, ISE (de las siglas inglesas *Ion Selective Electrode*). El siguiente **esquema** resume la planificación del estudio, las metodologías analíticas utilizadas y validadas, las ventajas de la nueva formulación magistral y los logros conseguidos con este trabajo.



1. INTRODUCCIÓN

Una de las labores de los farmacéuticos hospitalarios es intentar responder a la demanda de medicación que la industria farmacéutica no abastece (como, por ejemplo, ajustes de dosis de medicamentos poco usados para pacientes pediátricos o medicamentos no comercializados para el tratamiento de enfermedades raras o tratamientos experimentales, etc.), estando regulada dicha labor por el Real Decreto Legislativo 1/2015¹. La formulación magistral es una herramienta fundamental, siendo las áreas de farmacotecnia de los Servicios de Farmacia Hospitalaria las encargadas de su elaboración, que será en muchos casos el último recurso farmacoterapéutico para estos pacientes, debido a la dificultad o imposibilidad en la adquisición del principio activo y/o la dificultad/peligrosidad en la elaboración. Elaborar formas farmacéuticas orales líquidas para que puedan ser administradas a la población pediátrica y/o pacientes que padecen enfermedades minoritarias o raras, supone algunas veces un importante reto, ya que al tratarse de medicamentos de uso poco habitual, por la escasa casuística de las patologías o por el grupo de edad al que se destinan, en muchas ocasiones no se dispone de información para poder establecer una estabilidad adecuada que permita usar estos fármacos cómodamente, garantizando su efectividad y seguridad.

1.1. Marco Legal y Justificación Clínica.

Según la normativa vigente en España, consolidada en el Real Decreto Legislativo 1/2015¹, se define la prestación farmacéutica como un proceso integral que trasciende del mero suministro de productos. Según este marco legal, el sistema debe garantizar que el paciente reciba una intervención adaptada a sus necesidades clínicas y requerimientos individuales. Este compromiso exige la administración de dosis precisas durante el periodo temporal adecuado, respaldadas por información técnica que asegure su uso correcto y bajo criterios de mínimo impacto económico para el sistema sanitario. En España, de manera general, es obligatorio disponer de Ser-

vicios de Farmacia en todos los hospitales de más de 100 camas, así como en los centros de asistencia social y de los psiquiátricos con las mismas características. Estos servicios tienen su origen en la segunda mitad del S. XX con el desarrollo de los grandes hospitales, aunque no fue hasta el año 1985 cuando surge la especialidad de Farmacia Hospitalaria. Desde su instauración, esta especialidad ha experimentado un crecimiento exponencial en sus competencias, trascendiendo la mera gestión logística para asumir, además, la responsabilidad técnica integral del medicamento. De acuerdo con las funciones especificadas en el Real Decreto Legislativo 1/2015¹, el farmacéutico especialista desempeña hoy labores críticas que incluyen la farmacocinética clínica, la farmacovigilancia intrahospitalaria, la selección científica de medicamentos y el soporte a la investigación clínica. Dentro de este catálogo de funciones, la preparación de fórmulas magistrales se erige como una actividad fundamental y altamente especializada. Las fórmulas magistrales se definen como *"El medicamento destinado a un paciente individualizado, preparado por un farmacéutico, o bajo su dirección, para cumplimentar expresamente una prescripción facultativa detallada de los principios activos que incluye, según las normas de correcta elaboración y control de calidad establecidas al efecto, dispensado en oficina de farmacia o servicio farmacéutico y con la debida información al usuario en los términos previstos en el artículo 42.5."*².

En los Servicios de Farmacia, las unidades de farmacotecnia o tecnología farmacéutica responden a la necesidad de medicamentos que la industria no abastece de forma adecuada para ciertos pacientes. El origen de esta falta de medicamentos puede resumirse en dos premisas:

- La primera es la escasa demanda. Afortunadamente, los pacientes que requieren de medicamentos especialmente formulados para ellos son una minoría dentro de la población general y responden a patologías de escasa incidencia o incluso enfermedades raras, por lo que, a pesar de que existen incentivos en la legislación para el desarrollo e investigación de estos medicamentos³ (que en caso de comercializarse se podrían definir en muchos casos como huérfanos), la industria no siempre invierte recursos en ellos de manera prioritaria.
- La segunda sería la complejidad en su comercialización. Los medicamentos que se preparan o re-dosifican en las unidades de farmacotecnia a menudo están destinados a pacientes pediátricos. El desarrollo de medicamentos para dicha población de pacientes presenta dificultades añadidas en cuanto a la representación de esta población en los ensayos clínicos⁴ por el escaso número de pacientes.

1. 2. Desafíos Fisicoquímicos y Objetivo de la Formulación Magistral

Al diseño y elaboración de fórmulas magistrales se le añade una importante complicación que es, en ocasiones, la poca información disponible y la falta de estudios de estabilidad de las mismas por la casuística previamente indicada. En la actualidad, se establece que, cuando no se dispone de estudios de estabilidad, otorgar a las fórmulas magistrales orales líquidas una estabilidad máxima y empírica de 14 días, según las Guías de Buenas Prácticas de Preparación de Medicamentos en los Servicios de Farmacia Hospitalaria⁵. Esto, entre otros inconvenientes, obliga a pacientes con tratamientos crónicos, o a sus familiares, a acudir quincenalmente a las consultas del Servicio de Farmacia Hospitalaria para la recogida de su fórmula magistral. Por ello, se hace imprescindible realizar estudios de estabilidad fisicoquímica que permitan conocer la concentración del principio activo durante todo el estudio temporal que asegure que se mantiene constante su concentración y es estable en periodos mayores de tiempo. Estos estudios son clave para optimizar el uso de recursos, mejorar la atención farmacéutica y ofrecer una respuesta más sostenible y humana a estos pacientes.

La estabilidad de una especialidad farmacéutica se define como su capacidad para preservar sus propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y bio-farmacéuticas dentro de los límites aceptados durante su vida útil⁶. En general, se establece que el límite de estabilidad de una formulación dada sea aceptado cuando no hay cambios en la cuantificación del principio activo superiores al 10% con respecto a la cantidad nominal o declarada a tiempo inicial (tiempo cero, t_0), o lo que es lo mismo, la concentración de principio activo se mantiene por encima del 90% con respecto a la cantidad nominal o la declarada a t_0 ⁷. Los estudios de estabilidad fisicoquímica, junto con los estudios de estabilidad microbiológica, podrían garantizar la asignación a las fórmulas magistrales de nuevos periodos de validez para superar la limitación de la caducidad empírica de 14 días establecida por defecto en ausencia de estudios específicos. Es por tanto de vital importancia que, junto al diseño de las formulaciones, se haga una buena selección de las metodologías analíticas más adecuadas que puedan garantizar el seguimiento de la estabilidad fisicoquímica de dichas formulaciones, dado que es un proceso complejo que requiere especialización.

Para la selección de las técnicas analíticas más apropiadas en el estudio de estabilidad de una fórmula magistral habrá que tener en cuenta varios factores, como son las propiedades fisicoquímicas del analito en sí (principio activo), el estado físico del preparado (sólidos, disoluciones, sus-

pensiones, pomadas, geles, etc.), la existencia de estudios previos, requisitos de Farmacopeas Española⁸, Europea⁹ y Americana⁶ y recomendaciones de guías y manuales de expertos como la Guía de Buenas Prácticas de preparación de medicamentos en los servicios de Farmacia Hospitalaria⁵, las Guías Gerpac¹⁰, las directrices de la ICH (International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Registration of Pharmaceuticals for Human Use)¹¹ o el Manual de Farmacotecnia¹² que está avalado por la Sociedad Española de Farmacia Hospitalaria.

Tradicionalmente, la composición de la **“Solución oral de Joulie”** estaba basada en la preparación de una disolución con la mezcla de dos componentes: el ácido ortofosfórico (H_3PO_4) y la sal disódica del hidrogenofosfato (Na_2HPO_4)¹³. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal del presente trabajo se centra en el rediseño y optimización de una variante de la formulación oral de fosfatos o formulación oral de Joulie. Para la preparación de esta nueva variante de la fórmula magistral se parte por disolver la sal monosódica del dihidrogenofosfato (NaH_2PO_4) como único principio activo, al que se le añade la sal sódica del metilparabeno como conservante, y se procede al estudio de la estabilidad fisicoquímica con el empleo de metodologías analíticas que permitan detectar, cuantificar y realizar el seguimiento de la concentración de dicho componente, de cuyos resultados se pueda garantizar un periodo de validez razonable para la misma. La elección de las técnicas se ha realizado en función del analito, considerando sus propiedades fisicoquímicas (forma iónica ácida que cristaliza al disminuir la temperatura) y el nivel de concentración en el que se encuentra presente en la fórmula magistral. En definitiva, se expone en este artículo un ejemplo de rediseño de la **formulación oral de fosfatos (“Solución oral de Joulie”)** con la descripción de las propiedades ácido-base del principio activo y de las técnicas analíticas seleccionadas para el estudio de su estabilidad que, en resumen, son las siguientes: turbidimetría, conductimetría y potenciometría. La confirmación del periodo de estabilidad puede llevarse a cabo por dos métodos oficiales. El primero de ellos (que es el que se describe en este trabajo) es la volumetría ácido-base por retroceso, siguiendo la detección del punto final de la valoración por potenciometría con electrodo selectivo de iones, ISE (de las siglas inglesas *Ion Selective Electrode*), aplicando el método descrito por la USP-NF *Sodium Phosphates Rectal Solution* para el análisis de fosfato en medicamentos¹⁴. El segundo (que será objeto de otra publicación) es el que utiliza la técnica cromatografía iónica, IC (de las siglas en inglés *Ion Chromatography*), aplicando la versión de *Metrohm Application Note AN-S-398*¹⁵ adaptada a la descrita por USP-NF *Sodium Phosphates Compounded Injection Method*¹⁶.

2. DISEÑOS DE LA FORMULACIÓN ORAL DE FOSFATOS

Históricamente, en el ámbito de la farmacia hospitalaria, la “**Solución oral de Joulie**” ha constituido el estándar terapéutico para el tratamiento oral de la hipofosfatemia, el raquitismo hipofosfático y la osteomalacia, con una relevancia crítica en la práctica clínica neonatal. Su formulación tradicional o clásica (Formulación Magistral A, **FMA**) se basa en la preparación de una disolución que contiene la mezcla de ácido ortofosfórico (85%) y de la sal hidrogenofosfato disódico dodecahidrato (12-hidrato), que se disuelven en 100 mL de agua conservante (con nipagin y nipasol) sin propilenglicol en las cantidades que se recogen en la **Tabla 1**, cantidades que proporcionan una concentración final de 1 mmol de fósforo (P) y 1 mmol de sodio (Na) por mL, manteniendo un perfil de pH final situado en el intervalo entre 4-5.

Con objeto de optimizar los tiempos de elaboración (al simplificar la metodología de preparación con tan solo disolver el contenido de unos sobres comerciales del principio activo) y elevar al mismo tiempo los estándares de seguridad (al eliminar del procedimiento la manipulación del ácido ortofosfórico), se ha optado por una preparación alternativa, a la que se asigna Fórmula Magistral B (**FMB** en **Tabla 1**), cuya composición de la disolución parte del dihidrogenofosfato monosódico monohidrato, principio activo suministrado en formato sobres de Fosfato NM[®] comerciales, y agua. La ficha técnica desvela que no tiene ni excipientes ni conservantes (información detallada y actualizada de este medicamento está disponible en la página Web de la Agencia Española del Medicamento y Productos Sanitarios¹⁷ y de la Web Farmacéuticos del Consejo General de Colegios Farmacéuticos

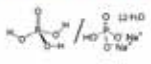
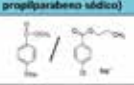
de España¹⁸. El pH resultante de la disolución final preparada mantiene también un pH entre 4-5, como era de esperar teniendo en cuenta las propiedades ácido-base del sistema del ácido ortofosfórico, tal y como se describirá en el siguiente apartado:

3. Propiedades ácido-base del principio activo: sistema del ácido ortofosfórico. La cantidad o número de sobres utilizados se basa en el cálculo para que, la disolución preparada, contenga la misma cantidad de P y Na que la “**Solución de Joulie clásica**” original (**FMA** y **FMB**, **Tabla 1**).

En paralelo a lo anterior, este trabajo evalúa la elaboración de la **formulación oral de fosfatos** utilizando otro reactivo para preparar la disolución, abreviada como Fórmula Magistral C (**FMC** en **Tabla 1**), que parte también de la molécula de dihidrogenofosfato monosódico como materia prima pura (versión dihidratada, suministrada por Acofarma), y agua, al que se le añade un conservante: nipagin, la sal sódica del metilparabeno (4-metoxycarbonil-fenolato sódico, también suministrada por Acofarma), cuya solubilidad en agua es del orden de 100 veces superior a la del metilparabeno para lograr que se disuelva mejor en este disolvente¹⁹. La diferenciación técnica de esta variante **FMC** respecto a la **formulación oral de fosfatos alternativa FMB** radica en el empleo de la sal dihidratada como materia prima pura, un compuesto con especificaciones farmacopeicas que es suministrado por proveedores autorizados y la adición del conservante con la pretensión de alargar la vida media del medicamento por encima de los 14 días estipulados por normativa. Esta elección es estratégica debido a que, según el Real Decreto Legislativo 16/2012²⁰ de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad del Sistema Nacional de Salud y mejorar la calidad y seguridad de sus prestaciones, la elaboración de fórmulas magistrales a partir de especialidades comerciales se encuentra autorizada exclusivamente en los servicios de farmacia hospitalaria, por lo que en las oficinas de farmacia comunitarias está supeditada a la disponibilidad y al empleo de materias primas autorizadas para su uso en medicamentos destinados a humanos. Al validar la estabilidad de una fórmula basada exclusivamente en materia prima pura, se elimina la barrera regulatoria que restringe este tipo de preparaciones al ámbito de la farmacia hospitalaria⁵.

TABLA 1

Fórmulas magistrales (FM) para la preparación de las diferentes formulaciones orales de fosfatos, basadas en la preparación de la disolución con el principio activo en medio acuoso (con y sin conservante)^{8, 13}

Formulación de Joulie Formulación de fosfato ("Solución de Joulie")	Clásica (FMA) (sin propilenglicol)	Alternativa (sobre Fosfato NM [®]) (FMB)	Materia prima pura (FMC)
Principio Activo	H ₂ PO ₄ /Na ₂ HPO ₄ x12H ₂ O	NaH ₂ PO ₄ x1H ₂ O	NaH ₂ PO ₄ x2H ₂ O
Estructura			
Cantidades (g) ^a	5,45 / 18,75	14,24 (4x 3,56 g/sobre)	15,60
Conservante	nipagin/nipasol (metilparabeno sódico/ propilparabeno sódico)	ninguno	nipagin (4-metoxycarbonil-fenolato sódico, metilparabeno sódico)
Estructura			
Cantidades (mg)	80 / 20		114
Agua para lab (mL) (c.s.p) ^{b,c}	100	100	100

^aLas cantidades de principio activo en cada formulación magistral dan un contenido en P y Na de 1 mmol/mL.

^bc.s.p. cantidad suficiente para.

^cProcedimiento Normalizado según el Formulario Nacional de la Agencia Española del Medicamento para su elaboración [8].

3. PROPIEDADES ÁCIDO-BASE DEL PRINCIPIO ACTIVO: SISTEMA DEL ÁCIDO ORTOFOSFÓRICO

El ácido ortofosfórico puede ceder hasta tres protones de forma sucesiva, estableciéndose los diferentes equilibrios ácido-base a medida que va cediendo los mismos; a cada pérdida de protón le corresponde una constante de equilibrio

de disociación ($pK_a = -\log K_a$) y, como especie predominante, se forma la correspondiente base conjugada de carácter iónico (anión), siguiendo la secuencia: $H_3PO_4 / H_2PO_4^- / HPO_4^{2-} / PO_4^{3-}$, con

$pK_{a1} = 2,2$ (para la pérdida del primer protón: $H_3PO_4 \rightarrow H_2PO_4^- + H^+$), con $pK_{a2} = 7,2$ (para la pérdida del segundo protón: $H_2PO_4^- \rightarrow HPO_4^{2-} + H^+$) y con $pK_{a3} = 12,3$ (para la pérdida del tercer protón: $HPO_4^{2-} \rightarrow PO_4^{3-} + H^+$), respectivamente^{21,23}. La **Figura 1** muestra el diagrama ácido-base del sistema del ácido ortofosfórico en el que se indican los valores de pK_a para cada pérdida de protón y la formación de la base conjugada correspondiente. El equilibrio químico tiene una naturaleza dinámica, por lo que dependiendo del pH de la disolución predominará una u otra forma del sistema del ácido ortofosfórico. De esta manera, al añadir una base que haga aumentar el pH del medio, el ácido H_3PO_4 (línea roja, **Figura 1**) se transforma en el dihidrogenofosfato, $H_2PO_4^-$ (línea naranja, **Figura 1**) a valores de $pH > pK_{a1} = 2,2$, disminuyendo por tanto su concentración; la especie $H_2PO_4^-$ se transforma en el hidrogenofosfato, HPO_4^{2-} (línea verde, **Figura 1**) a valores de $pH > pK_{a2} = 7,2$, disminuyendo igualmente su concentración al mismo tiempo que la del $H_2PO_4^-$; con la pérdida del último protón, el hidrogenofosfato (línea magenta, **Figura 1**) se transforma a fosfato, PO_4^{3-} , a $pH > pK_{a3} = 12,3$, como especie predominante, mientras que decrece la concentración en el resto de las formas protonadas del sistema. En los valores de pH próximos a los pK_a se forman disoluciones tampón o reguladoras de pH de primer orden. Se hace resaltar que las especies extremas, H_3PO_4 y PO_4^{3-} , pueden actuar únicamente como ácido o como base, respectivamente, mientras que las especies intermedias de este sistema, $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-} , son anfóteras, ya que pueden actuar como ácidos (cediendo un H^+) o como bases (captando un H^+), dando lugar a disoluciones tampón o reguladoras de pH de segundo orden.

Para la preparación de la “Solución oral de Joulie clásica” (**FMA, Tabla 1**), se parte de la mezcla de una determinada cantidad de H_3PO_4 y de la sal disódica del HPO_4^{2-} (dodecahidrato) que, teniendo en cuenta las masas moleculares, proporcionan una concentración individual de 0,556 mol/L y 0,523 mol/L, respectivamente, para las cantidades pesadas y una concentración total del sistema: $[H_3PO_4] + [HPO_4^{2-}] = 1,08$ mol/L (cuyo $\log C_i = 0$, línea punteada negra en **Figura 1**). Al mezclar estos componentes, se produce la reacción $H_3PO_4 + HPO_4^{2-} \rightarrow 2H_2PO_4^-$, donde el ácido H_3PO_4 cede un H^+ que capta la base HPO_4^{2-} (**Figura 1**), formándose el dihidrogenofosfato, especie intermedia de naturaleza anfótera que puede actuar como base y como ácido, estableciéndose el equilibrio: $2H_2PO_4^- \rightleftharpoons H_3PO_4 + HPO_4^{2-}$; el pH teórico de esta disolución será aquel en el que ambas concentraciones sean iguales: $[H_3PO_4] = [HPO_4^{2-}]$ y, gráficamente, vendrá dado por el punto

de corte de las líneas roja y verde ($pH = 4,7$ en **Figura 1**) o, numéricamente, por el cálculo del $pH = (pK_{a1} + pK_{a2})/2 = 4,7^{23}$, valor muy próximo al experimental que se encuentra entre 4-5. Se debe tener en cuenta que, experimentalmente, el valor de pH se ve afectado por la temperatura de medida, de forma que, a medida que aumenta la T^a , el pH disminuye muy levemente (en unas décimas)²⁴.

Si para la preparación de la formulación oral de fosfatos se parte de la sal monosódica del dihidrogenofosfato ($H_2PO_4^-$) (**FMB o FMC, Tabla 1**), ya sea monohidrato o dihidrato, teniendo en cuenta las cantidades pesadas y las masas moleculares respectivas, las disoluciones proporcionan una concentración de $[H_2PO_4^-]$ entre 1,00 y 1,03 mol/L para **FMB** y **FMC**, respectivamente. La forma iónica predominante disuelta es el $H_2PO_4^-$ (línea naranja en **Figura 1**), estableciéndose el mismo equilibrio descrito en el párrafo anterior: $2H_2PO_4^- \rightleftharpoons H_3PO_4 + HPO_4^{2-}$ y se obtendrá, por tanto, el mismo resultado de valor de pH que partiendo de la mezcla del ácido ortofosfórico y de la sal disódica del hidrogenofosfato: $pH = 4,7$. En consecuencia, desde una perspectiva química, las tres formulaciones, **FMA**, **FMB** y **FMC**, son virtualmente idénticas en cuanto a su composición iónica, dando lugar a disoluciones tampón de segundo orden de pH del orden de 4,7²².

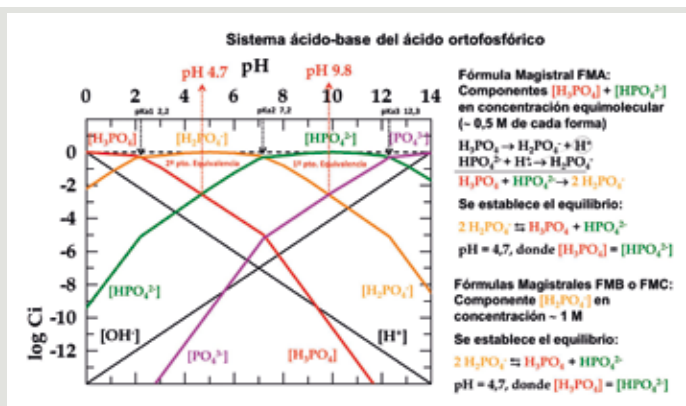


Figura 1. Diagrama ácido-base del sistema del ácido ortofosfórico para una concentración total del sistema de 1 M ($\log C_i = 0$), concentración que corresponde a la concentración de dihidrogenofosfato total en las diferentes formulaciones recogidas en la Tabla 1. (adaptada de la referencia 22). Descripción de las reacciones y equilibrios ácido-base del principio activo que se establecen en cada formulación magistral.

4. ESTRATEGIAS EN LA PREPARACIÓN DE LA FORMULACIÓN ORAL DE FOSFATOS FMC CON NIPAGIN

La fórmula magistral **formulación oral de fosfatos FMC** consta de dos ingredientes (**Tabla 1**): el principio activo, la sal dihidrogenofosfato de sodio, y el conservante nipagin, la sal sódica del

metilparabeno. Para su elaboración se han seguido tres estrategias diferentes, tal y como se describe en la **Figura 2**, basadas en la forma de llevar a cabo la preparación de la disolución y teniendo en cuenta que la solubilidad en agua del principio activo (solubilidad: 121 g/L o 1 M a 20°C)^{24, 25} es superior que la del conservante que, al valor del pH teórico de 4,7 que proporciona la disolución al disolver la sal de fosfato, se encuentra en su forma neutra (metilparabeno) menos soluble y no como anión fenolato (4-metoxycarbonil-fenolato, pKa 8,4²⁶) más soluble en agua por poseer carga.

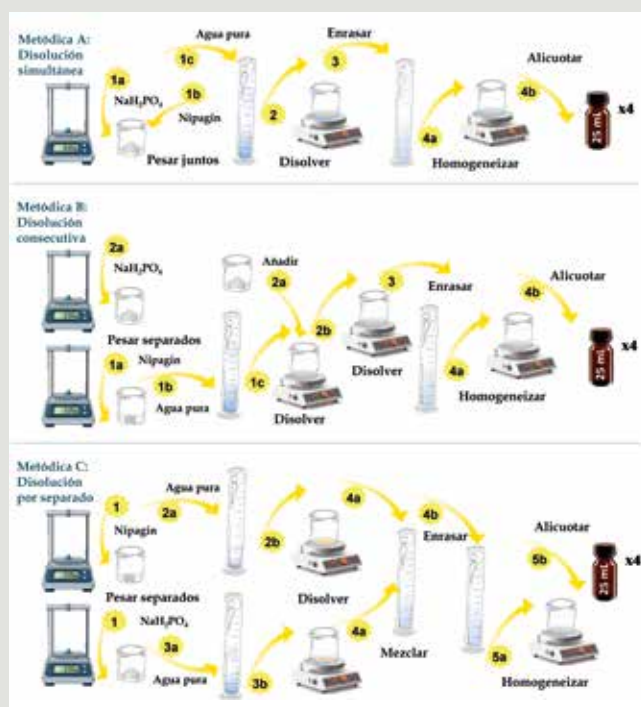


Figura 2. Descripción de las metodías utilizadas en la elaboración de la formulación oral de fosfatos FMC con el conservante nipagin, basadas en las diferentes formas para disolver los constituyentes de la fórmula magistral.

Para realizar el estudio de estabilidad, se diseñó un panel experimental constituido, primeramente, por cuatro muestras. Un control M0 (formulado con el principio activo y sin conservante) y tres muestras (M1 a M3) con la composición de **FMC** (**Tabla 1**). Las muestras 1, 2 y 3 se elaboraron según las metodías A, B y C descritas, respectivamente, de forma que en M1: se disuelven simultáneamente ambos ingredientes (**Figura 2.A**), en M2: se añade el dihidrogenofosfato de sodio sólido sobre la disolución de nipagin, donde se disuelve consecutivamente (**Figura 2.B**) y, por último, en M3: se disuelven, tanto el principio activo como el conservante, por separado y, una vez disueltos, se mezclan ambas disoluciones (**Figura 2.C**). A estas cuatro muestras se les

hace un seguimiento durante un periodo de evaluación de 72 h (3 días) para poder seleccionar la estrategia de elaboración que mejores resultados ofrezca y así proceder con el protocolo de estabilidad a largo plazo. Este protocolo incluye la preparación de otras cuatro muestras (M4 a M7) (utilizando la mejor estrategia de elaboración, seleccionada previamente) a las que, junto a las anteriores (M0 como control sin conservante y M1 a M3), se les hace el seguimiento por varias técnicas (turbidimetría, conductimetría y potenciometría). Para confirmar los resultados por dichas técnicas, se pone a punto el método volumétrico ácido-base por retroceso con detección potenciométrica, elaborándose una novena muestra (M8) con las mismas características que las anteriores (M4 a M7). Las muestras M8 y M6 se valoraron por el método volumétrico transcurridos 72 días para M8 (mantenida a Tª ambiente) y 232 días para M6 (mantenida los primeros 84 días en nevera y los restantes 152 días a Tª ambiente).

Todas las muestras se conservaron en nevera (Tª entre 2-8°C), llevándose a cabo el estudio de estabilidad por un periodo de 16 semanas (112 días), excepto la M6 que se mantuvo a Tª ambiente a partir de la semana 12 (84 días) hasta el final del estudio y la M8, preparada expresamente para la puesta a punto del método volumétrico y que se mantuvo siempre a Tª ambiente, tal y como se ha descrito anteriormente. Los estudios se iniciaron el 2 de julio y se finalizaron el 20 de octubre (~ 4 meses), abarcando un periodo de 35 días (del 21 de julio al 25 de septiembre) en el que las muestras (M0 y M1 a M7) no fueron sometidas al estrés térmico, permaneciendo todo ese periodo en nevera. Se debe tener en cuenta que una disminución de la temperatura durante el almacenaje produce la cristalización del dihidrogenofosfato como sal sódica dihidratada y, por tanto, la aparición de un precipitado cristalino en todas las muestras. Como consecuencia de este fenómeno físico, hay que atemperar todas ellas hasta alcanzar la Tª ambiente antes de proceder a la medida por cualquiera de las técnicas analíticas utilizadas. Teniendo en cuenta este fenómeno de cristalización, es por lo que se opta por mantener la muestra M6 a Tª ambiente a partir de la semana 12; de esta forma la muestra no se somete a consecutivos procesos de estrés térmico y, así, se puede observar cómo le afecta a su estabilidad al mantenerla a esa Tª.

5. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LAS TÉCNICAS ANALÍTICAS SELECCIONADAS

A continuación, se describen y discuten los resultados más relevantes obtenidos con las diferentes técnicas seleccionadas en el estudio de la estabilidad de la **formulación oral de fosfatos FMC** que contiene, además, el conservante nipagin.

5. 1. Turbidimetría

Es una técnica analítica que mide el cambio de las propiedades de la radiación electromagnética, específicamente su dispersión, cuando atraviesa un medio líquido²⁷. Permite cuantificar la cantidad de partículas suspendidas en un medio acuoso, ya que la intensidad de la radiación dispersada es proporcional a la concentración. La turbidez se mide en unidades nefelométricas de turbidez, NTU, de las siglas en inglés *Nephelometric Turbidity Units*. Se utilizó un turbidímetro Hach®, modelo 2100P. Para su calibración se usaron patrones de formazina estandarizada de 0, 20, 100 y 800 NTU.

Se realizaron mediciones sistemáticas de la turbidez de las muestras en el tiempo inicial (día 0, t_0) y en los intervalos programados para el estudio de estabilidad (t_5 , t_{12} , t_{19} , t_{85} , t_{96} , t_{105} y t_{112}). La evolución de estos valores, junto con la composición de las muestras (cantidades exactas pesadas), la estrategia para disolver los ingredientes y de la T^a de medida, se muestra en la **Figura 3**.

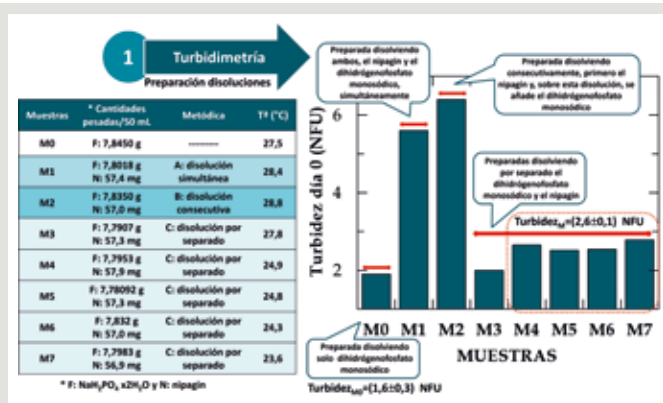


Figura 3. Composición exacta de las muestras M0 a M7, con indicación de la metodología de preparación de la disolución (A, B o C, descritas en la Figura 2) y de la T^a de las disoluciones (parámetro crítico en la solubilidad) durante la medida. Gráfico de barras de la medida de la turbidez en las ocho muestras recién preparadas (día 0, t_0).

Tras un periodo de evaluación de 72 horas de las muestras M0, M1 a M3, los resultados obtenidos por turbidimetría revelaron que la metodología C (M3, 2,09 NTU) mejoraba significativamente la cinética de disolución para una T^a dada ($27,7 \pm 0,2$ °C y, por tanto, la solubilidad de ambos componentes, garantizando una mayor limpidez y transparencia de la disolución en comparación con los métodos A (M1, 5,60 NTU) y B (M2, 6,40 NTU), aproximándose el valor de turbidez obtenido con el dihidrogenofosfato de sodio solo (M0, control, 1,90 NTU) (gráfico de barras en **Figura 3**). Debido a esta superioridad en las características físicas mencionadas y a la mayor eficacia

en el proceso de solubilización, las muestras restantes (M4 a M7) se prepararon siguiendo estrictamente esta metodología C para proceder a la aplicación del protocolo de estabilidad a largo plazo. Los valores de la turbidez de las muestras M4 a M7 medidas a una temperatura de $(24,3 \pm 0,9)$ °C son bastante reproducibles, dando un valor medio de $(2,6 \pm 0,1)$ NTU, siendo este valor ligeramente superior al valor obtenido para M3. Este hecho es consecuencia del efecto de la T^a sobre la solubilidad, de manera que una disminución de la T^a de medida del orden de 3 °C produce una disminución de la solubilidad con el consiguiente aumento del número de partículas cristalinas en suspensión y, por tanto, se obtiene una mayor turbidez.

Asimismo, la técnica fue determinante para caracterizar el comportamiento físico de la formulación bajo condiciones de estrés térmico. Los registros de turbidimetría confirmaron que la aparición de precipitado durante el almacenamiento en refrigeración responde a un fenómeno de cristalización del dihidrogenofosfato de sodio en la forma dihidratada, por lo que se incorporan moléculas de agua (disolvente) en la estructura cristalina y acelera la aparición del precipitado, ya que se consume parte del disolvente disponible para formar el sólido, por lo que la disolución se satura rápidamente y da lugar a la aparición del precipitado. Al llevar la muestra de nuevo a temperatura ambiente, se observa la redisolución aparentemente completa de los cristales, lo que se traduce en un restablecimiento de los parámetros basales de dispersión de la radiación y la recuperación de las propiedades físicas originales del preparado. Sin embargo, cuando las muestras se mantuvieron en nevera 35 días seguidos, se observa un aumento significativo de la turbidez, alcanzando valores entre 4-5 NTU. Es entonces cuando se decide mantener a T^a ambiente la M6 y realizar las medidas turbidimétricas a esa T^a , obteniéndose valores acordes (para t_{96} 2,77 NTU o para t_{105} 1,63 NTU) a la obtenida con la disolución recién preparada (t_0 2,58 NTU).

5. 2. Conductimetría

La conductimetría es una técnica analítica que permite determinar la conductividad eléctrica, κ (mS/cm), de las especies iónicas presentes en la muestra y relacionarla con la concentración de estas. La conductividad eléctrica es una propiedad que mide la facilidad con que las especies cargadas migran bajo la acción de un campo eléctrico²⁷. Para el caso de un conductor iónico, son los cationes y los aniones de la disolución los que intervienen en el transporte de la corriente y, por lo tanto, el valor de la conductividad eléctrica dependerá del número de estos iones presentes. Para la medida de la conductividad es común el uso de electrodos de platino. Las medidas se llevaron a cabo con un conductímetro Crison® CM 35, previa calibración con disolución

nes de cloruro potásico (KCl) de concentración y conductividad eléctrica conocidas: 0,1 mM de 147 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 1 mM de 1.413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 100 mM de 12,88 mS/cm.

La **Figura 4** recoge los resultados más relevantes del estudio. Como se puede observar (**Figura 4.A**), todas las muestras presentaron una conductividad eléctrica entre 39,2 y 39,7 mS/cm en el día 0 y estos valores se mantuvieron durante los 112 días de estudio (**Figura 4.B**), proporcionando un valor global medio (considerando todas las medidas de conductividad de todas las muestras y sus réplicas) de $(39,3 \pm 0,2)$ mS/cm con una precisión (RSD, de las siglas en inglés *Relative Standard Deviation*) excepcional de 0,5%. Los gráficos de control de Shewhart (**Figura 4.C**) para las muestras M0 (control) y M4 a M7 (componentes disueltos por separado) corroboran que la conductividad de todas las muestras se mantuvo constante a lo largo del periodo en estudio, encontrándose en todo momento dentro del intervalo de aceptación preestablecidos durante las 16 semanas de estudio (no se superan las líneas de aviso o líneas amarillas de las **Figuras 4.C-M0** y **C-M4 a C-M7**).

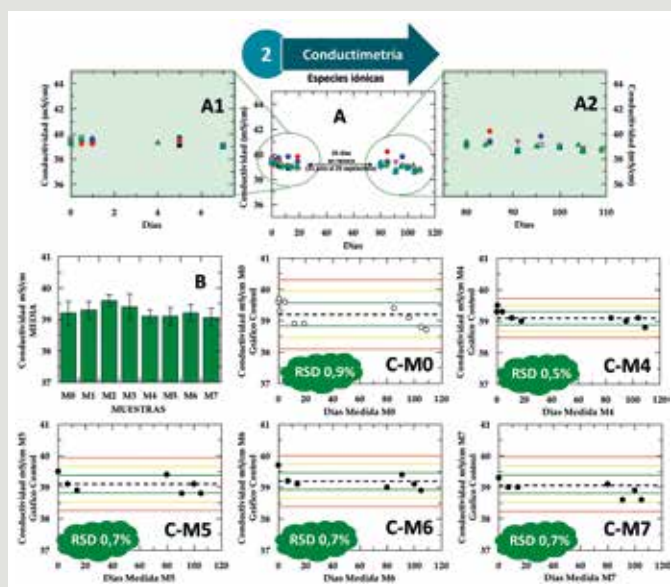


Figura 4. A- Valores de la conductividad eléctrica de las muestras M0 a M7 durante el periodo establecido para el estudio de la estabilidad de la formulación oral de fosfatos FMC con conservante (se incluye el detalle al inicio, A1, y al final, A2, del estudio). **B-** Gráfico de barras de la medida de la conductividad eléctrica media durante los 112 días de estudio para cada una de las ocho muestras (M0 a M7). **C-** Gráficos de control de Shewhart para las medidas de conductividad de la muestra control (C-M0, sin conservante) y para las cuatro muestras (C-M4 a C-M7) elaboradas con la metodología C (disueltos por separado, mezclar y enrasar al volumen final), con indicación de la desviación estándar relativa, RSD (%) (de las siglas en inglés *Relative Standard Deviation*) que da información referente a la precisión de la medida.

5. 3. Potenciometría

El pH de una disolución acuosa constituye un parámetro clave en los medicamentos formulados como líquidos cuyo principio activo presenta propiedades ácido-base. Su influencia sobre la solubilidad puede determinar de forma decisiva la estabilidad del fármaco. Además, un pH inadecuado puede afectar a la tolerancia de la forma farmacéutica y comprometer la actividad del principio activo.

La potenciometría es una técnica electroanalítica que permite determinar la concentración de protones de una disolución, empleando un electrodo de referencia Ag/AgCl/KCl 3M (de potencial conocido y constante con el tiempo) y un electrodo selectivo de iones H^+ o indicador de membrana de vidrio, sensible a la actividad de los protones presentes en la muestra. Sumergiendo ambos electrodos en la disolución se obtiene una lectura directa del pH a una temperatura dada o del potencial determinado por la concentración de protones en la muestra que sigue la ecuación de Nernst: $E = E^0 - 0,059/n \log[\text{H}^+]$ ²⁷. Las medidas se llevaron a cabo con un pHmetro, modelo 774 Metrohm®. Para la calibración se emplearon disoluciones tampón de hidrogenoftalato potásico/ftalato potásico e hidrogenofosfato potásico/fosfato potásico de valores de pH de 4 y 7, respectivamente.

Como en el caso de la conductividad eléctrica, los valores de pH de todas las muestras se mantuvieron constantes durante todo el periodo de estudio, tal y como se muestra en la **Figura 5.A**. El valor medio de pH obtenido el día 0 (t_0) para todas las muestras (M1 a M7) es de $\text{pH} = (4,244 \pm 0,005)$, con una excelente precisión (RSD) del 0,1%. Se puede observar que el valor de pH de M0 (control) es inferior al resto de las muestras (**Figura 5.B**), como consecuencia de la ausencia del conservante en el control que es el causante de aumentar ligeramente el pH del medio en el resto de las muestras (M1 a M7), por ser un ácido más débil ($\text{pK}_a = 8,4$) que el dihidrogenofosfato ($\text{pK}_a2 = 7,2$), por tanto, su base conjugada más fuerte²⁶. Los diagramas de Shewhart confirman estos resultados, tanto para la muestra control M0 (**Figura 5.C-M0**) como para las muestras M4 a M7 (**Figura 5.C-M4 a Figura 5.C-M7**), donde todos los valores de cada medida están próximos al valor central (línea discontinua negra) y no superando las líneas de aviso (líneas amarillas). Los valores de precisión son también muy buenos, con valores de $\text{RSD}\% \leq 0,6$.

5. 4. Volumetría Ácido-Base por Retroceso con Detección Potenciométrica del Punto Final

Para confirmar estos resultados, se puso a punto el método de referencia, basado en una volumetría ácido-base por retroceso, siguiendo las especificaciones de la USP para la formula-

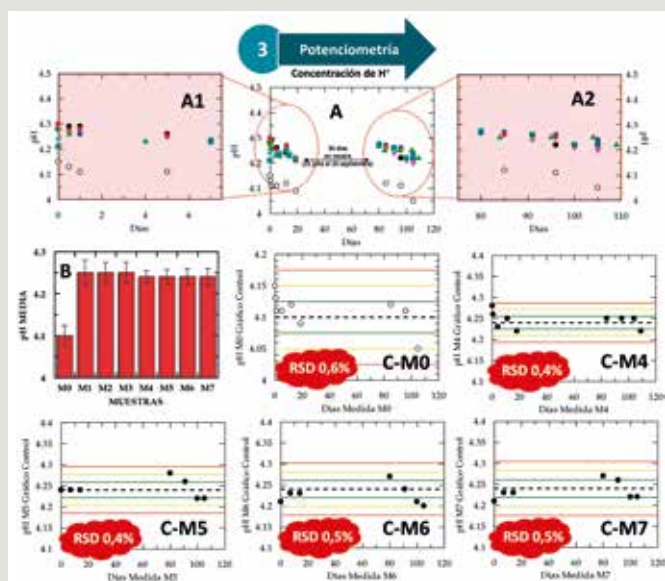


Figura 5. A- Valores de pH de las muestras M0 a M7 durante el periodo marcado para el estudio de la estabilidad de la **formulación oral de fosfatos FMC** con conservante (se incluye el detalle al inicio, A1, y al final, A2, del estudio). **B-** Gráfico de barras de la medida del pH medio durante los 112 días de estudio para cada una de las ocho muestras (M0 a M7). **C-** Gráficos de control de Shewhart para las medidas de pH de la muestra control (C-M0, sin conservante) y para las cuatro muestras (C-M4 a C-M7) elaboradas con la metodología C (disueltos por separado, mezclar y enrasar al volumen final), con indicación de la desviación estándar relativa (de las siglas en inglés *Relative Standard Deviation*) que da información referente a la precisión de la medida.

ción rectal de fosfatos¹⁴, adaptada para la **formulación oral de fosfatos FMC** (Figura 6). En el procedimiento se indica una dilución 1:100 de la muestra con el conservante (Figura 6.A), a la cual se le añade 15 mL de NaOH (en exceso) de concentración exactamente conocida (estandarizada previamente con un patrón primario, el hidrogenofalato de potasio, utilizando el indicador colorimétrico fenolftaleína para detectar el punto final de la valoración). Parte de los OH^- añadidos en exceso reaccionan con el principio activo, el H_2PO_4^- , dando lugar al PO_4^{3-} y quedando un resto de OH^- sin reaccionar (Figura 6.B). A continuación, se procede a la valoración de las bases presentes con un ácido fuerte, el HCl, el cual ha sido valorado potenciométricamente con la disolución estandarizada de NaOH con objeto de conocer exactamente su concentración. La valoración potenciométrica de las bases transcurre hasta el 1º punto de equivalencia a pH 9,2 (pH teórico de 9,8 marcado en Figura 1), donde se obtiene el HPO_4^{2-} , gastando un volumen de HCl V_A (mL), y hasta el 2º punto de equivalencia a pH 4,4 (pH teórico de 4,7 marcado en Figura 1), formándose el H_2PO_4^- y gastándose un V_B (mL) (Figura 6.B). Para obtener el volumen gastado en el blanco (V_C , mL), se procede de la

misma forma descrita, pero sin principio activo, valorándose la disolución de conservante diluido 1:100 (cuya concentración presente es despreciable, Tabla 2) y lo añadido de NaOH en exceso hasta pH 7,0 (Figura 6.C). La concentración de H_2PO_4^- se calcula con la expresión $M_{\text{H}_2\text{PO}_4^-} (\text{mol/L}) = (V_C - V_A) (\text{mL}) \times M_{\text{HCl}} (\text{mol/L}) / V^M (\text{mL})$, donde $V_M = 1 \text{ mL}$, que corresponde al volumen de muestra puesto para valorar. El porcentaje de recuperación (que expresa la exactitud) se calcula a partir de la expresión: $\text{REC} (\%) = (\text{Molaridad MX encontrada} / \text{Molaridad MX puesta o declarada}) \times 100$, donde MX es la concentración expresada en moles/L de la muestra valorada.

Para la puesta a punto del método se elaboró una nueva muestra, M8, siguiendo la metodología C, y se prepararon las disoluciones necesarias, hidrogenofalato de potasio como patrón primario, e hidróxido sódico y ácido clorhídrico que fueron estandarizadas, para llevar a cabo la valoración potenciométrica de las muestras. En la Tabla 2, se recogen las cantidades pesadas para la preparación de las muestras y las concentraciones que dieron lugar, así como las de las disoluciones que corresponden a los reactivos valorantes mencionados. La valoración potenciométrica por retroceso de la muestra M8 recién preparada (t_0) proporciona una concentración estimada de 0,9979 M en NaH_2PO_4 y, por tanto, una recuperación del 100,0 % (Tabla 2).

Al cabo de los 72 días (t_{72}), se vuelve a evaluar la M8 (mantenida a T^a ambiente en ese periodo de tiempo) y también la M6. Para esta última, habían transcurrido 232 días (t_{232}) desde su elaboración, manteniéndose los 152 últimos días a T^a ambiente. La medida del potencial vs pH que presentan las valoraciones de las dos muestras, M8 y M6, tienen una excelente correlación entre ambas magnitudes ($R^2 = 1,0000$) y siguen la ecuación de Nernst: $E = (406,3 \pm 0,3) - (57,49 \pm 0,03) \text{ pH}$ para M8 y $E = (406,8 \pm 0,3) - (57,58 \pm 0,03) \text{ pH}$ para M6, donde el valor de las pendientes equivale al 97,1% y al 97,3% de la pendiente teórica (59,2 mV), respectivamente. Las curvas de valoración de ambas muestras se muestran en la Figura 6.D, donde se señalan los puntos de equivalencia que se alcanzan (puntos de inflexión o saltos de pH en las gráficas). Los volúmenes de reactivo valorante gastado con cada muestra son prácticamente idénticos: $V_A = 6,6 \text{ mL}$ y $V_B = 21,3 \text{ mL}$ para M8 y $V_A = 6,8 \text{ mL}$ y $V_B = 21,4 \text{ mL}$ para M6; el volumen V_C gastado en la valoración del NaOH en exceso añadido en presencia del nipagin diluido hasta pH 7,0 es de 19,3 mL. La concentración de NaH_2PO_4 encontrada es de 1,0659 M y 1,0450 M para M8 y M6, respectivamente. Los resultados corroboran que ambas muestras son estables durante el periodo en estudio, superando los 14 días que estipula la normativa, obteniéndose una recuperación del 106,8% y 104,1% para M8 y M6, respectiva-

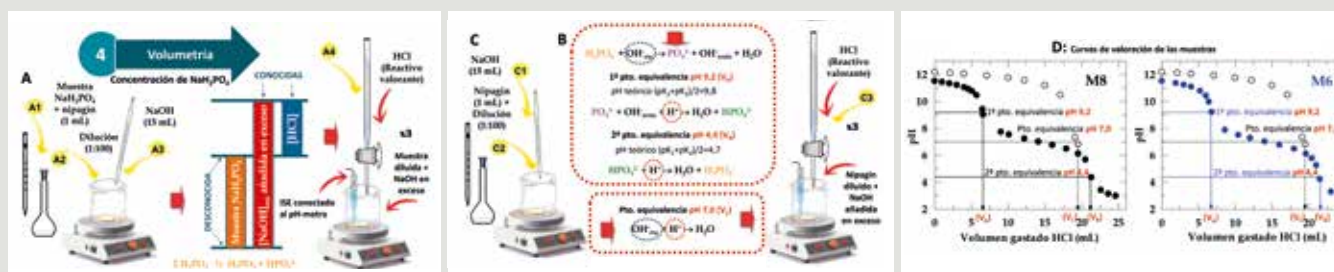


Figura 6. Descripción del método volumétrico ácido-base por retroceso con detección del punto final por potenciometría, utilizando un electrodo de membrana de vidrio (ISE), para la valoración de la **formulación oral de fosfatos FMC** con el conservante nipagin. **A-** Procedimiento para la valoración de la muestra que contiene el conservante nipagin. **B-** Reacciones que tienen lugar hasta alcanzar los sucesivos puntos de equivalencia, indicados también en la **Figura 1**, para obtener los volúmenes V_A y V_B . **C-** Procedimiento para la valoración del NaOH en exceso añadido a la disolución sin principio activo, pero con conservante, para obtener el volumen V_C . **D-** Curvas de valoración representativas de dos muestras: M8 (72 días a T° ambiente) y M6 (232 días, 152 días últimos a T° ambiente).

mente (**Tabla 2**), donde la concentración de principio activo se mantiene con valores aceptables ($\pm 10\%$) con respecto a la cantidad puesta o declarada a t_0 ⁷.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de esta fase preliminar han sido muy prometedores, obtenidos por técnicas analíticas rápidas, sencillas y precisas –como la potenciometría y/o la conductimetría– y confirmados por el método volumétrico oficial de la USP. Con todo ello, estos estudios preliminares pueden establecer los fundamentos técnicos necesarios para proceder con un estudio integral de estabilidad fisicoquímica de la **fórmula magistral oral de fosfatos rediseñada**, que se completará con un estudio de estabilidad microbiológica, así como con el seguimiento y análisis del principio activo por cromatografía iónica. Al validar esta **reformulación oral de fosfatos optimizada**, como alternativa a la “**Solución oral de Joulie**”, será posible asignar un periodo de validez extendido con el debido respaldo científico. Todo ello repercutirá, de forma indudable, en una mejora sustancial de la calidad de vida de los pacientes que requieran la administración de dicha formulación, además de asegurar una manipulación más segura durante su preparación.

Las alianzas en la investigación, uniando ámbitos tan próximos y en ocasiones tan alejados como el hospitalario y el universitario, son gratificantes y fructíferas tanto para la comunidad científica como para los propios pacientes, que en esencia son la inspiración para contribuir al conocimiento, buscando siempre en este camino la calidad, la eficacia y la sostenibilidad del sistema sanitario.

TABLA 2				
Muestras y reactivos necesarios para el análisis cuantitativo volumétrico por retroceso con indicación de las cantidades y de las concentraciones obtenidas de las disoluciones preparadas. Resultados del análisis de las muestras de la formulación oral de fosfatos FMC , preparadas siguiendo la metodología C, transcurridos diferentes tiempos desde su preparación.				
Formulación oral de fosfatos (FMC)	M8	M8	M6	M6
Cantidades	Concentración (M)	Cantidades	Concentración (M)	
Principio Activo (NaH ₂ PO ₄ x 2H ₂ O) (puesto)	7,7817 g/50 mL	0,99778	7,8320 g/50 mL	1,0042
Conservante (nipagin)	0,0572 g/50 mL	6,6 10 ⁻³	0,0570 g/50 mL	6,5 10 ⁻³
Reactivos para la valoración	Volumetría a t_0	Volumetría a t_0	Volumetría a t_{12}	Volumetría a t_{12}
	Cantidades	Concentración (M)	Cantidades	Concentración (M)
*KHF (hidrógenofosfato de potasio)	2,0431 g/100 mL	0,10004	2,0669	0,1012
NaOH	≈ 21,3/1L	0,1079	≈ 21,8/1L	0,1088
**HCl (37 %)	≈ 6,5 mL/L	0,0788	≈ 7,0 mL/L	0,0836
***Fenolftaleína	0,1 g/100 mL	0,1%	0,1 g/100 mL	0,1%
Volumetría por retroceso	M8	M8	M6	M6
	Recuperación (%)	Concentración (M)	Recuperación (%)	Concentración (M)
Principio Activo (NaH ₂ PO ₄ x 2H ₂ O) (encontrado)	100,0 (t_0)	0,9979	104,1 (t_{12})	1,0450
	106,8 (t_{12})	1,0659		

*Patrón primario, secado en estufa a 105 °C durante 12 h, para estandarizar el NaOH.

**Indicador potenciométrico de pto. final en su valoración con NaOH estandarizada.

***Indicador colorimétrico de pto. final en la estandarización del NaOH. Intervalo de viraje: 8,2 [incoloro] < pH > 10,0 [fucsia].

Nota: la disolución de nipagin solo (blanco) contiene 0,0574 g/50 mL (6,6 10⁻³ M)

AGRADECIMIENTOS

Las autoras hacen un agradecimiento personal a las personas que ayudaron, desinteresadamente, durante el desarrollo de este trabajo: Carmela Dávila-Pousa, Vicente Merino-Bohórquez y Pepe Lamas.

REFERENCIAS

- Real Decreto Legislativo 1/2015, de 24 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de garantías y uso racional de los medicamentos y productos sanitarios. BOE-A-2015-8343: Boletín Oficial del Estado. 25 de julio de 2015-8343. <https://www.boe.es/eli/es/rdlg/2015/07/24/1/con>.
- Real Decreto 175/2001, de 23 de febrero, por el que se aprueban las normas de correcta elaboración y control de calidad de fórmulas magistrales y preparados oficinales. BOE-A-2001-5185: Boletín Oficial del Estado. 16 de marzo de 2001-5185. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2001/02/23/175/con>.
- Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea. Reglamento (CE) nº 141/2000, de 16 de diciembre de 1999, sobre medicamentos huérfanos. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 18/1 (22 de enero de 2000). <http://data.europa.eu/eli/reg/2000/141/oj> (Versión consolidada 26/07/2019).
- Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea. Reglamento (CE) nº 1901/2006, de 12 de diciembre de 2006, sobre medicamentos para uso pediátrico. Diario Oficial de la Unión Europea, L 378/1 (27 de diciembre de 2006). <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/1901/2019-01-28>.
- Ministerio de Sanidad, 2024. Gobierno de España. Madrid. Guía de buenas prácticas de preparación de medicamentos en servicios de farmacia hospitalaria. Disponible en: <https://www.sanidad.gob.es/areas/farmacia/publicaciones/GuiaBPMedicamentosServFarmHosp/Docs/04GuiaMedicamentos2024Accesible.pdf>. (Consultado febrero 2026).
- United States Pharmacopeia Convention (2017). Chapter 1191, *Stability Considerations in Dispensing Practice*. 40th ed. Rockville (MD): United States Pharmacopeial Convention. DOI: https://doi.org/10.31003/USPNF_M99910_03_01.
- United States Pharmacopeial Convention (2017). Chapter 1225, *Validation of Compendial Procedures*. En: United States Pharmacopeia and National Formulary (USP 40-NF 35). Rockville (MD): USP Convention; 2017. DOI: https://doi.org/10.31003/USPNF_M99945_04_01.
- Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS). (2015). Real Farmacopea Española (5ª ed.). Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. https://www.aemps.gob.es/informa/notasinformativas/laaemps/2015/ni-aemps_1-2015-rfe-fn/. https://www.aemps.gob.es/formulario-nacional/monografias/materias-primas/excipientes/fn_2017_ex_028.pdf. Orden SSI/23/2015, de 15 de enero, por la que se aprueba la quinta edición de la Real Farmacopea Española y la segunda edición del Formulario Nacional. (BOE núm.18 de 21 de enero de 2015), http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-467, <https://www.boe.es/eli/es/o/2015/01/15/ssi23>.
- European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare. (2025). *European Pharmacopoeia* (12.ª ed. [Issues 12.1]). Council of Europe. Disponible en: <https://www.edqm.eu/en/european-pharmacopoeia-new-online-only-12th-edition#{%22202840%22:3}> (Consultado mayo 2026).
- GERPAC. (2013). *Practical stability studies of anticancer drugs: Guidelines* (Version 1). Disponible en: www.gerpac.eu (Consultado febrero 2026).
- International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Registration of Pharmaceuticals for Human Use. *Quality guidelines*. Disponible en: www.ich.org (Consultado febrero 2026).
- Sociedad Española de Farmacia Hospitalaria (SEFH). (2023) Manual de farmacotecnia. Disponible: https://www.sefh.es/bibliotecavirtual/manual_farmacotecnia/manualFARMACOTECNIAFINAL_.pdf?ts=20230531131600 (Consultado febrero 2026).
- Sociedad Española de Farmacia Hospitalaria: Grupo de Trabajo de Farmacotecnia. Fosfato 1 mmol/ml solución oral: Solución de Joulie. Disponible en: https://gruposdetrabajo.sefh.es/farmacotecnia/images/stories/PN_Formulas/F/FOSFATO_1mmol_ml_SOL_HIP.pdf [Consultado febrero 2026].
- United States Pharmacopeia (2017). USP Monographs: USP-NF *Sodium Phosphates Rectal Solution* para el análisis de fosfato en medicamentos, 2024. Disponible en: http://www.pharmacopeia.cn/v29240/usp29nf24s0_m77102.html (Consultado mayo 2026) DOI: https://doi.org/10.31003/USPNF_M77102_01_01
- METROHM Application Note AN-S-398: Fosfato en inyecciones compuestas de fosfatos de sodio y potasio. Validaciones del método de ensayo IC realizadas según la USP. Disponible en: https://www.metrohm.com/es_es/applications/application-notes/aa-s-001-100/an-s-398.html (Consultado mayo 2026).
- United States Pharmacopeia (2021). USP Monographs: USP-NF *Sodium Phosphates Compounded Injection Method* para el análisis de fosfato en medicamentos, 2025. Disponible en: <https://dailymed.nlm.nih.gov/dailymed/search.cfm?labeltype=all&query=PHOSPHATES> (Consultado mayo 2026). DOI: https://doi.org/10.31003/USPNF_M10964_06_01.
- Agencia Española del Medicamento y Productos Sanitarios (AEMPS) <http://www.aemps.gob.es/>. https://cima.aemps.es/cima/dochtml/p/81120/P_81120.html (Consultado mayo 2026).
- Farmacéuticos del Consejo General de Colegios Farmacéuticos de España <https://www.farmaceticos.com/botplus/buscador-botplus-lite/medicamentos/fosfato-nm-356-g-20-sobres-polvo-para-solucion-oral/> (Consultado mayo 2026).
- Kapalavavi, B.; Ankney, J.; Baucom, M.; Yang, Y. (2014). *Solubility of parabens in subcritical water*. Journal of Chemical & Engineering Data, 59(3): 912-916. DOI: <https://doi.org/10.1021/je4010883>.
- Real Decreto-ley 16/2012, de 20 de abril, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad del Sistema Nacional de Salud y mejorar la calidad y seguridad de sus prestaciones. Boletín Oficial del Estado. 2012; 98:31278-31312. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2012/04/20/16/con>.
- Burriel Martí, F.; Lucena Conde, F.; Arribas Jimeno, S., y Hernández Méndez, J. (2002). *Química Analítica Cualitativa*. 18 ed., Paraninfo. ISBN: 978-84-9732-140-2.
- Kahlert, H., y Scholz, F. (2013). *Acid-Base Diagrams*. Springer. ISBN: 978-36-423-790-17.
- Belarra Piedrafita, M. Á. (2008). *Cálculos rápidos para los equilibrios químicos en disolución*. Prensas de la Universidad de Zaragoza. ISBN: 978-84-7733-581-8.
- National Library of Medicine (NIH, National Institute of Health), National Center for biotechnology Information, PubChem, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Monosodium-phosphate#section=Computed-Properties>. (Consultado junio 2026).
- Fisher scientific, Dihidrógenofosfato de sodio dihidrato, 99 %, Thermo Scientific Chemicals Company. Disponible en: <https://www.fishersci.es/shop/products/sodium-dihydrogen-phosphate-dihydrate-98-thermo-scientific/11461880>. (Consultado mayo 2026).
- HC-T IndustroChem Anhui Huacheng Chemical, *Metilparabeno* CAS 99-76-3. Artículo disponible en: <https://industrochem.com/es/metilparabeno-mp-cas-99-76-3/> (Consultado mayo 2026).
- Skoog, D. A.; Holler, F. J., y Nieman, T. A. (2001). Principios de Análisis Instrumental, McGraw-Hill Interamericana. ISBN 978-84-481-2775-6.

ARCHIVOS SEDIMENTARIOS BAJO EL OCÉANO: RECONSTRUYENDO EL CLIMA DEL PASADO EN GALICIA

Ángel Enrique López-Pérez, Belén Rubio y Daniel Rey

Centro de Investigación Mariña. Universidade de Vigo. Grupo de Geología Marina y Ambiental (GEOMA). 36310 Vigo. Spain.

Palabras clave: *sedimentos, sedimentación marina, paleoclima, Cuaternario, margen continental de Galicia.*

RESUMEN

Los sedimentos marinos constituyen uno de los principales archivos naturales para reconstruir la evolución climática de la Tierra. Estos materiales registran cambios en las condiciones ambientales, la circulación oceánica, la productividad biológica y los aportes sedimentarios, preservando una importante información sobre la historia del planeta. En particular, los sedimentos acumulados en los márgenes continentales del Atlántico Norte permiten identificar episodios climáticos ocurridos durante el Cuaternario, así como evaluar la respuesta de los sistemas sedimentarios oceánicos a las oscilaciones entre periodos glaciares e interglaciares.

En este estudio se muestran como ejemplo tres testigos sedimentarios del margen continental de Galicia, lo que ha permitido obtener una detallada resolución paleoclimática de los últimos ~170.000 años, abarcando el Pleistoceno Superior y el Holoceno. Esta alta resolución temporal ha hecho posible reconstruir con precisión la evolución de los ambientes sedimentarios y su relación con los cambios climáticos.

Se demuestra así cómo se puede leer la historia del clima del pasado en los sedimentos marinos del margen continental de Galicia. Gracias a la utilización de técnicas sedimentológicas y geoquímicas, es posible identificar variaciones en la dinámica sedimentaria, episodios sedimentarios asociados con la última glaciación, y cambios en la productividad marina. Estos registros muestran que la interacción entre clima, océano y sedimentación ha desempeñado un papel fundamental

en la configuración de los fondos marinos durante los últimos cientos de miles de años.

Por lo tanto, la investigación paleoclimática basada en sedimentos oceánicos no solo permite comprender mejor la evolución ambiental del pasado, sino que además proporciona información esencial para interpretar la respuesta del sistema climático ante perturbaciones naturales y contribuir a la evaluación de los escenarios de cambio climático futuro.

1. INTRODUCCIÓN

Los océanos cubren más del 70% de la superficie de la Tierra y constituyen uno de los componentes fundamentales del sistema climático global. Sin embargo, gran parte de los fondos oceánicos permanecen todavía poco explorados, especialmente en las regiones más profundas. Por lo tanto, los océanos desempeñan un papel fundamental en la regulación del sistema climático terrestre mediante el intercambio de calor, carbono y otros elementos biogeoquímicos con la atmósfera. Además de actuar como uno de los principales reservorios de carbono del planeta, los océanos constituyen un archivo excepcional para el estudio de la evolución climática y ambiental de la Tierra. En particular, los sedimentos acumulados en los fondos marinos preservan un registro continuo de los procesos geológicos, muy útiles para reconstruir los cambios climáticos ocurridos durante el periodo Cuaternario (unos 2,6 millones de años). Así, los archivos sedimentarios proporcionan información que abarca escalas temporales de miles a cientos de miles de años, lo que los convierte en una herramienta fundamental para el estudio de la variabilidad climática.

Entre los diferentes periodos de la historia reciente de la Tierra, el Cuaternario Superior presenta un interés particular debido a la alternancia de ciclos glaciares e interglaciares, así como a la ocurrencia de numerosos eventos climáticos abruptos que afectaron de manera significativa a la circulación oceánica y a los sistemas sedimentarios. En el Atlántico Norte, estas perturbaciones quedaron registradas en los sedimentos marinos mediante cambios en la composición sedimentaria, la acumulación de material detrítico transportado por icebergs o cambios en la productividad marina.

El margen continental de Galicia constituye una de las regiones más sensibles para el estudio de estos procesos debido a su posición estratégica dentro de la circulación oceánica del Atlántico Norte. En particular, este margen registra la influencia de diferentes masas de agua que participan en la redistribución global de calor y propiedades fisicoquímicas, lo que la convierte en un observatorio natural privilegiado para investigar la interacción entre clima, océano y sedimentación durante el Cuaternario.

En este contexto, el estudio de los sedimentos marinos proporciona una perspectiva única para comprender cómo han respondido los océanos a cambios climáticos ocurridos en el pasado geológico. Este conocimiento resulta especialmente relevante en el actual escenario de cambio climático antropogénico, ya que permite contextualizar las transformaciones observadas en la actualidad dentro de la variabilidad natural del sistema climático y mejorar nuestra capacidad para interpretar su evolución futura.

2. LA FISIOGRAFÍA DEL MARGEN CONTINENTAL DE GALICIA

El margen continental oeste de Galicia se localiza en el sector noroccidental de la Península Ibérica, entre el cabo Fisterra y la costa norte de Portugal, formando parte del margen ibérico occidental (Fig. 1) (Murillas *et al.*, 1990; Vázquez *et al.*, 2008). Se trata de un margen continental pasivo originado durante la apertura del océano Atlántico Norte y posteriormente modificado por episodios compresivos cenozoicos, lo que ha dado lugar a una compleja configuración geomorfológica y estructural (Boillot *et al.*, 1979; Tucholke *et al.*, 2007; Vázquez *et al.*, 2008).

De forma general, se distinguen varios dominios que se disponen desde la plataforma continental hacia las cuencas abisales: un dominio proximal que incluye la plataforma y la Cuenca

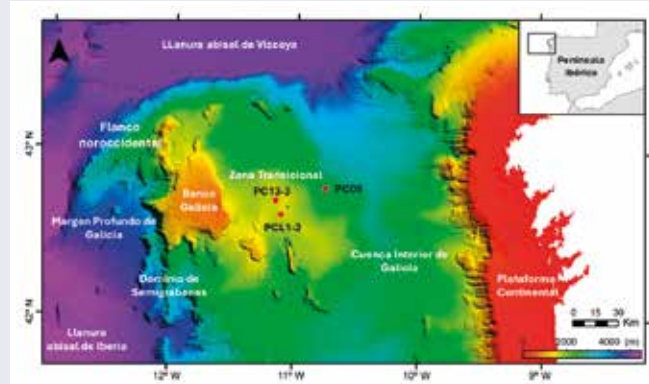


Fig. 1. Mapa batimétrico del margen continental gallego (noroste de la península ibérica) con la localización de los testigos PC13-3, PCL1-2 y PC06, así como la distribución de las principales provincias morfoestructurales: Plataforma continental, Cuenca Interior de Galicia, Zona Transicional, Banco de Galicia, Flanco noroccidental, Margen Profundo de Galicia, Dominio de Semigrábenes y las llanuras abisales de Iberia y de Vizcaya. Figura modificada de López-Pérez *et al.*, (2021a).

Interior de Galicia, caracterizado por una mayor influencia de aportes continentales; un dominio intermedio correspondiente a la Zona Transicional y al Banco Galicia, un alto estructural destacado que condiciona la circulación de masas de agua profundas y la dinámica sedimentaria; y un dominio distal o profundo, integrado por el Flanco Noroccidental, el Margen Profundo de Galicia y el Dominio de Semigrábenes, que conecta progresivamente el margen con las llanuras abisales del Atlántico (Fig. 1) (Vázquez *et al.*, 2008; Ercilla *et al.*, 2011; Druet, 2015; Somoza *et al.*, 2019; López-Pérez *et al.*, 2021b).

En conjunto, estas provincias reflejan una evolución controlada por la extensión mesozoica asociada a la apertura del Atlántico y la posterior deformación compresiva cenozoica, así como por la interacción con la circulación oceánica profunda, que controla en gran medida los procesos de erosión, transporte y acumulación sedimentaria en el margen continental (Boillot *et al.*, 1979; Vázquez *et al.*, 2008).

3. LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DURANTE EL CUATERNARIO SUPERIOR

El Cuaternario (últimos 2,6 millones de años) está marcado por una sucesión de ciclos glaciares e interglaciares que reflejan la sensibilidad del sistema climático terrestre a cambios en la órbita terrestre y a retroalimentaciones internas. A escala de decenas a cientos de miles de años, estos cambios están controlados por los denominados ciclos de Milankovitch, que

modulan la distribución de la radiación solar incidente mediante variaciones en la excentricidad, oblicuidad y precesión de la órbita terrestre (Milankovitch, 1941; Hays *et al.*, 1976; Berger and Loutre, 2007). Estas oscilaciones condicionan la acumulación y fusión de hielo continental, el nivel del mar y la reorganización de las masas de agua oceánicas, generando una fuerte señal en los registros sedimentarios marinos. La alternancia entre periodos fríos y cálidos queda registrada en los sedimentos y en los caparazones de microorganismos marinos en función de las variaciones de los isótopos de oxígeno ($\delta^{18}O$), denominados Estadios Isotópicos Marinos (Marine Isotope Stages o MIS) (Fig. 2).

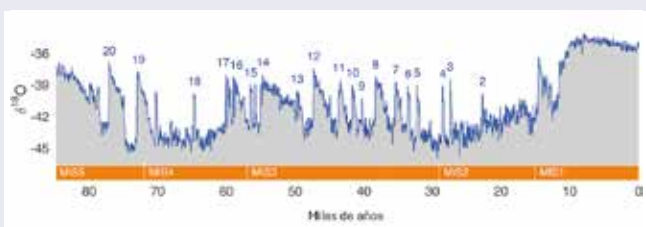


Fig. 2. Gráfica que muestra los eventos Dansgaard-Oeschger numerados del 1 al 20 en un registro isotópico del oxígeno de un testigo de hielo de Groenlandia del *North Greenland Ice Sheet Project* (NGRIP) durante los últimos 80 ka. Los picos representan condiciones más cálidas que los valles. La barra horizontal naranja indica los últimos cinco estadios isotópicos marinos (MIS) (modificado de Li and Born, 2019).

Sin embargo, el registro paleoclimático del Atlántico Norte evidencia que la variabilidad climática no se limita a estos ciclos orbitales de gran escala. Aunque los MIS describen las grandes transiciones entre estados glaciares e interglaciares, los registros de alta resolución muestran que dentro de cada estadio se produjeron numerosas fluctuaciones climáticas de menor duración y gran intensidad. Superpuestos a ellos aparecen así cambios abruptos y de alta frecuencia, que reflejan una dinámica interna no lineal del sistema océano-criosfera-atmósfera, denominados Ciclos de Dansgaard-Oeschger en honor a sus descubridores (Dansgaard *et al.*, 1993). Este comportamiento se expresa principalmente durante el Pleistoceno Superior, cuando el sistema climático entra en un régimen caracterizado por transiciones rápidas entre estados fríos y cálidos (Fig. 2).

3. 1. Los Ciclos de Dansgaard-Oeschger: inestabilidad climática de alta frecuencia

Los ciclos de Dansgaard-Oeschger (D/O) representan uno de los modos más característicos de variabilidad climática abrupta del Último Ciclo Glacial (Fig. 2). Identificados inicialmente en registros isotópicos de testigos de hielo de Groenlandia,

estos eventos muestran oscilaciones recurrentes entre fases cálidas (*Greenland Interstadials*, GI) y fases frías (*Greenland Stadials*, GS), con periodicidades medias de 1.000 a 3.000 años (Dansgaard *et al.*, 1993; Voelker, 2002; Rasmussen *et al.*, 2014).

Los calentamientos ocurren de forma extremadamente rápida (en décadas o incluso menos), mientras que los enfriamientos son progresivos y prolongados. Esta dinámica sugiere la existencia de umbrales críticos en el sistema climático, más que una respuesta lineal a forzamientos externos. La explicación más aceptada relaciona estos ciclos con reorganizaciones abruptas de la Circulación Meridional de Retorno del Atlántico (AMOC de sus siglas en inglés), moduladas por aportes de agua dulce procedentes de deshielo y cambios en la extensión del hielo marino (Broecker *et al.*, 1990; Li and Born, 2019). Cuando la AMOC se debilita, el transporte de calor hacia altas latitudes disminuye, provocando un enfriamiento del Atlántico Norte. En contraste, fases de fortalecimiento de esta circulación favorecen la entrada de calor hacia el norte y desencadenan episodios interestadiales cálidos. Este mecanismo explica la fuerte señal de los D/O en registros marinos y continentales del hemisferio norte.

3. 2. Los Eventos de Heinrich: respuestas extremas del sistema glaciar

Los eventos de Heinrich constituyen episodios singulares dentro del contexto de los ciclos estadales fríos. Se definen como descargas masivas y episódicas de icebergs procedentes de los márgenes de los grandes casquetes glaciares, especialmente el laurentino, hacia el Atlántico Norte (Heinrich, 1988; Hemming, 2004). Estas descargas provocan la liberación de grandes volúmenes de detritos transportados por el hielo (*ice-rafted debris*, IRD), que quedan registrados en los sedimentos marinos como capas enriquecidas en fragmentos detríticos de origen continental.

Estos horizontes, conocidos como capas de Heinrich, se reconocen por su composición sedimentaria distintiva y por anomalías geoquímicas y magnéticas asociadas, lo que permite su relativamente fácil identificación en registros marinos profundos. Lejos de ser el motor principal de los cambios climáticos, los eventos de Heinrich se interpretan como la respuesta final del sistema glaciar a condiciones de inestabilidad prolongada.

El mecanismo propuesto más ampliamente aceptado vincula estos eventos con el debilitamiento de la AMOC durante fases estadales. Cuando la circulación del Atlántico se debilita, el norte se enfría porque llega menos calor, mientras el sistema oceánico retiene más calor en zonas más cálidas del sur. Esta

combinación puede desestabilizar las plataformas de hielo, desencadenando su colapso parcial y la descarga masiva de icebergs hacia el océano (Marcott *et al.*, 2011; Barker *et al.*, 2015). El resultado es una retroalimentación positiva que refuerza las condiciones frías durante los estadales.

En conjunto, los ciclos de Dansgaard-Oeschger y los eventos de Heinrich reflejan dos niveles complementarios de la variabilidad climática del Cuaternario Superior: uno caracterizado por oscilaciones rápidas del sistema climático, y otro por respuestas extremas del sistema glaciar. Ambos procesos quedan ampliamente registrados en los sedimentos marinos del

Atlántico Norte, constituyendo herramientas fundamentales para reconstruir la evolución climática reciente de la Tierra.

4. OBTENCIÓN DE LOS TESTIGOS SEDIMENTARIOS

Los testigos sedimentarios analizados en este estudio fueron obtenidos mediante el uso de un sistema de *piston corer* (correr de pistón), una técnica empleada en sedimentología mari-

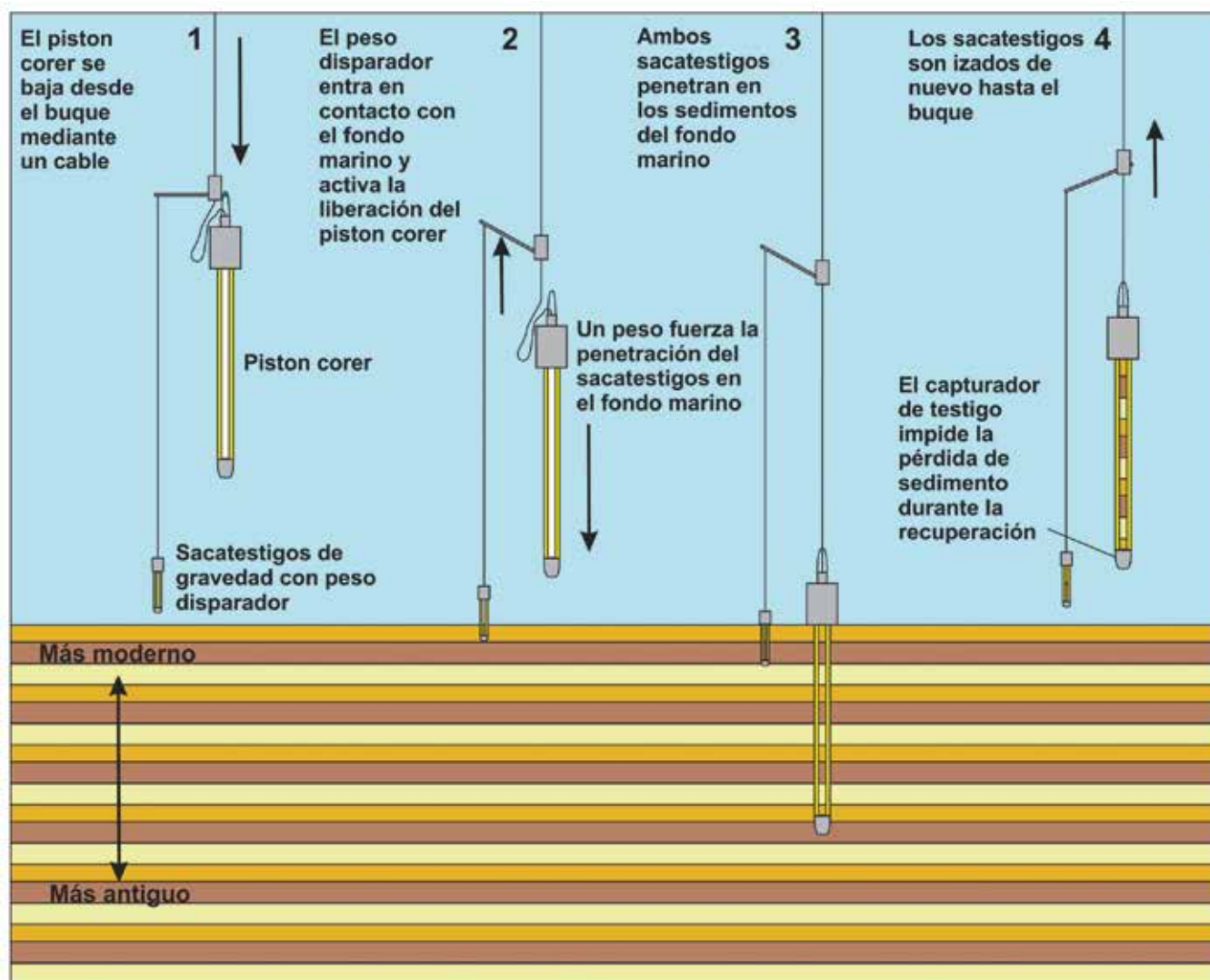


Fig. 3. Esquema de funcionamiento de un *piston corer*.

na para la recuperación de secuencias sedimentarias poco o moderadamente consolidadas en ambientes de mar profundo (Fig. 3). Este sistema permite minimizar la perturbación de la columna sedimentaria durante la extracción, garantizando una mayor integridad estratigráfica y una mejor preservación de las estructuras sedimentarias primarias, lo que resulta fundamental para estudios paleoclimáticos de alta resolución.

El dispositivo consiste en un tubo de muestreo que penetra en el sedimento impulsado por gravedad, mientras un pistón interno reduce la fricción y la compresión del material durante la recuperación (Fig. 3). De este modo, se obtienen registros continuos que pueden alcanzar varios metros de longitud, representativos de la sedimentación acumulada durante escalas temporales del Cuaternario Superior. Los testigos recuperados fueron posteriormente seccionados, descritos y preparados para su análisis multiparamétrico en laboratorio.

5. MUESTREO Y ANÁLISIS DE LOS TESTIGOS SEDIMENTARIOS

El estudio de los testigos sedimentarios recuperados del margen continental de Galicia se basa en un conjunto de análisis sedimentológicos y geoquímicos de alta resolución, diseñados para caracterizar la variabilidad vertical de los sedimentos y reconstruir la evolución paleoambiental. Entre las técnicas empleadas destacan el análisis no destructivo mediante escáner de fluorescencia de rayos X (*Itrax™ Core Scanner*) y la determinación de la distribución granulométrica mediante difracción láser. Estas metodologías permiten integrar información composicional y textural con elevada resolución espacial y temporal. Esto, junto con un modelo robusto de edad, permitió caracterizar la evolución paleoclimática y sedimentaria de los últimos 170.000 años.

5. 1. Análisis geoquímico mediante un *Itrax™ Core Scanner*

La composición química a lo largo de los testigos se obtuvo a muy alta resolución mediante el *Itrax™ Core Scanner*, un sistema no destructivo instalado en el Centro de Apoyo Científico-Tecnológico a la Investigación (CACTI) de la Universidad de Vigo (Fig. 4). Este equipo permite el análisis continuo de testigos sedimentarios, proporcionando simultáneamente datos de composición química (obtenidos mediante fluorescencia de rayos X - FRX), imágenes radiográficas, imágenes ópticas y datos de susceptibilidad magnética.

En este trabajo se obtuvieron 22 elementos químicos de forma

simultánea con una resolución espacial de 1 mm. El escaneo se realizó utilizando un tubo de rayos X de molibdeno (Mo), con un voltaje de 30 kV, una corriente de 55 mA y un tiempo de exposición de 20 segundos por medida. De todos los elementos obtenidos, se seleccionaron para su interpretación sedimentológica y paleoambiental el Fe, Ti, Ca, Si, Sr, y Ba debido a su relevancia en la identificación de cambios en la procedencia sedimentaria y productividad marina.

Los datos brutos de FRX se expresan como áreas de pico (*peak areas*, p.a.), equivalentes a cuentas por segundo (cps), y fueron posteriormente validados mediante el software Q-Spec 8.6.0. A pesar de que se trata de una técnica semicuantitativa, su elevada resolución espacial permite detectar con gran precisión cambios composicionales a lo largo de los testigos sedimentarios, constituyendo una herramienta fundamental para la identificación de variaciones paleoambientales.

También se obtuvo la susceptibilidad magnética cada centímetro. Este parámetro constituye un indicador de la concentración de minerales magnéticos, principalmente de origen detrítico, por lo que resulta especialmente útil para identificar variaciones en el aporte continental. En registros marinos, incrementos en la susceptibilidad magnética suelen asociarse a un mayor suministro de sedimentos terrígenos ricos en minerales ferromagnéticos, mientras que valores bajos reflejan una mayor contribución de sedimentos biogénicos.

5. 2. Análisis de distribución granulométrica

La distribución de tamaño de grano del sedimento constituye un parámetro fundamental en el análisis sedimentológico, ya que refleja directamente la energía del medio de transpor-



Fig. 4. Escáner de testigos sedimentarios *Itrax™* perteneciente a los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación (CACTI) de la Universidad de Vigo.

te y las condiciones deposicionales. En términos generales, la sedimentación ocurre cuando la energía del sistema no es suficiente para mantener en suspensión las partículas, de modo que el tamaño de grano preservado en el sedimento proporciona información clave sobre los procesos dinámicos que actuaron en el momento de la deposición.

En ambientes marinos profundos, el análisis granulométrico, combinado con indicadores geoquímicos, físicos y magnéticos, permite reconstruir fuentes de sedimento, mecanismos de transporte y variaciones en los patrones sedimentarios a lo largo del tiempo.

En este estudio, la distribución granulométrica se determinó a partir de muestras discretas tomadas con una resolución de 2 cm en el primer metro y medio de cada testigo, y cada 4 cm en el resto del registro. Las mediciones se realizaron mediante un analizador de difracción láser Coulter LS 13 320 (*Beckman Coulter Inc.*, Brea, California, EE.UU.), disponible en el CACTI de la Universidad de Vigo.

Este equipo permite analizar partículas en un rango de 0,04 a 2.000 μm , proporcionando la distribución de tamaños en términos de volumen diferencial (%) y parámetros estadísticos como media, mediana, moda, desviación típica, asimetría, curtosis y percentiles (d10, d50 y d90).

La información granulométrica obtenida, integrada con los datos geoquímicos y magnéticos, ha sido fundamental para la caracterización de las facies sedimentarias y la reconstrucción de la evolución sedimentaria del margen continental de Galicia.

4. 3. Construcción del modelo de edad

La reconstrucción cronológica de los sedimentos estudiados se basó en siete dataciones por radiocarbono (^{14}C) y en la comparación de los registros obtenidos con los de otros testigos marinos cercanos previamente estudiados. Estos registros de referencia cuentan con cronologías bien establecidas gracias a la combinación de dataciones por radiocarbono, análisis isotópicos del oxígeno y reconstrucciones de la temperatura superficial del océano. Además, todos los testigos fueron sincronizados mediante la comparación de sus registros de carbonato cálcico y de calcio obtenido por fluorescencia de rayos X (FRX), lo que permitió correlacionar con precisión los distintos archivos sedimentarios.

Las edades por radiocarbono se obtuvieron mediante espectrometría de masas con acelerador (AMS), una técnica de alta precisión aplicada a ejemplares seleccionados del foraminífero

planctónico *Globigerina bulloides*. Finalmente, se construyó un modelo de edad para cada testigo. Gracias a este procedimiento fue posible establecer una cronología robusta para reconstruir la evolución ambiental y climática registrada en los sedimentos del margen continental de Galicia durante el Cuaternario reciente.

6. EL REGISTRO DEL PALEOCLIMA EN LOS SEDIMENTOS DEL MARGEN CONTINENTAL DE GALICIA

En este margen pasivo, la sedimentación está dominada por la alternancia de tres grandes tipos de facies: pelágicas, hemipelágicas y detríticas (Fig. 5 y 6) (López-Pérez *et al.*, 2021a). Las facies pelágicas corresponden a sedimentos generados principalmente por la sedimentación de restos biogénicos en mar abierto, con escasa influencia continental. Las facies hemipelágicas resultan de la mezcla de componentes biogénicos marinos y material terrígeno fino transportado desde el continente. Por su parte, las facies detríticas están formadas mayoritariamente por sedimentos terrígenos aportados de forma episódica mediante procesos de alta energía o eventos excepcionales. Estas facies se distribuyen de forma cíclica a lo largo del registro, respondiendo a cambios climáticos.

Durante los periodos interglaciares, la sedimentación está dominada por facies pelágicas, caracterizadas por un alto contenido en carbonatos biogénicos, principalmente procedentes de foraminíferos y cocolitofóridos (Fig. 5 y 6). Estas facies presentan una textura más homogénea, menor aporte terrígeno y una mejor preservación de los componentes biogénicos, lo que indica condiciones de baja influencia continental y una mayor tasa de productividad marina.

En contraste, durante los periodos glaciares se desarrollan facies hemipelágicas, con un incremento notable del material siliciclástico fino (limos y arcillas) y una reducción relativa de los carbonatos (Fig. 5 y 6). Estas variaciones granulométricas reflejan un mayor aporte de partículas procedentes de la erosión continental, transportadas por suspensión y redistribuidas por corrientes de fondo y procesos de plataforma externa. A su vez la productividad marina disminuye.

De forma más puntual, el registro incluye facies detríticas (Fig. 5 y 6). Estas capas se caracterizan por un aumento brusco del tamaño de grano, un enriquecimiento en minerales pesados y la presencia de fragmentos terrígenos de origen exótico, como aluminosilicatos y óxidos de hierro y titanio.

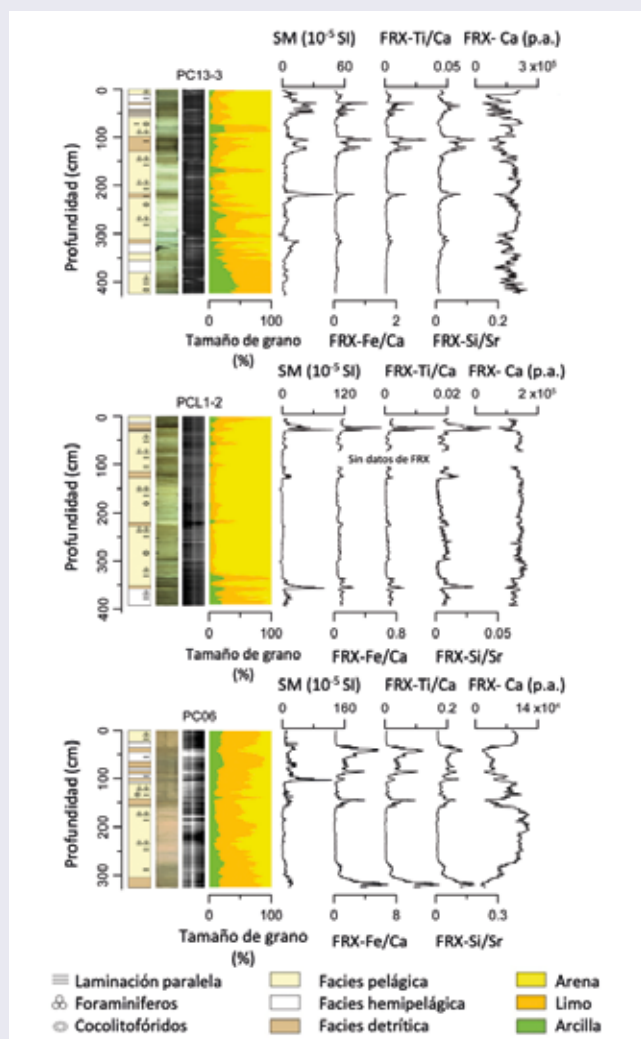


Fig. 5. Clasificación de facies obtenida en los testigos sedimentarios PC13-3, PCL1-2 y PC06. Representación en profundidad de la descripción de las facies, acompañada de imágenes ópticas y radiográficas, la distribución del tamaño de grano, la susceptibilidad magnética, las relaciones detríticas FRX Fe/Ca, Ti/Ca y Si/Sr y FRX-Ca.

Estas unidades corresponden a eventos de aporte masivo de sedimento relacionados con descargas de icebergs (*ice-rafted debris*) durante los eventos de Heinrich.

6. CONCLUSIONES

El presente estudio pone de manifiesto la relevancia de los sedimentos marinos del margen continental de Galicia como

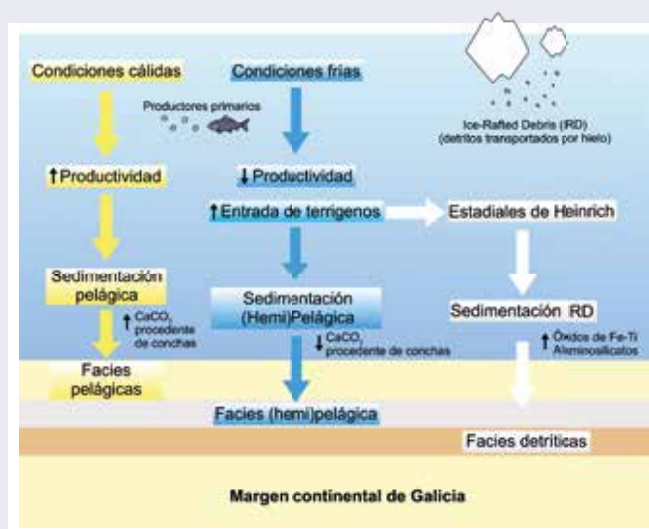


Fig. 6. Representación esquemática de los diferentes ambientes y procesos sedimentarios relacionados con condiciones glaciares e interglaciares en el margen continental de Galicia.

archivos naturales de alta resolución para la reconstrucción de la variabilidad paleoclimática durante el Cuaternario Superior. A partir del análisis integrado de tres testigos sedimentarios, se ha obtenido un registro continuo que abarca aproximadamente los últimos ~170.000 años, cubriendo el Pleistoceno Superior y el Holoceno, lo que ha permitido caracterizar con detalle la evolución sedimentológica y ambiental del margen.

La combinación de técnicas sedimentológicas y geoquímicas de alta resolución, en particular el escáner *Itrax*TM de fluorescencia de rayos X y el análisis granulométrico por difracción láser, ha demostrado ser una herramienta robusta para identificar cambios en la composición, textura y dinámica deposicional de los sedimentos. Estos indicadores han permitido discriminar con claridad entre facies pelágicas, hemipelágicas y detríticas, asociadas respectivamente a condiciones interglaciares más estables, fases glaciares de mayor aporte terrígeno y episodios puntuales de alta energía vinculados a eventos extremos.

Los resultados evidencian una fuerte relación entre la variabilidad climática del Atlántico Norte y la sedimentación en el margen gallego. En particular, la alternancia de ciclos glaciares e interglaciares, así como la expresión de eventos abruptos como los ciclos de Dansgaard-Oeschger y los eventos de Heinrich, quedan claramente registradas en las señales sedimentarias y geoquímicas de los testigos analizados. Estas oscilaciones se reflejan en cambios en la proporción de componentes biogénicos y terrígenos y en las firmas geoquímicas asociadas a productividad y procedencia del sedimento.

En conjunto, los resultados confirman que el margen continental de Galicia constituye un laboratorio natural privilegiado para el estudio de la interacción entre océano, clima y sedimentación en el Atlántico Norte. La alta resolución temporal obtenida en este trabajo permite no solo reconstruir con precisión la evolución paleoambiental del Último Ciclo Glacial, sino también aportar un marco de referencia esencial para comprender la respuesta del sistema climático ante perturbaciones naturales. Este conocimiento resulta clave para contextualizar la variabilidad climática actual dentro de los rangos naturales del sistema y mejorar las proyecciones de cambio climático futuro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado mediante el convenio Gran Burato 2010 y 2011 entre la Universidade de Vigo, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Xunta de Galicia, así como por los proyectos del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y del Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) CTM2007-61227/MAR, CGL2010-16688 y PID2019-109653RB-I00.

Los autores agradecen a los capitanes y a la tripulación del buque oceanográfico R/V Sarmiento de Gamboa, al personal técnico de la Unidad de Tecnología Marina (UTM) y a todos los participantes de las campañas oceanográficas GB4240 y GB2011 por su colaboración y apoyo.

A. E. López-Pérez disfrutó de un contrato predoctoral concedido por la Xunta de Galicia (Consellería de Cultura, Educación y Ordenación Universitaria), cofinanciado por el Fondo Social Europeo 2014-2020 (ED481A-2017/301).

REFERENCIAS

1. Barker, S.; Chen, J.; Gong, X.; Jonkers, L.; Knorr, G.; Thornalley, D. 2015. Icebergs not the trigger for North Atlantic cold events. *Nature* 520, 333-336. doi:10.1038/nature14330
2. Berger, A.; Loutre, M.-F., 2007. Milankovitch Theory and Paleoclimate. In: Elias, S. (Eds.), *Encyclopedia of Quaternary Science* London. Elsevier, pp. 1017-1022. doi:10.1016/B0-444-52747-8/00013-2
3. Boillot, G.; Dupeuble, P. A.; Malod, J. 1979. Subduction and tectonics on the continental margin off northern Spain. *Marine Geology* 32, 53-70. doi:10.1016/0025-3227(79)90146-4
4. Broecker, W.S.; Bond, G.; Klas, M.; Bonani, G.; Wolfli, W. 1990. A salt oscillator in the glacial Atlantic?: 1. The concept. *Paleoceanography* 5, 469-477. doi:https://doi.org/10.1029/PA005i004p00469
5. Dansgaard, W.; Johnsen, S. J.; Clausen, H. B.; Dahl-Jensen, D.; Gundestrup, N. S.; Hammer, C. U.; Hvidberg, C. S.; Steffensen, J. P.; Sveinbjörnsdóttir, A. E.; Jouzel, J.; Bond, G. 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218-220. doi:10.1038/364218a0.
6. Druet, M. 2015. Geodinámica del Margen Continental de Galicia: Estructura Profunda y Morfotectónica. PhD thesis. Madrid Complutense University.
7. Ercilla, G.; Casas, D.; Vázquez, J. T.; Iglesias, J.; Somoza, L.; Juan, C.; Medialdea, T.; León, R.; Estrada, F.; García-Gil, S.; Farran, Marcel. I.; Bohoyo, F.; García, M.; Maestro, A. 2011. Imaging the recent sediment dynamics of the Galicia Bank region (Atlantic, NW Iberian Peninsula). *Marine Geophysical Research* 32, 99-126. doi:10.1007/s11001-011-9129-x
8. Hays, J. D.; Imbrie, J.; Shackleton, N. J. 1976. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science* 194, 1121-1132. doi:10.1126/science.194.4270.1121
9. Heinrich, H. 1988. Origin and Consequences of Cyclic Ice Rafting in the Northeast Atlantic Ocean During the Past 130,000 Years. *Quaternary Research* 29, 142-152. doi:10.1016/0033-5894(88)90057-9
10. Hemming, S. R., 2004. Heinrich events: Massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Reviews of Geophysics* 42, RG1005. doi:10.1029/2003RG000128
11. Li, C.; Born, A. 2019. Coupled atmosphere-ice-ocean dynamics in Dansgaard-Oeschger events. *Quaternary Science Reviews* 203, 1-20. doi:10.1016/j.quascirev.2018.10.031
12. López-Pérez, A. E.; Rubio, B.; Rey, D.; Plaza-Morlote, M. 2021a. Late Quaternary sedimentary evolution of the distal Galician continental margin (north-west Iberian Peninsula) based on palaeoclimatic, palaeoproductivity and diagenetic evidence. *Sedimentology* sed.12914. doi:10.1111/sed.12914
13. López-Pérez, A. E.; Rubio, B.; Rey, D.; Plaza-Morlote, M.; Pinheiro, L. M. 2021b. Late Quaternary tectono-sedimentary processes on an isolated offshore high marginal platform (NW Iberian Continental Margin). *Marine Geology* 431, 106374. doi:https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106374
14. Marcott, S. A.; Clark, P. U.; Padman, L.; Klinkhammer, G. P.; Springer, S. R.; Liu, Z.; Otto-Bliesner, B. L.; Carlson, A. E.; Ungerer, A.; Padman, J.; He, F.; Cheng, J.; Schmittner, A. 2011. Ice-shelf collapse from subsurface warming as a trigger for Heinrich events. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, 13415-13419. doi:10.1073/pnas.1104772108
15. Milankovitch, M. 1941. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Royal Serbian Academy, Section of Mathematical and Natural Sciences, 33, Belgrade.
16. Murillas, J.; Mougnot, D.; Boulot, G.; Comas, M. C.; Banda, E.; Mauffret, A. 1990. Structure and evolution of the Galicia Interior Basin (Atlantic western Iberian continental margin). *Tectonophysics* 184, 297-319. doi:10.1016/0040-1951(90)90445-E
17. Rasmussen, S. O.; Bigler, M.; Blockley, S. P.; Blunier, T.; Buchardt, S. L.; Clausen, H. B.; Cvijanovic, I.; Dahl-Jensen, D.; Johnsen, S. J.; Fischer, H.; Gkinis, V.; Guillevic, M.; Hoek, W. Z.; Lowe, J. J.; Pedro, J. B.; Popp, T.; Seierstad, I. K.; Steffensen, J. P.; Svensson, A. M.; Vallenga, P.; Vinther, B. M.; Walker, M. J. C.; Wheatley, J. J.; Winstrup, M. 2014. A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews* 106, 14-28. doi:10.1016/j.quascirev.2014.09.007
18. Somoza, L.; Medialdea, T.; González, F. J.; León, R.; Palomino, D.; Rengel, J.; Fernández-Salas, L. M.; Vázquez, J. T. 2019. Morphostructure of the Galicia continental margin and adjacent deep ocean floor: From hyperextended rifted to convergent margin styles. *Marine Geology* 407, 299-315. doi:10.1016/j.margeo.2018.11.011
19. Tucholke, B. E.; Sawyer, D. S.; Sibuet, J.-C. 2007. Breakup of the Newfoundland-Iberia rift. *Geological Society, London, Special Publications* 282, 9-46. doi:10.1144/SP282.2
20. Vázquez, J. T.; Medialdea, T.; Ercilla, G.; Somoza, L.; Estrada, F.; Fernández Puga, M. C.; Gallart, J.; Gràcia, E.; Maestro, A.; Sayago, M. 2008. Cenozoic deformational structures on the Galicia Bank Region (NW Iberian continental margin). *Marine Geology* 249, 128-149. doi:10.1016/j.margeo.2007.09.014
21. Voelker, A. H. L. 2002. Global distribution of centennial-scale records for Marine Isotope Stage (MIS) 3: a database. *Quaternary Science Reviews* 21, 1185-1212. doi:10.1016/S0277-3791(01)00139-1

LA DIMENSIÓN OLVIDADA DE LA FORMACIÓN UNIVERSITARIA: BIENESTAR EMOCIONAL Y COMPETENCIAS RELACIONALES EN LOS FUTUROS PROFESIONALES DE LA SALUD

María José Ferreira Díaz, PhD

Escuela Universitaria de Enfermería de Lugo. Centro Adscrito a USC. Lugo. España.

RESUMEN

Introducción: La salud mental y el bienestar emocional de los jóvenes se han convertido en una preocupación creciente para las instituciones educativas y sanitarias. Al mismo tiempo, las profesiones de la salud requieren competencias relacionales complejas que trascienden la adquisición de conocimientos técnicos. Sin embargo, el desarrollo emocional continúa ocupando un espacio limitado dentro de muchos programas universitarios.

Objetivo: Analizar la relevancia del bienestar emocional y de las competencias relacionales en la formación universitaria de los futuros profesionales de la salud, integrando evidencia procedente de la literatura científica reciente.

Método: Revisión narrativa basada en literatura científica sobre salud mental juvenil, regulación emocional, inteligencia emocional, educación superior y competencias relacionales en Ciencias de la Salud. La revisión incorporó además evidencia procedente de investigaciones recientes desarrolladas en los ámbitos de la salud mental adolescente, la regulación emocional y el entrenamiento de competencias terapéuticas.

Resultados: La literatura revisada muestra una creciente preocupación por el bienestar emocional de los jóvenes que acceden a la universidad. La evidencia disponible indica que la regulación emocional puede desarrollarse mediante intervenciones educativas específicas y que las competencias relacionales pueden entrenarse a través de metodologías activas como la simulación clínica. Ambas dimensiones se asocian con una mejor preparación profesional y con una práctica asistencial más humanizada.

Conclusión: El bienestar emocional debe considerarse una competencia educativa esencial en la formación de los futu-

ros profesionales de la salud. Integrar estrategias dirigidas al desarrollo emocional y relacional puede contribuir a formar profesionales más resilientes, competentes y preparados para afrontar los desafíos humanos de la práctica asistencial contemporánea.

Palabras clave: *Bienestar emocional; Competencias relacionales; Educación universitaria; Estudiantes de Ciencias de la Salud; Regulación emocional; Salud mental.*

INTRODUCCIÓN

La salud mental y el bienestar emocional de los jóvenes se han convertido en una de las principales preocupaciones de las instituciones educativas, sanitarias y sociales durante las últimas décadas. Diversos organismos internacionales han alertado sobre el aumento de los problemas relacionados con la salud mental en adolescentes y jóvenes adultos, señalando la necesidad de desarrollar estrategias preventivas y de promoción del bienestar desde diferentes ámbitos de intervención, entre ellos la educación superior^{1,2}.

La transición hacia la universidad constituye una etapa especialmente relevante dentro del ciclo vital. Además de los cambios académicos inherentes al acceso a estudios superiores, los estudiantes deben afrontar procesos de adaptación personal, construcción de identidad, desarrollo de autonomía y establecimiento de nuevas relaciones sociales. Estos desafíos coinciden frecuentemente con un periodo de especial vulnerabilidad emocional, caracterizado por la aparición o consolidación de problemas relacionados con el

estrés, la ansiedad, la sobrecarga emocional o las dificultades de adaptación^{1,3}.

Tradicionalmente, la universidad ha centrado su misión en la transmisión de conocimientos y en el desarrollo de competencias técnicas y profesionales. Sin embargo, los cambios sociales experimentados durante las últimas décadas han puesto de manifiesto la necesidad de adoptar enfoques educativos más integrales que contemplen también el desarrollo emocional y relacional de los estudiantes². Esta necesidad adquiere una relevancia particular en las titulaciones de Ciencias de la Salud, donde el ejercicio profesional implica una interacción constante con personas que experimentan sufrimiento, enfermedad, dependencia, incertidumbre o pérdida^{4,5}.

La calidad de los cuidados sanitarios depende no solo de los conocimientos científicos y de las habilidades técnicas de los profesionales, sino también de su capacidad para establecer relaciones terapéuticas eficaces, comunicarse de forma empática, gestionar situaciones emocionalmente complejas y mantener una práctica asistencial humanizada^{4,5}. En este sentido, competencias como la regulación emocional, la escucha activa, la comunicación terapéutica o la capacidad de autorreflexión han comenzado a ocupar un lugar cada vez más relevante dentro de los modelos contemporáneos de formación sanitaria^{6,7}.

Paralelamente, la investigación sobre inteligencia emocional y regulación emocional ha mostrado que estas capacidades no constituyen únicamente rasgos personales relativamente estables, sino habilidades susceptibles de aprendizaje y desarrollo mediante intervenciones educativas específicas^{8,9}. Esta evidencia ha contribuido a cuestionar la idea tradicional de que las competencias emocionales se adquieren de manera espontánea a través de la experiencia, abriendo nuevas posibilidades para su incorporación explícita dentro de los currículos universitarios.

En los últimos años, diferentes experiencias desarrolladas en el ámbito de la formación en Ciencias de la Salud han explorado estrategias orientadas al fortalecimiento de la regulación emocional, la conciencia personal y las competencias relacionales. Los resultados obtenidos sugieren que estas dimensiones pueden desempeñar un papel relevante tanto en el bienestar de los estudiantes como en su preparación para afrontar las demandas humanas y emocionales inherentes a la práctica profesional^{3,8,9}.

Desde esta perspectiva, el bienestar emocional deja de ser únicamente un objetivo relacionado con la salud individual del estudiante para convertirse en una cuestión educativa y profesional^{2,5,10}. Formar profesionales técnicamente competentes

continúa siendo imprescindible, pero los desafíos actuales de los sistemas sanitarios requieren también personas capaces de comprender sus propias emociones, relacionarse de manera efectiva con los demás y sostener prácticas de cuidado humanas y sostenibles a lo largo del tiempo^{4,5,10}.

El objetivo de este trabajo es reflexionar sobre la importancia del bienestar emocional y de las competencias relacionales en la formación universitaria de los futuros profesionales de la salud, integrando la evidencia científica reciente y analizando sus implicaciones para los modelos educativos contemporáneos.

La evidencia científica disponible sugiere que el bienestar emocional y las competencias relacionales constituyen dimensiones estrechamente vinculadas dentro del proceso formativo de los futuros profesionales de la salud. La Figura 1 presenta un marco conceptual integrador que sitúa el bienestar emocional como un elemento central para el desarrollo de competencias personales y relacionales necesarias en el ejercicio profesional. Desde esta perspectiva, la regulación emocional, la conciencia personal y las habilidades comunicativas aparecen como componentes complementarios que contribuyen a la formación de profesionales más resilientes, competentes y preparados para afrontar los desafíos humanos de la práctica asistencial.

MÉTODO

Se realizó una revisión narrativa con el objetivo de analizar la relevancia del bienestar emocional y de las competencias relacionales en la formación universitaria, particularmente en las titulaciones de Ciencias de la Salud. Este tipo de revisión permite integrar evidencias procedentes de diferentes enfoques disciplinares y generar una reflexión crítica sobre fenómenos complejos que afectan simultáneamente a los ámbitos educativo, sanitario y social.

La revisión se apoyó en literatura científica reciente relacionada con salud mental juvenil, bienestar emocional, inteligencia emocional, regulación emocional, educación superior, relación terapéutica y competencias relacionales en profesionales sanitarios. Asimismo, se consultaron informes y documentos elaborados por organismos internacionales vinculados a la educación y la salud, con especial atención a las publicaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

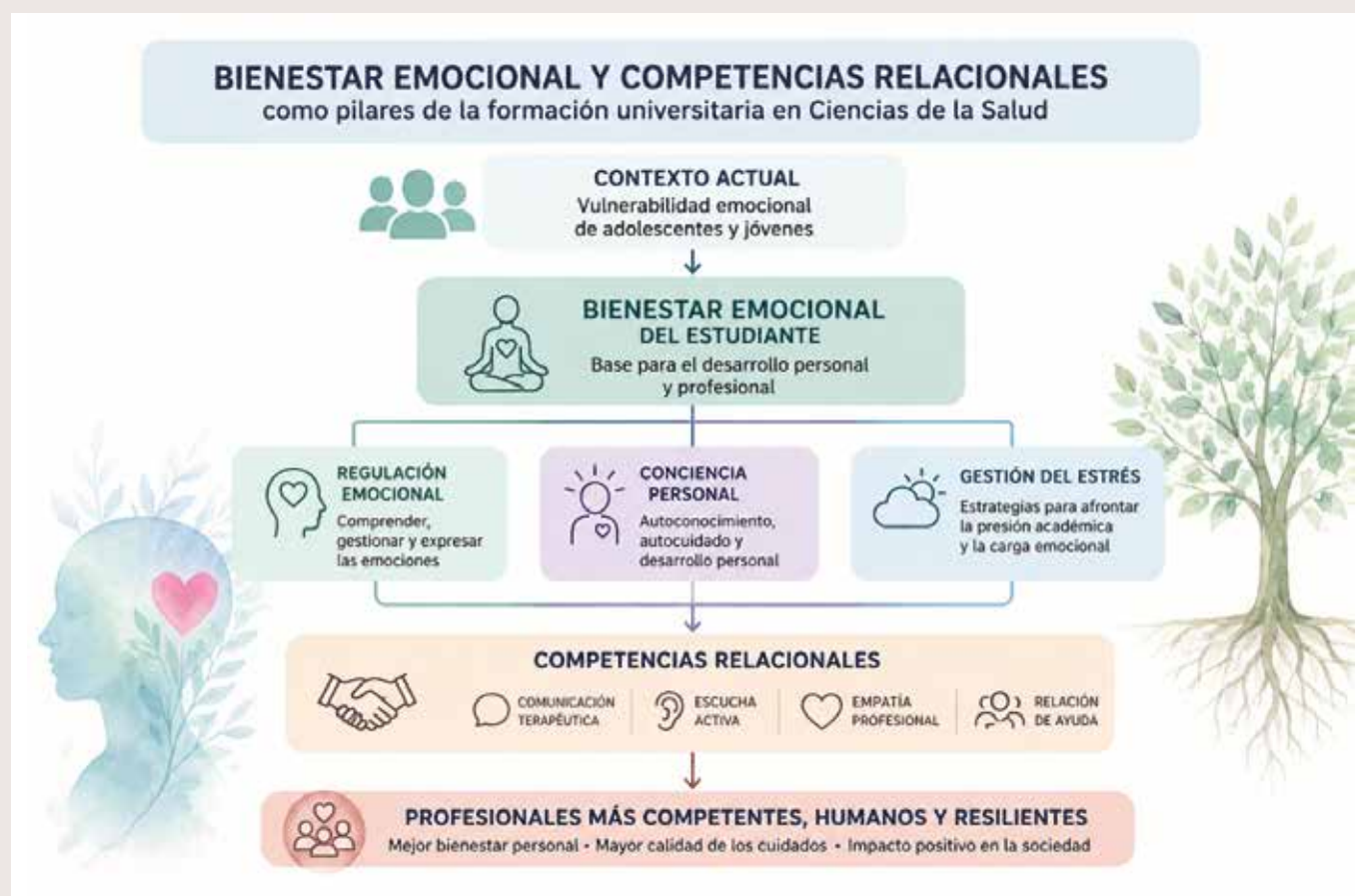


Figura 1. Bienestar emocional y competencias relacionales como pilares de la formación universitaria en Ciencias de la Salud.

Nota. Elaboración propia a partir de la literatura científica sobre salud mental juvenil, regulación emocional, inteligencia emocional y competencias relacionales en profesionales de la salud.

La estrategia de análisis se orientó a identificar los principales desafíos relacionados con el bienestar emocional de los estudiantes universitarios y las propuestas educativas descritas en la literatura para fortalecer competencias personales y relacionales relevantes para el ejercicio profesional. Con este propósito, se revisaron trabajos centrados en la salud mental de adolescentes y jóvenes, estudios sobre regulación emocional e inteligencia emocional, así como investigaciones relacionadas con la formación de competencias terapéuticas y comunicativas en Ciencias de la Salud.

Como parte de la evidencia considerada, se incorporaron investigaciones recientes desarrolladas en los ámbitos de la salud mental juvenil, la regulación emocional y el entrenamiento de competencias relacionales en estudiantes universitarios. Estos trabajos fueron utilizados como ejemplos aplicados para ilustrar la posible integración de estas

dimensiones dentro de los procesos formativos de los futuros profesionales sanitarios.

La información recopilada fue sintetizada mediante una estrategia narrativa. Los hallazgos se organizaron en torno a tres ejes temáticos: la creciente vulnerabilidad emocional de los jóvenes que acceden a la universidad, la regulación emocional como competencia educativa y profesional, y el desarrollo de competencias relacionales necesarias para el ejercicio de las profesiones sanitarias.

La literatura revisada permite identificar una serie de desafíos emergentes relacionados con el bienestar emocional de los estudiantes universitarios y, especialmente, de aquellos que se preparan para ejercer profesiones sanitarias. Estos desafíos no afectan únicamente a la salud individual de los estudiantes, sino que pueden influir en su aprendizaje, en el desarrollo de competencias profesionales y en su futura capacidad para

TABLA 1
Principales desafíos y respuestas educativas relacionadas con el bienestar emocional en la formación universitaria

Dimensión	Desafíos identificados	Consecuencias potenciales	Estrategias educativas propuestas
Salud mental y bienestar emocional	Incremento del malestar psicológico, estrés académico, incertidumbre y vulnerabilidad emocional en jóvenes	Dificultades de adaptación, disminución del bienestar y riesgo de desgaste emocional	Programas de promoción del bienestar, acompañamiento psicológico y educación emocional
Regulación emocional	Escasa formación específica en autoconocimiento y gestión emocional	Dificultades para afrontar situaciones complejas y elevada carga emocional	Entrenamiento en regulación emocional, reflexión guiada y aprendizaje experiencial
Competencias relacionales	Desarrollo insuficiente de habilidades comunicativas y terapéuticas durante la formación	Limitaciones en la relación profesional-paciente y en la calidad de los cuidados	Simulación clínica, entrenamiento en comunicación terapéutica y metodologías activas
Formación integral	Predominio histórico de competencias técnicas y cognitivas	Desequilibrio entre preparación técnica y desarrollo personal	Integración curricular de competencias emocionales y relacionales
Ejercicio profesional futuro	Exposición continuada al sufrimiento, incertidumbre y complejidad asistencial	Riesgo de desgaste profesional y dificultades de adaptación	Desarrollo de resiliencia, autocuidado y competencias interpersonales

Nota. *Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada sobre bienestar emocional, regulación emocional y competencias relacionales en educación superior y Ciencias de la Salud.*

afrontar las demandas humanas del cuidado. La Tabla 1 sintetiza los principales problemas descritos en la literatura, sus posibles consecuencias y algunas de las estrategias educativas propuestas para abordarlos desde una perspectiva integral.

RESULTADOS

La revisión realizada permitió identificar tres grandes áreas de reflexión relacionadas con la formación de los futuros profesionales de la salud: la creciente preocupación por el bienestar emocional de los estudiantes universitarios, el reconocimiento de la regulación emocional como competencia educativa y la necesidad de incorporar el entrenamiento explícito de competencias relacionales dentro de los procesos formativos.

1. El bienestar emocional como desafío emergente en la educación superior

La literatura científica reciente coincide en señalar que la salud mental y el bienestar emocional de los jóvenes constituyen una preocupación creciente para los sistemas educativos y sanitarios¹⁻³. Diversos estudios han descrito un incremento de los niveles de estrés percibido, ansiedad, malestar emocional

y dificultades de adaptación durante la transición hacia la educación superior, configurando un escenario que trasciende el ámbito individual para convertirse en un reto institucional.

En el caso de las titulaciones de Ciencias de la Salud, esta realidad adquiere una especial relevancia debido a las características del futuro ejercicio profesional. Los estudiantes deben prepararse para afrontar situaciones de sufrimiento, enfermedad, incertidumbre y vulnerabilidad humana, lo que incrementa la importancia de disponer de recursos personales que favorezcan el equilibrio emocional y la adaptación a contextos asistenciales complejos.

Las investigaciones recientes desarrolladas en población adolescente europea refuerzan esta preocupación al mostrar una creciente vulnerabilidad emocional entre los jóvenes que posteriormente accederán a la educación superior¹. Estos hallazgos sugieren que las universidades deberán afrontar en los próximos años demandas crecientes relacionadas con el bienestar psicológico de sus estudiantes.

2. La regulación emocional como competencia educativa

Un segundo hallazgo relevante es el creciente reconocimiento de la regulación emocional como una competencia susceptible de aprendizaje y desarrollo. Las aportaciones procedentes de

la investigación en inteligencia emocional han contribuido a cuestionar la visión tradicional que consideraba las habilidades emocionales como rasgos relativamente estables e independientes de los procesos educativos^{6, 7}.

La literatura revisada muestra que estrategias basadas en la reflexión personal, la conciencia corporal, el aprendizaje experiencial y el autoconocimiento pueden favorecer el desarrollo de competencias relacionadas con la identificación, comprensión y gestión de las emociones⁶⁻⁸. Estas capacidades se han asociado con mayores niveles de bienestar psicológico, una mejor adaptación académica y una mayor capacidad para afrontar situaciones emocionalmente exigentes.

Desde una perspectiva educativa, estos hallazgos apoyan la necesidad de incorporar espacios formativos que permitan a los estudiantes desarrollar recursos personales para afrontar los desafíos emocionales de su futura práctica profesional.

3. Las competencias relacionales pueden entrenarse

La tercera línea de resultados pone de manifiesto que las competencias relacionales no deben entenderse exclusivamente como atributos personales o habilidades adquiridas de manera espontánea durante la experiencia clínica. La comunicación terapéutica, la escucha activa, la empatía profesional y la capacidad para establecer relaciones de ayuda constituyen competencias complejas que pueden desarrollarse mediante metodologías educativas específicas^{5, 8}.

En este contexto, la simulación clínica ha emergido como una herramienta especialmente útil para el entrenamiento de habilidades comunicativas y relacionales. La evidencia disponible muestra que la participación en escenarios simulados favorece la reflexión, el aprendizaje experiencial y la adquisición progresiva de competencias necesarias para la construcción de relaciones terapéuticas eficaces⁹.

Estos hallazgos resultan especialmente relevantes en las profesiones sanitarias, donde la calidad de los cuidados depende en gran medida de la capacidad de los profesionales para establecer relaciones humanas significativas con pacientes, familias y equipos asistenciales.

Los tres ámbitos identificados, bienestar emocional, regulación emocional y competencias relacionales, no constituyen dimensiones independientes, sino elementos estrechamente interrelacionados dentro de un mismo proceso formativo. La evidencia revisada sugiere que el desarrollo equilibrado de estas capacidades puede contribuir a formar profesionales más resilientes, más preparados para afrontar la complejidad emocional del cuidado y más capaces de ofrecer una atención centrada en la persona^{5, 8, 9}.

Los tres ejes identificados en esta revisión no deben interpretarse como fenómenos aislados, sino como dimensiones complementarias de un mismo proceso formativo. La evidencia analizada sugiere que la vulnerabilidad emocional con la que muchos estudiantes acceden a la universidad, la capacidad para regular las propias emociones y el desarrollo de competencias relacionales forman parte de una secuencia educativa estrechamente interconectada. La Figura 2 sintetiza esta relación y propone un modelo integrador orientado a comprender cómo el bienestar emocional puede contribuir al desarrollo de profesionales sanitarios más preparados para afrontar los desafíos humanos del cuidado.



Figura 2. Relación entre bienestar emocional, competencias relacionales y desarrollo profesional en Ciencias de la Salud.

Nota. Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada sobre salud mental juvenil, regulación emocional, inteligencia emocional y competencias relacionales en educación superior y Ciencias de la Salud.

DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión sugieren que el bienestar emocional debe ocupar un lugar más relevante dentro de los modelos contemporáneos de formación universitaria, especialmente en aquellas titulaciones orientadas al cuidado de las personas. Aunque tradicionalmente las instituciones de educación superior han priorizado la adquisición de conocimientos y competencias técnicas, la creciente complejidad de los desafíos sanitarios y sociales obliga a reconsiderar el papel que desempeñan las dimensiones emocionales y relacionales en la preparación de los futuros profesionales^{2, 5, 10}.

La preocupación por la salud mental de adolescentes y jóvenes no constituye un fenómeno aislado ni circunscrito al ámbito sanitario. Organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud han alertado sobre el incremento de los problemas relacionados con el bienestar psicológico en las nuevas generaciones, identificando la adolescencia y la juventud como etapas especialmente sensibles para la promoción de la salud mental^{1, 3}. Desde esta perspectiva, las universidades reciben cada vez con mayor frecuencia estudiantes que han desarrollado su trayectoria educativa en contextos caracterizados por elevados niveles de incertidumbre, presión académica, exposición digital y vulnerabilidad emocional.

Este escenario plantea importantes implicaciones para las instituciones de educación superior. La promoción del bienestar emocional no debería entenderse exclusivamente como una estrategia de apoyo psicológico dirigida a estudiantes con dificultades específicas. Por el contrario, comienza a consolidarse la idea de que determinadas competencias relacionadas con el autoconocimiento, la regulación emocional y el autocuidado forman parte de los recursos necesarios para afrontar con éxito los retos académicos y profesionales contemporáneos^{6, 7, 10}.

Las aportaciones procedentes de la investigación sobre inteligencia emocional han contribuido de manera significativa a este cambio de perspectiva. Desde los trabajos pioneros de Salovey y Mayer hasta desarrollos posteriores, diversos autores han señalado que la capacidad para reconocer, comprender y gestionar las emociones influye tanto en el bienestar individual como en el rendimiento académico, la adaptación social y la toma de decisiones^{6, 7}. Aunque estos planteamientos han recibido diferentes interpretaciones y matices a lo largo del tiempo, existe un amplio consenso en reconocer que las habilidades emocionales desempeñan un papel relevante en el funcionamiento personal y profesional.

En el ámbito de las Ciencias de la Salud, esta cuestión adquiere una importancia particular. Los profesionales sanitarios

desarrollan gran parte de su actividad en contextos emocionalmente exigentes, caracterizados por el contacto permanente con el sufrimiento, la incertidumbre, la enfermedad y la vulnerabilidad humana. Por este motivo, diferentes organismos profesionales y marcos éticos internacionales han subrayado la importancia de preservar la dimensión humana del cuidado y de promover competencias que favorezcan relaciones terapéuticas de calidad^{5, 10}.

Los hallazgos revisados sugieren que las competencias relacionales no deben considerarse exclusivamente atributos personales o rasgos innatos. Al contrario, la evidencia disponible indica que habilidades como la comunicación terapéutica, la escucha activa, la empatía profesional y la capacidad para establecer relaciones de ayuda pueden desarrollarse mediante experiencias formativas estructuradas^{4, 9}. Las metodologías activas, el aprendizaje experiencial y la simulación clínica han mostrado resultados prometedores para favorecer este tipo de aprendizajes en estudiantes de Ciencias de la Salud⁹.

Del mismo modo, las intervenciones orientadas al fortalecimiento de la regulación emocional muestran que estas capacidades pueden abordarse de forma explícita dentro de los procesos educativos⁸. La posibilidad de entrenar competencias relacionadas con la conciencia emocional, la reflexión personal y la gestión del estrés cuestiona la tradicional separación entre formación académica y desarrollo personal, sugiriendo la conveniencia de integrar ambas dimensiones dentro de una visión más amplia de la educación universitaria.

La convergencia de estas evidencias permite plantear una reflexión de carácter estratégico. Los sistemas sanitarios afrontan desafíos crecientes relacionados con el envejecimiento poblacional, la complejidad asistencial, la escasez de profesionales y el incremento de los problemas de salud mental^{1, 5, 10}. En este contexto, formar profesionales técnicamente competentes continúa siendo una condición indispensable, pero probablemente ya no resulte suficiente. Los futuros profesionales necesitarán también recursos emocionales y relacionales que les permitan afrontar escenarios asistenciales complejos sin renunciar a la calidad humana del cuidado^{5, 8}.

Desde esta perspectiva, el bienestar emocional puede entenderse simultáneamente como un objetivo educativo, una competencia profesional y un elemento facilitador de la relación terapéutica. La evidencia analizada sugiere que el desarrollo emocional y el desarrollo relacional forman parte de un mismo proceso formativo y que ambos deberían incorporarse de manera explícita a los currículos universitarios de las profesiones sanitarias^{2, 6-10}.

CONCLUSIONES

El bienestar emocional constituye una dimensión cada vez más relevante para comprender los desafíos actuales de la educación superior y, particularmente, de la formación de los futuros profesionales de la salud. La evidencia revisada sugiere que los estudiantes acceden a la universidad en un contexto caracterizado por nuevas formas de vulnerabilidad emocional que pueden influir tanto en su experiencia académica como en su posterior desarrollo profesional.

Los hallazgos analizados muestran que la regulación emocional y las competencias relacionales no deben considerarse capacidades secundarias ni atributos exclusivamente personales, sino competencias susceptibles de aprendizaje y desarrollo mediante estrategias educativas específicas. La comunicación terapéutica, la escucha activa, la gestión emocional y la capacidad para establecer relaciones de ayuda forman parte de las herramientas necesarias para el ejercicio de unas profesiones sanitarias cada vez más complejas y humanamente exigentes.

En este contexto, las universidades tienen la oportunidad de ampliar su misión formativa incorporando enfoques que integren el desarrollo cognitivo, emocional y relacional de los estudiantes. Promover el bienestar emocional no implica sustituir la excelencia académica ni reducir las exigencias formativas, sino complementarlas mediante una visión más integral de la educación orientada al desarrollo de profesionales técnicamente competentes, emocionalmente preparados y capaces de ofrecer cuidados centrados en las personas.

La formación de los profesionales del futuro dependerá no solo de los conocimientos que adquieran durante su etapa universitaria, sino también de su capacidad para comprender sus emociones, relacionarse de forma efectiva con los demás y afrontar los desafíos humanos inherentes a la práctica asistencial. Incorporar estas dimensiones a los procesos educativos representa una oportunidad para fortalecer tanto el bienestar de los estudiantes como la calidad de los cuidados que presarán a lo largo de su trayectoria profesional.

BIBLIOGRAFÍA

1. World Health Organization. Adolescent mental health. Geneva: World Health Organization, 2024.
2. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Reimagining Our Futures Together: A New Social Contract for Education. Paris: UNESCO, 2021.
3. Ferreira Díaz, M. J. Adolescence in crisis: Insights from the 2024 ESPAD report and a nursing perspective. *iScience*. 2026;29:114726. doi:10.1016/j.isci.2026.114726.
4. Rogers, C. R. *On Becoming a Person: A Therapist's View of Psychotherapy*. Boston: Houghton Mifflin; 1961.
5. International Council of Nurses. *The ICN Code of Ethics for Nurses*. Geneva: ICN, 2021.
6. Salovey, P.; Mayer, J. D. Emotional intelligence. *Imagination, Cognition and Personality*. 1990, 9(3): 185-211.
7. Goleman, D. *Emotional Intelligence: Why It Can Matter More Than IQ*. New York: Bantam Books, 1995.
8. Ferreira Díaz, M. J. Embodied Preventive Pedagogy in Nursing Education: An Exploratory Educational Intervention to Support Emotional Regulation and Relational Competence. *Nursing Forum*. 2025.
9. Ferreira, M. J.; Laguía, A.; Topa, G. Simulation-Based Training for Therapeutic Relationship Competencies in Mental Health Nursing: A Cross-Sectional Evaluation. *Nursing Reports*. 2026;16(5):156. doi:10.3390/nursrep16050156.
10. World Health Organization. *Mental health and well-being in education settings*. Geneva: World Health Organization, 2023.

CUADERNO DE BITÁCORA DE UNA MOLÉCULA DE AGUA:

DEL COSMOS A GALICIA. HISTORIA DE UNA LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN

Jesús M. Torres Palenzuela, Clara Arrimadas Gieseemann, Iván Outomuro Mariño, Nerea Vírveda Olabegoeascoechea

Grupo ETEA (Ecología y Tecnología de Ecosistemas Acuáticos). Dpto. Física Aplicada. Facultad de Ciencias de la Universidade de Vigo. Lagoas Marcosende. Vigo.

RESUMEN

Mi historia comenzó mucho antes de que existiera la Tierra. Los átomos que me forman nacieron en distintos momentos de la evolución del universo: el hidrógeno, poco después del Big Bang, y el oxígeno, en el interior de estrellas que terminaron explotando como supernovas. Desde entonces he viajado por nubes interestelares, océanos primitivos, glaciares, acuíferos y seres vivos, formando parte de un ciclo que conecta el cosmos con todos los ecosistemas terrestres (ver Figura 1).

Hoy continúo recorriendo el ciclo hidrológico, pero mi viaje ya no depende únicamente de los procesos naturales. La actividad humana ha incorporado nuevos compañeros de viaje: nutrientes procedentes de la agricultura y la ganadería, contaminantes emergentes, microorganismos patógenos y residuos de origen urbano e industrial que alteran el equilibrio de ríos, embalses y ecosistemas acuáticos.

En Galicia, estos problemas se manifiestan de forma especialmente visible. La contaminación difusa derivada del exceso de nitrógeno y fósforo favorece procesos de eutrofización en numerosos sistemas acuáticos, siendo el embalse de As Conchas uno de los ejemplos más representativos. A ello se suman los retos asociados al tratamiento de las aguas residuales, especialmente en pequeñas poblaciones y durante episodios de lluvias intensas.

Frente a este escenario, la Unión Europea impulsa un nuevo modelo de gestión del agua basado en la innovación, la sostenibilidad y la economía circular mediante iniciativas como EIT Water. En este contexto, el grupo ETEA y el Centro de Investigación Mariña de la Universidade de Vigo desarrollan soluciones basadas en microalgas, humedales artificiales y tec-

nologías avanzadas de tratamiento para mejorar la calidad del agua y contribuir a la recuperación de los ecosistemas acuáticos.

A través del relato de una única molécula de agua, este trabajo recorre un viaje de miles de millones de años que une el origen del universo con algunos de los grandes desafíos ambientales del presente, mostrando cómo la ciencia y la innovación pueden convertirse en herramientas esenciales para proteger uno de los recursos más valiosos del planeta.

INTRODUCCIÓN: EL COMIENZO DEL VIAJE

Me llamo H_2O y soy mucho más antigua que la Tierra. Mi historia comenzó hace unos 13.800 millones de años, cuando el universo apenas acababa de nacer. Sin embargo, los átomos que me forman no aparecieron al mismo tiempo. Mi hidrógeno se originó pocos minutos después del Big Bang, mientras que el oxígeno tuvo que esperar miles de millones de años, hasta que las primeras generaciones de estrellas fabricaron elementos cada vez más pesados en su interior (Ryden, 2017).

Cuando aquellas estrellas agotaron su combustible, explotaron como supernovas y dispersaron el oxígeno por el espacio. En las frías nubes moleculares donde nacían nuevas estrellas, ese oxígeno se encontró con el hidrógeno y, por fin, aparecí yo: una simple molécula de agua (Van Dishoeck *et al.*, 2013).

Durante millones de años viajé adherida a diminutas partículas de polvo interestelar. Vi formarse estrellas, planetas y sistemas solares completos. De hecho, muchas de las moléculas de

agua que hoy existen en la Tierra son anteriores al propio Sol (Cleeves *et al.*, 2014).

Hace unos 4.500 millones de años llegué a un planeta joven, caliente y cubierto por volcanes. Parte de mis compañeras llegaron encerradas en cometas y asteroides; otras emergimos desde el interior de la Tierra junto con los gases expulsados por el intenso vulcanismo (Marty, 2012).

Cuando la superficie comenzó a enfriarse, el vapor de agua se condensó y cayó durante miles de años en forma de lluvias torrenciales. Así nacieron los primeros océanos (Kasting & Catling, 2003). Desde entonces nunca he dejado de viajar.

He sido nieve en las montañas, hielo en los glaciares, vapor en la atmósfera y corriente en los ríos. He atravesado las raíces de los árboles, participado en la fotosíntesis y circulado por la sangre de innumerables seres vivos. Como todas las moléculas de agua, formo parte de un ciclo ininterrumpido que conecta océanos, continentes y atmósfera (UNESCO, 2024).

Durante la mayor parte de mi existencia conviví únicamente con procesos naturales. Pero hace apenas unos siglos apareció un nuevo actor capaz de modificar mi viaje con una rapidez desconocida hasta entonces: el ser humano.

Desde ese momento comencé a encontrar nuevos compañeros de viaje. Algunos eran inofensivos; otros cambiaban profundamente mis propiedades y el equilibrio de los ecosistemas que atravesaba.

Arena, arcillas y sedimentos aumentaban mi turbidez. Fertilizantes y metales pesados se disolvían en mí sin alterar mi aspecto. Bacterias, virus y otros microorganismos aprovechaban mi recorrido para desplazarse entre unos lugares y otros. Más recientemente aparecieron restos de medicamentos, hormonas, microplásticos y otros contaminantes emergentes, presentes en concentraciones muy bajas, pero capaces de producir efectos importantes sobre los ecosistemas y la salud humana (WHO, 2022). Comprendí entonces que el agua nunca viaja sola.

En cada tramo de su recorrido transporta también una parte de la historia del planeta y de la sociedad que la rodea. Mi siguiente destino sería Galicia.

MI LLEGADA A GALICIA

Después de un viaje que había comenzado antes incluso del nacimiento del Sol, terminé en un rincón del planeta donde el agua forma parte del paisaje y también de la memoria de quienes lo habitan: Galicia. Aquí todo parece girar a mi alrededor.

Caigo sobre las montañas, atravieso bosques, alimento manantiales y recorro una densa red de ríos que desembocan en las rías atlánticas. Cada gota conecta el interior con el océano.

Sin embargo, pronto comprendí que un territorio rico en agua no está necesariamente libre de amenazas. Durante décadas transporté nitrógeno y fósforo procedentes de fertilizantes agrícolas y de explotaciones ganaderas. La lluvia arrastraba esos nutrientes hacia arroyos y ríos, y yo los conducía hasta embalses, estuarios y rías. Ningún vertido era especialmente grande, pero la suma de miles de pequeñas aportaciones acababa transformando ecosistemas enteros.

Los científicos llaman a este proceso contaminación difusa. Es uno de los problemas más complejos de gestionar porque no tiene un único origen. No basta con cerrar una tubería o corregir un vertido puntual: exige mejorar la gestión del territorio, reducir los excedentes de fertilizantes, restaurar las riberas y compatibilizar la producción agrícola y ganadera con la conservación de los ecosistemas acuáticos.

Uno de los lugares donde observé con mayor claridad las consecuencias de este proceso fue el embalse de As Conchas, en la cuenca del río Limia. Allí el exceso de nutrientes favoreció la proliferación de cianobacterias capaces de producir toxinas perjudiciales para animales y personas. El agua adquirió una intensa coloración verde, disminuyó el oxígeno disponible y el equilibrio del ecosistema comenzó a deteriorarse. As Conchas se convirtió así en uno de los casos más representativos de eutrofización asociados a la contaminación difusa en Europa.

Pero los nutrientes no eran mi único problema. En mi recorrido también atravesé numerosas estaciones depuradoras de aguas residuales. Muchas funcionan hoy con gran eficacia, aunque todavía existen pequeñas poblaciones donde el tratamiento resulta insuficiente, especialmente durante episodios de lluvias intensas. En esas circunstancias sigo transportando materia orgánica, microorganismos y nutrientes que terminan alcanzando los ríos y, finalmente, las rías.

Entonces comprendí algo que nunca había necesitado aprender durante mis miles de millones de años de existencia: conservar la calidad del agua depende mucho menos de una única infraestructura que de la forma en que una sociedad gestiona todo su territorio.

Afortunadamente, también descubrí que cada vez más investigadores, administraciones y empresas trabajan conjuntamente para devolverme la calidad que nunca debí perder. Ese cambio de visión marcará el siguiente capítulo de mi viaje. Fue allí donde encontré a mis primeros aliados.

CAMBIO DE PARADIGMA

El caso gallego refleja un problema de alcance global. Durante mucho tiempo se asumió que los ecosistemas acuáticos tenían una capacidad prácticamente ilimitada para absorber los residuos generados por la actividad humana. Hoy sabemos que no es así. Cuando los aportes de contaminantes superan la capacidad natural del sistema para asimilarlos, el equilibrio ecológico comienza a deteriorarse: proliferan algas y cianobacterias, disminuye el oxígeno disuelto, desaparecen las especies más sensibles y el agua deja de proporcionar muchos de los servicios ecosistémicos de los que dependen tanto la biodiversidad como las personas.

Este nuevo conocimiento ha impulsado un cambio profundo en la forma de gestionar los recursos hídricos. Ya no basta con depurar el agua una vez utilizada; es necesario prevenir la contaminación, recuperar los ecosistemas y gestionar de forma integrada todo el ciclo del agua.

En este contexto surge EIT Water, la nueva Comunidad de Conocimiento e Innovación (KIC) del European Institute of Innovation and Technology (EIT) dedicada al agua, los ecosistemas marinos y la economía azul. Su objetivo es transformar el conocimiento científico en soluciones aplicables mediante el desarrollo de nuevas tecnologías, la formación de profesionales, el impulso al emprendimiento y la colaboración entre universidades, centros de investigación, administraciones públicas y empresas (CIM, 2025).

La filosofía que impulsa EIT Water representa un auténtico cambio de paradigma. El agua deja de entenderse únicamente como un recurso que debe captarse, utilizarse y depurarse para convertirse en el elemento vertebrador de un sistema en el que cuencas hidrográficas, ecosistemas costeros, biodiversidad, actividad económica y cambio climático están estrechamente interconectados.

En Galicia esta visión adquiere una especial relevancia. Lo que ocurre en una explotación agrícola del interior puede terminar afectando a los embalses, los ríos y, finalmente, a las rías atlánticas. Por ello, la gestión integrada de cuencas constituye uno de los pilares fundamentales de las nuevas estrategias europeas de protección del agua.

En este escenario, la Universidade de Vigo participa activamente a través del grupo ETEA (Ecología y Tecnología de Ecosistemas Acuáticos) y del Centro de Investigación Mariña (CIM), integrados en el consorcio europeo Allwaters, que reúne universidades, centros tecnológicos, empresas y organismos públicos de más de treinta países. Dentro de esta red, el grupo ETEA desarrolla soluciones orientadas a

mejorar el tratamiento de pequeñas estaciones depuradoras de aguas residuales mediante tecnologías basadas en microalgas, humedales artificiales, procesos de remediación y otros sistemas innovadores que contribuyen a reducir nutrientes, microorganismos patógenos y contaminantes emergentes, favoreciendo al mismo tiempo la transición hacia una economía circular.

Yo misma he comenzado a recorrer algunos de esos proyectos. En ellos he descubierto que la naturaleza puede convertirse en la mejor aliada de la tecnología para recuperar la calidad del agua. Ese será el siguiente capítulo de mi viaje.

LAS MICROALGAS Y LOS HUMEDALES: MIS NUEVOS ALIADOS

Después de convivir durante tanto tiempo con fertilizantes, bacterias, metales y otros contaminantes, pensé que mi viaje terminaría inevitablemente deteriorando los ecosistemas por los que pasaba. Sin embargo, en algunos lugares descubrí aliados inesperados. Uno de ellos eran las microalgas (ver Figura 1).

A simple vista apenas se perciben, pero estas diminutas células fotosintéticas poseen una extraordinaria capacidad para mejorar la calidad del agua. Mientras crecen utilizando la energía del Sol, absorben precisamente muchos de los compuestos que para mí representan un problema: nitrógeno, fósforo e incluso algunos metales pesados y contaminantes emergentes (Herrera *et al.*, 2020; Ogundele *et al.*, 2023). Lo que para otros es contaminación, para ellas constituye una fuente de alimento.

Gracias a su elevada relación superficie-volumen y a su rápido crecimiento, determinadas especies pueden eliminar gran parte del nitrógeno amoniacal y de los fosfatos presentes en las aguas residuales, contribuyendo a reducir el riesgo de eutrofización (Ogundele *et al.*, 2023). Además, algunas son capaces de captar dióxido de carbono durante la fotosíntesis y favorecer la eliminación de determinados residuos farmacéuticos y otros microcontaminantes (Herrera *et al.*, 2020). Lo más sorprendente es que las aguas residuales dejan entonces de verse únicamente como un problema. Se convierten en un recurso.

Numerosos grupos de investigación han demostrado que los efluentes procedentes de estaciones depuradoras pueden emplearse como medio de cultivo para microalgas. Mientras ellas crecen, eliminan nutrientes, capturan carbono y generan

biomasa que posteriormente puede transformarse en fertilizantes, biocombustibles, bioplásticos o compuestos de interés industrial (Amaral, 2016). Es uno de los mejores ejemplos de economía circular: aquello que antes era un residuo puede volver a incorporarse al sistema como un nuevo recurso. Pero mis aliados no terminan ahí.

También conocí los humedales artificiales (ver Figura 2), ecosistemas diseñados para imitar el funcionamiento de los humedales naturales. En ellos, plantas acuáticas, microorganismos y sustratos trabajan conjuntamente para eliminar materia orgánica, nutrientes y otros contaminantes antes de que el agua regrese a los ríos (Kochi *et al.*, 2020). No utilizan grandes cantidades de energía ni complejos equipos industriales. Su principal herramienta es la propia naturaleza.

Entre las especies vegetales más utilizadas destacan *Canna indica* (ver Figura 2), *Iris pseudacorus*, *Juncus effusus* y diferentes especies de *Typha*. Sus raíces crean un entorno donde proliferan microorganismos beneficiosos, favorecen la oxigenación del sustrato y absorben parte de los nutrientes disueltos (Kurniawan *et al.*, 2021; Wilkinson *et al.*, 2023).

Estos sistemas presentan numerosas ventajas: requieren un consumo energético reducido, resultan relativamente económicos de mantener y, además de depurar el agua, crean hábitats que favorecen la biodiversidad. Como toda solución basada en la naturaleza, también tienen limitaciones, como la necesidad de disponer de superficies amplias o una menor eficacia cuando la carga contaminante es muy elevada (Kochi *et al.*, 2020).

Durante mi paso por algunos de estos sistemas comprendí que, en ocasiones, la mejor tecnología consiste en dejar que la propia naturaleza haga aquello que lleva millones de años perfeccionando. Pero todavía quedaba por conocer una tecnología capaz de utilizar burbujas invisibles para devolverme mi equilibrio.

NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA DEVOLVERME MI EQUILIBRIO

Durante mucho tiempo pensé que limpiar el agua consistía únicamente en retener la suciedad visible. Sin embargo, aprendí que muchos de los contaminantes más peligrosos son invisibles y que eliminarlos requiere combinar el conocimiento de la naturaleza con nuevas tecnologías.

Algunas de las soluciones más prometedoras comienzan con materiales sorprendentemente sencillos. Uno de ellos es el qui-



Figura 1. Imagen conceptual de elaboración propia, con escalas aproximadas de una nanoburbuja (1), una microalga (2), un copo de nieve (3) y el planeta Tierra (4).

tosano, un biopolímero obtenido a partir de la quitina presente en los caparazones de crustáceos y otros organismos marinos. Cuando se añade al agua, actúa como coagulante y floculante, favoreciendo que las partículas en suspensión se agrupen y puedan separarse con mayor facilidad (Capitillo-Maita *et al.*, 2023).

En Galicia, donde la actividad marisquera genera grandes cantidades de residuos de este tipo, el aprovechamiento del quitosano constituye además un excelente ejemplo de economía circular: un subproducto de la industria pesquera puede contribuir a mejorar la calidad del agua.

Otra alternativa son los filtros cerámicos elaborados con materiales arcillosos. Su estructura porosa permite retener partículas en suspensión, microorganismos y diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos, convirtiéndolos en una solución sencilla y de bajo coste para determinados tratamientos de depuración (Chaukura *et al.*, 2020).

Pero algunas de las tecnologías que encontré durante mi viaje parecían sacadas de la ciencia ficción.

Una de ellas utiliza nanoburbujas de ozono (ver Figura 1), burbujas miles de veces más pequeñas que el grosor de un cabello humano. Su reducido tamaño les proporciona una enorme superficie de contacto con el agua y les permite permanecer



Figura 2. Imagen de elaboración propia de izquierda a derecha y de arriba abajo, un lagunar verde en EDAR, un sistema raceway de crecimiento de microalgas, Canna Indica y aguas cristalinas de río.

estables durante largos periodos. Gracias a estas propiedades pueden favorecer *la oxidación de contaminantes, mejorar la desinfección y facilitar la eliminación de nutrientes* (Foudas *et al.*, 2023).

Antes de generarlas es necesario ajustar cuidadosamente el pH del agua, ya que este influye en su carga superficial -conocida como potencial Zeta- y, por tanto, en la forma en que interactúan con las partículas en suspensión. Cuando las condiciones son adecuadas, las nanoburbujas se adhieren con mayor facilidad a los contaminantes y favorecen su agrupamiento y posterior eliminación (Yang *et al.*, 2024).

En algunos sistemas experimentales, estas nanoburbujas se combinan con ultrasonidos. Las ondas ultrasónicas provocan la implosión de las burbujas y generan fenómenos físicos y químicos capaces de aumentar la eliminación de microorganismos y otros contaminantes presentes en el agua (Yasuda *et al.*, 2019).

En la Universidade de Vigo, el grupo ETEA, en colaboración con Augas de Galicia, investiga cómo integrar estas tecnologías con soluciones basadas en la naturaleza, como los humedales artificiales y los cultivos de microalgas. El objetivo no es sustituir los procesos naturales, sino complementarlos para desarrollar sistemas de depuración más eficientes, sostenibles y adaptados a las necesidades de pequeñas estaciones depuradoras de aguas residuales.

Mientras continúo mi viaje, compruebo que cada nuevo avance científico me acerca un poco más a recuperar la calidad que tuve durante millones de años.

CONCLUSIÓN

Mi viaje comenzó mucho antes de que existiera la Tierra y continúa hoy recorriendo nubes, ríos, océanos, acuíferos y seres vivos. A lo largo de miles de millones de años he participado en procesos cósmicos, geológicos y biológicos que han dado forma al planeta tal como lo conocemos. Sin embargo, nunca había experimentado cambios tan rápidos como los provocados por la actividad humana en apenas unas décadas.

La contaminación por nutrientes, los contaminantes emergentes, las aguas residuales insuficientemente tratadas y las alteraciones derivadas del cambio climático han modificado profundamente muchos ecosistemas acuáticos. Casos como el embalse de As Conchas muestran que el deterioro de la calidad del agua rara vez es consecuencia de una única causa; suele ser el resultado de miles de pequeñas aportaciones que, acumuladas en el tiempo, terminan alterando el equilibrio de ríos, embalses y zonas costeras.

Pero también he descubierto algo esperanzador. La misma capacidad científica y tecnológica que ha contribuido a comprender estos problemas está permitiendo desarrollar soluciones cada vez más eficaces. Microalgas, humedales artificiales, procesos avanzados de oxidación, nanoburbujas y nuevos materiales representan una nueva generación de herramientas capaces de mejorar la calidad del agua desde una perspectiva más sostenible e integrada.

Este cambio de enfoque queda reflejado en iniciativas europeas como EIT Water, donde universidades, centros de investigación, administraciones públicas y empresas colaboran para impulsar tecnologías innovadoras y modelos de gestión basados en la economía circular. En este contexto, la Universidade de Vigo, a través del grupo ETEA y del Centro de Investigación Mariña, contribuye al desarrollo de soluciones adaptadas a los retos de Galicia y del conjunto de Europa.

Después de miles de millones de años de viaje he comprendido que proteger el agua no significa únicamente conservar un recurso natural. Significa preservar el hilo invisible que conecta el origen del universo con la vida de todos los seres que habitan nuestro planeta.

Porque, aunque yo seguiré recorriendo el ciclo del agua durante millones de años más, la calidad de ese viaje dependerá, en buena medida, de las decisiones que tomemos hoy.

BIBLIOGRAFÍA

1. Amaral, M. D. M. M. (2016). Tratamiento de aguas residuales con microalgas en reactores abiertos (Tesis doctoral). Universidad de Almería.
2. Capitillo-Maita, D.; Castillo-Rivas, J.; Gil-Álvarez, J. A., & Pérez-Torres, T. (2023). Uso de quitosano como coagulante y floculante en el tratamiento de aguas residuales provenientes de plantas de pegamento y pintura. *Informador Técnico*, 87(2), pp. 120-132. <https://doi.org/10.23850/22565035.5559>
3. Centro de Investigación Mariña da Universidade de Vigo (CIM). (2025, 27 de noviembre). UVigo y APV se unen al gran consorcio europeo que promoverá la innovación frente a los desafíos hídricos, marinos y marítimos de la UE.
4. Chaukura, N.; Katengeza, G.; Gwenzi, W.; Mbiriri, C. I.; Nkambule, T. T.; Moyo, M., & Kuvarega, A. T. (2020). Development and evaluation of a low-cost ceramic filter for the removal of methyl orange, hexavalent chromium, and *Escherichia coli* from water. *Materials Chemistry and Physics*, 249, 122965. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122965>
5. L. Ilseore Cleaves *et al.* The ancient heritage of water ice in the solar system. *Science*, 345, 1590-1593(2014). DOI:10.1126/science.1258055
6. Foudas, A. W.; Kosheleva, R. I.; Favvas, E. P.; Kostoglou, M.; Mitropoulos, A. C., & Kyzas, G. Z. (2023). Fundamentals and applications of nanobubbles: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 187, pp. 64-86.
7. Herrera, J. A. S.; Granados, M. A. M., & Fernández, D. R. (2020). Breve revisión del uso de microalgas para la remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales. *Gestión y Ambiente*, 23(1), pp. 127-137.
8. Kasting, J. F., & Catling, D. (2003). Evolution of a habitable planet. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41(1), pp. 429-463.
9. Kochi, L. Y.; Freitas, P. L.; Maranho, L. T.; Juneau, P., & Gomes, M. P. (2020). Aquatic macrophytes in constructed wetlands: A fight against water pollution. *Sustainability*, 12(21), 9202.
10. Kurniawan, S. B.; Ahmad, A.; Said, N. S. M.; Imron, M. F.; Abdullah, S. R. S.; Othman, A. R., ... & Hasan, H. A. (2021). Macrophytes as wastewater treatment agents: Nutrient uptake and potential of produced biomass utilization toward circular economy initiatives. *Science of the Total Environment*, 790, 148219.
11. Marty, B. (2012). The origins and concentrations of water, carbon, nitrogen and noble gases on Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 313-314, pp. 56-66.
12. Ogundele, O. D.; Adewumi, A. J., & Oyegoke, D. A. (2023). Phycoremediation: Algae as an effective agent for sustainable remediation and wastewater treatment. *Environmental & Earth Sciences Research Journal*, 10(1).
13. Ryden, B. (2017). *Introduction to Cosmology* (2nd ed.). Cambridge University Press.
14. UNESCO. (2024). *United Nations World Water Development Report. 2024*.
15. Van Dishoeck, E. F.; Herbst, E., & Neufeld, D. A. (2013). Interstellar water chemistry: From laboratory to observations. *Chemical Reviews*, 113(12), pp. 9043-9085.
16. Wilkinson, S. R.; Naeth, M. A., & Dhar, A. (2023). Potential of macrophytes for wastewater remediation with constructed floating wetlands in cold climates. *Water*, 15(13), 2479.
17. World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water Quality* (4th ed., incorporating the 2022 addendum). World Health Organization.
18. Yang, Z.; Wang, Y.; Lukwambe, B.; Nicholas, R.; Yang, W.; Zhu, J., & Zheng, Z. Using ozone nanobubbles and microalgae to promote the removal of nutrients from aquaculture wastewater: Insights from the changes of microbiomes. *Environ Res.*, 2024 Sep., 15, 257:119349. doi: 10.1016/j.envres.2024.119349. Epub 2024, Jun. 4. PMID: 38844029
19. Yasuda, K.; Matsushima, H., & Asakura, Y. (2019). Generation and reduction of bulk nanobubbles by ultrasonic irradiation. *Chemical Engineering Science*, 195, pp. 455-461.

NOMBRAR PARA CONSERVAR: COMUNICACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD, EXOFITÓNIMOS Y CONSERVACIÓN *EX SITU* EN EL ARBORETUM-PINETUM LUCUS AUGUSTI

José Henrique Pérez-Rodríguez

Departamento de Traducción y Lingüística. Facultad Filología y Traducción. Universidad de Vigo. España.

RESUMEN

Este trabajo sistematiza unas directrices para la creación, adopción y uso de exofitónimos –nombres vernáculos aplicados a especies vegetales foráneas sin denominación tradicional estabilizada–, aprobadas por la asociación gestora del Arboretum-Pinetum Lucus Augusti y actualmente en fase inicial de implementación en la señalización, documentación y comunicación pública de la colección. Muchas especies raras o amenazadas cultivadas en arboretos carecen de nombres consolidados en gallego, lo que dificulta su integración en etiquetas, visitas guiadas, materiales didácticos y textos divulgativos. El artículo contextualiza esta necesidad y propone criterios para elaborar denominaciones transparentes, coherentes y botánicamente prudentes, evitando calcos o analogías que puedan inducir falsas pertenencias categoriales. La propuesta se sitúa en la intersección entre conservación *ex situ*, comunicación científica, terminología botánica y normalización lingüística, y aspira a ser útil para otros espacios de conservación, educación ambiental y divulgación de colecciones vivas.

Palabras clave: *exofitónimos; conservación ex situ; jardines botánicos; comunicación científica; terminología botánica; gallego.*

1. INTRODUCCIÓN

La conservación de la biodiversidad vegetal suele ser concebida, en primera instancia, como un problema de naturaleza biológica: identificar especies amenazadas, proteger sus hábitats, conservar germoplasma, mantener colecciones vivas o

desarrollar estrategias de cultivo *ex situ* que permitan reducir el riesgo de extinción. Sin embargo, esta perspectiva, aun siendo imprescindible, no agota la complejidad del problema. La conservación es también una cuestión comunicativa, cultural y semiótica. Muchas especies vegetales no desaparecen únicamente de los ecosistemas: desaparecen también del horizonte perceptivo, lingüístico y cultural de las comunidades humanas. No se reconocen, no se nombran, no se incorporan a narrativas sociales compartidas y, en consecuencia, difícilmente pueden ser objeto de una valoración pública efectiva.

Esta dimensión comunicativa resulta especialmente evidente en el caso de especies arbóreas foráneas, raras o amenazadas, cuya existencia permanece restringida, para la mayoría de la población, al ámbito especializado de la botánica, la horticultura científica o las redes internacionales de conservación vegetal. Especies como *Wollemia nobilis*, *Cathaya argyrophylla*, *Neocallitropsis pancheri* o *Dacrycarpus dacrydioides* poseen un evidente interés evolutivo, biogeográfico y conservacionista, pero carecen a menudo de una presencia lingüística estable en las lenguas de los territorios donde son cultivadas fuera de su área natural. El nombre científico garantiza la precisión taxonómica y constituye una herramienta irrenunciable para la identificación rigurosa; no obstante, por sí solo no siempre permite establecer una relación comunicativamente eficaz con públicos no especializados. Entre la nomenclatura científica y la comprensión social de la biodiversidad existe, por tanto, un espacio intermedio de mediación lingüística, terminológica y cultural.

Los jardines botánicos y los arboretos se sitúan precisamente en ese espacio intermedio. No son simples colecciones ornamentales ni meros inventarios vivos de especies singulares. En

el contexto actual de pérdida acelerada de biodiversidad, pueden funcionar como dispositivos de conservación *ex situ*, espacios de educación ambiental e infraestructuras de transferencia social del conocimiento botánico. La presencia física de una planta amenazada en un arboreto permite que el visitante la observe, la compare, la sitúe en una determinada historia evolutiva y la vincule a una región biogeográfica. Pero esa apropiación cognitiva no se produce automáticamente por el mero hecho de que la planta esté presente. Depende de las formas de mediación que la hagan interpretable: la señalización, las etiquetas, las visitas guiadas, los materiales divulgativos, la lengua empleada y, de forma muy particular, los nombres mediante los cuales esa planta se vuelve comunicable.

El Arboretum-Pinetum Lucus Augusti, situado en el entorno de Lugo, surge y se desarrolla en esta intersección entre colección vegetal, conservación *ex situ* y comunicación pública de la biodiversidad. Su orientación hacia las gimnospermas y otros linajes arbóreos de interés conservacionista lo ha llevado a reunir especies procedentes de contextos geográficos y evolutivos muy diversos, algunas de ellas amenazadas, relictas, escasamente representadas en colecciones vivas o apenas conocidas fuera de círculos especializados. Esta circunstancia convierte al arboreto en un espacio adecuado para reflexionar sobre un problema que, aunque pueda parecer menor, posee una notable relevancia comunicativa: ¿Cómo nombrar, en la lengua local, especies vegetales foráneas que no cuentan con una denominación vernácula asentada? ¿Debe mantenerse exclusivamente el nombre científico? ¿Conviene traducir de manera literal nombres comunes procedentes de lenguas de mayor circulación internacional? ¿Cómo deben tratarse denominaciones vernáculas ya existentes en otras lenguas cuando contienen analogías botánicamente imprecisas, como ocurre con formas del tipo *Wollemi pine*, *Chinese fir* o *Araucaria de China*? ¿Puede la denominación vernácula convertirse en una herramienta de educación perceptiva y no solo en una concesión a la familiaridad del público?

Este artículo se basa en las directrices denominativas aprobadas por la asociación responsable de la gestión del Arboretum-Pinetum Lucus Augusti, actualmente en fase inicial de implementación en la señalización, documentación y comunicación pública de la colección. En el marco de la práctica denominativa desarrollada en el arboreto, utilizamos el término **exofitónimos** para referirnos a los nombres vernáculos atribuidos, en una lengua determinada, a especies vegetales foráneas que no disponen de una denominación tradicional estabilizada en esa comunidad lingüística. La creación, adopción o adaptación de estos nombres no responde a una preocupación meramente terminológica, sino a una necesidad práctica generada por la comunicación botánica en contextos de conservación

ex situ. Los exofitónimos no constituyen una nomenclatura paralela a la científica, ni funcionan de manera aislada, sino como unidades de mediación integradas en géneros comunicativos concretos: etiquetas, paneles interpretativos, fichas de colección, visitas guiadas, catálogos o materiales didácticos. Dicha práctica debe evitar dos riesgos simétricos: por un lado, la opacidad de una comunicación exclusivamente técnica; por otro, la reproducción acrítica de categorizaciones populares vagas, analógicas o taxonómicamente engañosas. La lengua debe actuar como puente hacia una comprensión más diferenciada del mundo vegetal, no como reflejo y perpetuación de las limitaciones perceptivas del sentido común.

2. LOS ARBORETOS COMO ESPACIOS DE CONSERVACIÓN Y COMUNICACIÓN

Los arboretos han sido entendidos tradicionalmente como colecciones especializadas de árboles y otras plantas leñosas, organizadas con fines científicos, educativos, ornamentales o patrimoniales. Comparten con los jardines botánicos la condición de colecciones vivas, pero se distinguen de otros espacios ajardinados porque las plantas no se disponen únicamente con arreglo a criterios estéticos o paisajísticos, sino también en función de una lógica documental, taxonómica, geográfica, ecológica o conservacionista. Un arboreto no es una simple acumulación de árboles singulares: es una forma de ordenar, mantener, contextualizar y hacer legible una parte de la diversidad vegetal.

Esta dimensión resulta especialmente relevante en el contexto actual de crisis de biodiversidad. Numerosos árboles y arbustos se encuentran amenazados por la destrucción y fragmentación de sus hábitats, los cambios en los regímenes de fuego, la introducción de patógenos, la sobreexplotación, la expansión de especies invasoras o los efectos acumulativos del cambio climático. En muchos casos, además, se trata de especies de crecimiento lento, madurez tardía, baja capacidad de dispersión o distribución muy localizada.

En este contexto, los jardines botánicos y los arboretos han dejado de ser simples colecciones ornamentales o repertorios taxonómicos para convertirse en infraestructuras activas de documentación, investigación, conservación, educación ambiental y respuesta a los efectos del cambio global. Heywood ha subrayado este papel ampliado de los jardines botánicos como centros de recursos para la conservación vegetal en un escenario de transformación ambiental acelerada (Heywood, 2011). De manera complementaria, Oldfield y Newton han

destacado la importancia de una conservación integrada de especies arbóreas desde los jardines botánicos, combinando documentación, cultivo, manejo de colecciones vivas, apoyo a la conservación en el medio natural y eventual disponibilidad de material vegetal para restauración o refuerzo poblacional (Oldfield & Newton, 2012).

La conservación *in situ*, centrada en la protección de las especies dentro de sus hábitats naturales, continúa siendo la forma prioritaria y más completa de conservación. Ninguna colección cultivada puede sustituir la complejidad ecológica, genética y evolutiva de una población natural integrada en su ecosistema. Sin embargo, la conservación *ex situ* puede desempeñar una función complementaria cuando las poblaciones silvestres son pequeñas, están sometidas a amenazas severas o carecen de garantías suficientes de persistencia. Mantener ejemplares vivos fuera de su área natural permite conservar material genético, desarrollar conocimiento sobre germinación y cultivo, disponer de plantas para eventuales programas de refuerzo o reintroducción y dar visibilidad social a especies que de otro modo permanecerían prácticamente desconocidas.

A diferencia de los bancos de semillas o de otros sistemas de conservación de germoplasma, el arboreto conserva organismos vivos, duraderos, observables y espacialmente integrados en un recorrido. La planta no aparece solo como dato, muestra o registro, sino como presencia material: su crecimiento, su arquitectura, sus hojas, sus conos, su corteza y su evolución a lo largo de los años ofrecen una experiencia directa que puede convertirse en conocimiento.

Sin embargo, esta asociación entre observación e información científica no se produce de forma espontánea. Un visitante puede pasar junto a una especie amenazada sin advertir nada particularmente significativo si no dispone de claves para interpretarla. Puede verla como “un pino”, “un ciprés”, “un árbol raro” o simplemente como un elemento más del paisaje ajardinado. La función comunicativa del arboreto consiste precisamente en evitar que la diversidad botánica quede reducida a una percepción indiferenciada o a categorías vernáculos demasiado amplias. Para ello son necesarias diversas formas de mediación: etiquetas científicas, nombres vernáculos, paneles interpretativos, visitas guiadas, materiales docentes, información sobre el estado de conservación y relatos que conecten cada planta con su área de origen, su historia evolutiva y las amenazas que afectan a sus poblaciones naturales.

La señalización, las etiquetas y los materiales interpretativos desempeñan aquí un papel decisivo. Una etiqueta botánica puede ser concebida como un elemento puramente identificativo, reducido al nombre científico, la familia y la procedencia, pero también puede funcionar como un pequeño dispositivo de me-

diación. Cuando una etiqueta indica que una especie procede de Nueva Caledonia, de los bosques valdivianos, de la Patagonia, de China meridional o de Nueva Zelanda, proporciona al visitante una primera coordenada de comprensión. Del mismo modo, cuando se explica que una especie es relictas, amenazada, de distribución restringida o escasa en colecciones vivas, se modifica la manera en que el visitante la mira. La información no sustituye la experiencia perceptiva, pero la reorganiza.

Desde esta perspectiva, los arboretos pueden ser considerados espacios de educación de la percepción botánica. No se limitan a transmitir conocimientos ya elaborados, sino que ayudan a formar capacidades de distinción: enseñan a ver diferencias donde antes solo había semejanzas vagas, a percibir linajes evolutivos donde antes solo había “árboles” y a reconocer que las categorías populares de la vida cotidiana –pinos, cipreses, cedros, palmeras, helechos, arbustos– son útiles como punto de partida, pero insuficientes para comprender la diversidad real del mundo vegetal. Esta educación de la mirada puede vincularse con la idea de biofilia formulada por Edward O. Wilson, entendida como una afinidad humana hacia las formas de vida que puede alimentar una ética de conservación cuando se convierte en atención, conocimiento y experiencia significativa (Wilson, 1984).

Esta función adquiere especial importancia en el caso de las gimnospermas. Aunque muchas de ellas resultan familiares en el paisaje europeo –pinos, abetos, cipreses, tejos, enebros–, su diversidad global es mucho más amplia que la representada por los géneros más conocidos. Existen coníferas relictas, especies insulares de distribución reducida, linajes vinculados a bosques templados australes, podocarpáceas de aspecto poco familiar para el público europeo, araucariáceas con historias evolutivas muy antiguas y cupresáceas adaptadas a condiciones ecológicas particulares. Un arboreto orientado hacia estos grupos puede mostrar de forma tangible que las gimnospermas no constituyen un conjunto homogéneo de “árboles resinosos”, sino una parte compleja, antigua, diversa y amenazada de la biodiversidad vegetal.

De ahí que los arboretos puedan ser entendidos también como espacios de traducción en un sentido amplio. Traducen conocimiento botánico especializado a formatos comprensibles; traducen problemas globales de conservación a experiencias locales; traducen especies remotas en presencias observables; y traducen clasificaciones científicas en recorridos, nombres, imágenes y relatos. Esta traducción no debe entenderse como simplificación banal, sino como mediación responsable. En este proceso, los nombres vernáculos pueden facilitar el acceso y la memoria, pero también consolidar analogías imprecisas si no se integran en una estrategia comunicativa consciente.

3. EL ARBORETUM-PINETUM LUCUS AUGUSTI: UNA COLECCIÓN VIVA ORIENTADA A LA CONSERVACIÓN *EX SITU*

El Arboretum-Pinetum Lucus Augusti es una colección viva situada en el entorno de Lugo, en un contexto climático atlántico que permite el cultivo al aire libre de numerosas especies leñosas procedentes de regiones templadas, subtropicales húmedas y montañosas de diferentes partes del mundo. Desde su origen, el proyecto ha tenido una orientación botánica y conservacionista, con especial atención a las gimnospermas y, dentro de ellas, a especies raras, relictas, amenazadas o escasamente representadas en colecciones vivas. Esta orientación no responde únicamente a un interés coleccionista, sino a la voluntad de construir un espacio donde especies alejadas de la experiencia vegetal ordinaria del público gallego puedan ser cultivadas, documentadas, observadas y comunicadas.

La elección de las gimnospermas como uno de los ejes principales del arboreto posee una justificación científica, educativa

y comunicativa. En el paisaje europeo, la experiencia cotidiana de estos grupos suele quedar reducida a pinos, cipreses, abetos, tejos o enebros. Sin embargo, su diversidad real incluye araucariáceas australes, podocarpáceas de bosques húmedos del hemisferio sur, cupresáceas insulares o fragmentarias, especies relictas de Asia oriental, coníferas mediterráneas amenazadas y linajes que conservan, en su morfología y en su distribución actual, la memoria de historias evolutivas muy antiguas. Una colección centrada en estas especies permite mostrar que el mundo de las coníferas y de las gimnospermas es mucho más complejo que la imagen simplificada que suele ofrecer la experiencia cotidiana.

El arboreto se concibe, en este sentido, como un espacio de conservación *ex situ*, pero también como un lugar de interpretación. Mantener ejemplares vivos fuera de su medio natural implica seleccionar especies de interés, procurar su correcta identificación, conocer sus requerimientos ecológicos, registrar su evolución, observar su adaptación



Figura 1. Zona central del arboreto.



Figura 2. Ejemplar de *Wollemia nobilis*.

al clima local y, cuando sea posible, integrarlas en redes de intercambio, documentación o cooperación conservacionista. Este trabajo posee una dimensión material evidente, pero también una dimensión documental, comunicativa y terminológica: cada planta necesita ser situada en una red de información que la haga científicamente identificable y socialmente interpretable.

En la colección se encuentran especies que permiten ilustrar esta doble dimensión. La presencia de *Wollemia nobilis*, una conífera australiana conocida a partir de poblaciones naturales extremadamente restringidas, permite explicar el valor conservacionista de las especies relictas y el papel que pueden desempeñar las colecciones vivas en su preservación, en la línea de la concepción del Arboretum-Pinetum Lucus Augusti como refugio climático para linajes arbóreos antiguos y amenazados (vid. Pérez-Rodríguez, 2024). *Pinus torreyana*, especie norteamericana de distribución natural muy limitada, permite abordar problemas de rareza, erosión genética y conservación de poblaciones marginales. *Fitzroya cupressoides* y *Pilgerodendron uviferum* remiten a los bosques templados australes de Sudamérica y a la singularidad biogeográfica de los ambientes valdivianos y patagónicos. *Glyptostrobus pensilis*, conífera relictas de Asia oriental vinculada a ambientes húmedos y poblaciones naturales muy reducidas, permite introducir la relación entre historia evolutiva, refugios biogeográficos, pérdida de hábitat y conservación. Las podocarpaceas, por su parte, muestran una diversidad de formas y ecologías poco familiar para el público europeo, precisamente porque desafían la asociación inmediata entre “conífera” y los modelos morfológicos más conocidos de pinos, abetos o cipreses.

La colección incluye también especies procedentes de áreas insulares o biogeográficamente singulares, como Nueva Caledonia, Nueva Zelanda, Tasmania u otras regiones del hemisferio sur. Estas procedencias no son meros datos geográficos: remiten a territorios de elevada originalidad florística, a procesos evolutivos prolongados en condiciones de aislamiento y a amenazas contemporáneas muy concretas. Cuando una especie de esos territorios crece en un arboreto gallego, una planta procedente de un contexto ecológico remoto se vuelve accesible a la observación local. El arboreto convierte así una geografía distante en una experiencia perceptiva inmediata.

Esta dimensión resulta especialmente importante porque muchas especies amenazadas carecen de presencia cultural efectiva fuera de los ámbitos especializados. Pueden figurar en listas rojas, bases de datos de jardines botánicos o publicaciones científicas, pero no forman parte del repertorio de imáge-

nes, nombres y referencias que el público general asocia a la pérdida de biodiversidad. Muchas de estas especies no solo son biológicamente vulnerables, sino también comunicativamente invisibles. El arboreto intenta reducir esa invisibilidad haciendo que la planta pueda ser vista, nombrada, situada y explicada.

Por esta razón, el Arboretum-Pinetum Lucus Augusti no puede entenderse únicamente como una colección acumulativa de rarezas botánicas. Su valor depende también de la coherencia con que esas especies se seleccionan, se ordenan, se documentan y se presentan. Cuando las especies se articulan en torno a criterios reconocibles –gimnospermas amenazadas, coníferas australes, linajes relictos, especies insulares, árboles de distribución restringida–, la colección adquiere una capacidad interpretativa mucho mayor: no solo muestra ejemplares, sino relaciones.

El trabajo desarrollado en el arboreto se vincula también con una concepción local de la conservación global. Un arboreto gallego puede cultivar especies de Australia, China, Nueva Caledonia, Norteamérica, Sudamérica o Nueva Zelanda, pero las cultiva ante una comunidad local concreta, con sus lenguas, sus referencias culturales, sus instituciones educativas y sus formas propias de relación con el paisaje. La conservación *ex situ* se produce así en una doble escala: global por los problemas y las especies que aborda; local por el espacio social en que esos problemas se vuelven visibles. En este punto, la comunicación deja de ser una tarea complementaria y se convierte en condición de posibilidad de la función pública del arboreto. Esa comunicación no se limita a traducir información científica ya disponible: exige decidir cómo nombrar especies poco familiares, cómo presentarlas en la lengua local y cómo evitar que su singularidad quede absorbida por categorías vernáculos demasiado generales.

En este marco, la asociación responsable de la gestión del Arboretum-Pinetum Lucus Augusti ha aprobado unas directrices para la creación, adopción y uso de exotónimos en la señalización, la documentación de la colección y los materiales divulgativos del arboreto. Estas directrices, actualmente en fase de implementación progresiva, buscan dotar de coherencia a la denominación vernácula de especies foráneas, evitar calcos o analogías taxonómicamente engañosas y reforzar la función del gallego como lengua de mediación científica y ambiental. El presente artículo recoge, contextualiza y desarrolla los fundamentos de esas directrices, con el objetivo de convertir una experiencia aplicada de gestión comunicativa en una propuesta transferible y útil para otros espacios de conservación *ex situ*.

4. COMUNICAR LA BIODIVERSIDAD: MULTILINGÜISMO, LENGUA LOCAL Y MEDIACIÓN CIENTÍFICA

La comunicación pública de la biodiversidad no se produce en un vacío lingüístico. Toda práctica de señalización, interpretación o divulgación presupone decisiones sobre las lenguas utilizadas, los públicos destinatarios, los repertorios terminológicos movilizados y las formas en que el conocimiento científico se hace accesible dentro de una comunidad concreta. En una colección viva, estas decisiones no son meramente instrumentales: la lengua en que se nombra una planta, se explica su procedencia, se indica su estado de conservación o se narra su singularidad evolutiva forma parte de la manera en que esa planta se integra en el horizonte cultural del visitante.

El Arboretum-Pinetum Lucus Augusti asume esta dimensión mediante una opción explícita por el multilingüismo, pero también mediante la atribución de una función primaria al gallego como lengua de mediación local. Esta opción responde a una razón elemental: el arboreto está situado en Galicia y se dirige, en primer lugar, a una comunidad que posee una lengua propia. Si la conservación *ex situ* pretende convertirse en cultura pública de la biodiversidad, no puede prescindir de la lengua a través de la cual una parte sustancial de esa comunidad nombra, recuerda, interpreta o puede llegar a apropiarse socialmente del conocimiento.

Esta territorialización no implica cierre localista. Al contrario, resulta particularmente significativa en un arboreto, donde especies procedentes de regiones muy diversas del mundo son cultivadas y comunicadas en un contexto gallego. Las plantas remiten a geografías lejanas, a historias evolutivas de escala planetaria y a problemas de conservación que trascienden cualquier frontera política o lingüística; pero su comunicación efectiva se produce ante visitantes concretos, en un lugar determinado y a través de lenguas determinadas. El multilingüismo del arboreto responde precisamente a esta doble condición: la biodiversidad es global, pero su comprensión pública siempre se realiza desde situaciones comunicativas locales.

El uso preferente del gallego permite reforzar una idea que a menudo permanece implícita: las lenguas minorizadas o socialmente subordinadas no deben quedar restringidas a ámbitos familiares, literarios, patrimoniales o afectivos, sino que pueden funcionar también como lenguas de ciencia, educación ambiental y comunicación especializada. Señalar una colección botánica en gallego significa mostrar que esta lengua posee capacidad para nombrar especies, describir procesos ecológicos, transmitir información taxonómica y participar en la elaboración social del conocimiento científico. En la medida en que la diversidad lingüística constituye también

una forma de diversidad cultural y de memoria colectiva, su presencia en ámbitos científicos y educativos contribuye a mantener activos repertorios de interpretación del mundo que no deberían quedar desplazados por las lenguas dominantes (Crystal, 2000).

Esta dimensión sociolingüística afecta no solo a la lengua utilizada, sino también a la orientación gráfica y cultural de las formas adoptadas. Unseth ha señalado que la elección de sistemas de escritura presenta paralelismos significativos con la elección de lenguas, en la medida en que ambas participan en procesos de identificación, diferenciación, legitimación y orientación cultural (Unseth, 2005). En el caso gallego, esta observación resulta especialmente pertinente: optar por unas formas denominativas u otras no constituye una decisión puramente técnica, sino también una manera de situar la comunicación científica en un determinado espacio lingüístico y cultural.

Ahora bien, esta opción plantea problemas específicos. Muchas de las especies cultivadas en el Arboretum-Pinetum Lucus Augusti no cuentan con nombres vernáculos consolidados. En algunos casos existen denominaciones procedentes del inglés, del francés, de lenguas indígenas o de tradiciones hortícolas internacionales, pero su incorporación acrítica puede producir resultados poco satisfactorios. Nombres como **Huon pine** (*Lagarostrobos franklinii*), **Japanese Schirmtanne** (*Sciadopitys verticillata*), **cèdre du Japon** (*Cryptomeria japonica*) o **abete d'acqua** (*Metasequoia glyptostroboides*) muestran que las lenguas de mayor circulación científica u hortícola tampoco están libres de analogías vernáculos imprecisas. La lengua local se enfrenta aquí a un desafío creativo y crítico: debe nombrar realidades vegetales que no formaban parte de su experiencia tradicional, pero debe hacerlo sin reproducir automáticamente categorías procedentes de otras lenguas.

En este punto adquiere relevancia la perspectiva gallego-portuguesa adoptada en la práctica comunicativa del arboreto. Dicha orientación se fundamenta en la continuidad histórica y estructural entre el gallego y el portugués, y permite considerar el espacio lusófono como un repertorio de referencia especialmente valioso para la elaboración de nombres vernáculos de especies foráneas. Esta perspectiva amplía las posibilidades denominativas del gallego sin someterlo automáticamente a los modelos del castellano, del inglés o de otras lenguas de mediación internacional. Permite contrastar alternativas, recuperar denominaciones ya existentes en el portugués, adaptar formas de manera coherente y construir nombres inteligibles, lingüísticamente naturales y botánicamente menos distorsivos.

Esta estrategia no significa que todo nombre portugués deba ser adoptado automáticamente, ni que la tradición lusófona proporcione siempre la solución más adecuada. El criterio no puede ser puramente etimológico ni puramente identitario. Debe ser comunicativo, terminológico y pedagógico. Hay que valorar si el nombre existente es transparente para el público destinatario, si evita analogías engañosas, si respeta razonablemente la singularidad taxonómica de la especie, si contiene una referencia geográfica útil, si se integra bien en una serie denominativa y si puede convivir con el término científico sin generar confusión. La orientación gallego-portuguesa funciona, por tanto, como marco de referencia prioritario, no como mecanismo automático de sustitución.

La comunicación científica desarrollada en el arboreto se sitúa así en una triple interfaz: entre ciencia y sociedad, entre biodiversidad global y territorio local, y entre nomenclatura botánica internacional y lengua vernácula. No basta con traducir palabras; hay que orientar percepciones. No llega con acumular nombres; hay que construir coherencia. No es suficiente con identificar especies; hay que hacerlas culturalmente visibles. En esta tarea, el multilingüismo, el empleo preferente del gallego y la perspectiva gallego-portuguesa no constituyen elementos añadidos, sino componentes de una misma estrategia de mediación científica.

5. NOMBRAR PARA CONSERVAR: LOS EXOFITÓNIMOS COMO HERRAMIENTAS DE EDUCACIÓN BOTÁNICA

La comunicación botánica en un arboreto no se agota en la identificación taxonómica de los ejemplares. El nombre científico es imprescindible, pero no siempre se basta por sí solo para establecer una relación cognitivamente eficaz entre la planta y el visitante. Una especie puede estar correctamente determinada, bien documentada y adecuadamente señalizada desde el punto de vista técnico y, sin embargo, continuar siendo prácticamente opaca para el público no especializado. En tales casos, la planta está identificada, pero no necesariamente comunicada. Existe como entidad botánica, pero no acaba de integrarse en el repertorio perceptivo, denominativo y cultural de quienes la observan.

5. 1. Necesidad y definición operativa

La necesidad de considerar los exofitónimos aparece allí donde la conservación *ex situ* se encuentra con la comunicación pública. Mientras una planta permanece en un ámbito estrictamente técnico, puede bastar con su nombre científico,

su número de accesión, su procedencia y su documentación interna. Pero cuando esa planta forma parte de un recorrido interpretativo, de una etiqueta, de una visita guiada, de una actividad educativa o de un material divulgativo, surge la necesidad de hacerla accesible para públicos no especializados. Desde una perspectiva pragmática de los géneros especializados, como la desarrollada por Susanne Göpferich para los textos de ciencia y tecnología, esta diferencia resulta relevante: no se comunica del mismo modo en un registro documental interno, en una etiqueta botánica, en un panel interpretativo o en un texto de divulgación (Göpferich, 1995).

En este marco, el nombre vernáculo no debe entenderse únicamente como una unidad léxica aislada, sino como un componente funcional de esos géneros. En una ficha interna, el nombre científico puede bastar para garantizar la identificación taxonómica; en una etiqueta, el nombre vernáculo facilita el reconocimiento inicial; en una visita guiada o en un material didáctico, ayuda a fijar la memoria del visitante e integrar la especie en una red de conocimientos más amplia. El nombre científico sigue siendo necesario, pero requiere a menudo una mediación vernácula que facilite el reconocimiento, la memoria y la inserción cultural de la especie.

En la práctica denominativa desarrollada en el Arboretum-Pinetum Lucus Augusti, utilizamos el término **exofitónimos** para referirnos a los nombres vernáculos atribuidos, en una lengua determinada, a especies vegetales foráneas que no disponen de una denominación tradicional estabilizada en esa comunidad lingüística. El término tiene una función descriptiva y operativa: permite designar un problema concreto surgido de la comunicación botánica en una colección viva que reúne especies procedentes de contextos geográficos, ecológicos y culturales muy diversos. Los exofitónimos no constituyen una nomenclatura paralela a la científica, sino unidades denominativas de alta condensación informativa dentro de géneros mayores: etiquetas, fichas, paneles, guías, catálogos o materiales educativos.

Desde una perspectiva semiótica, esta función no puede reducirse a la simple sustitución del nombre científico por una forma más familiar. Nombrar una especie implica activar conocimientos, asociaciones y expectativas que orientan la interpretación del referente. En este sentido, la noción de enciclopedia desarrollada por Eco resulta útil para comprender que el significado de una denominación no se agota en su definición, sino que remite a una red cultural de saberes, categorías y usos socialmente compartidos (Eco, 1984). Por ello, un exofitónimo eficaz no solo debe ser lingüísticamente adecuado o fácilmente recordable; debe también activar asociaciones pertinentes y evitar aquellas que puedan conducir a una interpretación taxonómica o culturalmente engañosa.

Nombre científico, mediación vernácula e interpretación

Modelo de mediación denominativa en una colección botánica



Figura 3. Modelo de relación entre nombre científico, exofitónimo, nombres secundarios e interpretación pública.

Esta situación no debe interpretarse como una deficiencia de la lengua, sino como una consecuencia normal de la relación entre léxico y experiencia histórica. Las lenguas desarrollan nombres para aquello que sus hablantes conocen, usan, cultivan o integran en su mundo social. Cuando una comunidad no ha convivido con una especie determinada, no resulta extraño que carezca de una denominación popular para ella. La llegada de esa especie a una colección viva crea una nueva necesidad de referencia: el arboreto amplía el horizonte léxico al introducir en la experiencia local realidades botánicas procedentes de otros territorios.

Los exofitónimos poseen, por ello, una naturaleza intermedia. No son nombres científicos, porque no aspiran a la precisión universal ni a la estabilidad regulada de la nomenclatura botánica; pero tampoco deberían ser invenciones arbitrarias ni simples traducciones mecánicas de denominaciones disponibles en otras lenguas. Su función es vernácula, comunicativa y educativa, pero debe ejercerse en coordinación con el nombre científico, no en sustitución de él. El nombre científico identifica con precisión; el exofitónimo aproxima, orienta y ayuda a recordar. Nombrar una especie que no formaba parte de la experiencia histórica de una comunidad implica también un componente creativo: no crea la realidad biológica de la planta, pero sí contribuye a construir una realidad comunicativa en torno a ella, haciéndola visible, explicable y culturalmente integrable.

5. 2. Motivación léxica y percepción botánica

Si la perspectiva pragmática de los géneros especializados permite situar los exofitónimos dentro de etiquetas, fichas,

paneles, guías o materiales didácticos, la semántica léxica permite analizar su estructura interna como nombres. En este punto resulta útil recuperar la reflexión clásica de Stephen Ullmann sobre la motivación del signo lingüístico (Ullmann, 1962). Aunque la relación entre significante y significado sea, esencialmente, arbitraria, el léxico no funciona como una simple acumulación de unidades aisladas. Las palabras se integran en redes de relaciones formales, semánticas, culturales y cognitivas que permiten a los hablantes asociar nuevos referentes con materiales lingüísticos ya disponibles.

Desde esta perspectiva, puede distinguirse entre unidades inmotivadas y unidades motivadas. Las primeras apenas orientan la interpretación del referente; las segundas permiten inferir algún aspecto de él a partir de su estructura o de las asociaciones que activan.

Para el análisis de los exofitónimos resulta especialmente relevante la diferencia entre motivación sintagmática y motivación paradigmática. La primera construye la interpretabilidad del nombre a partir de las relaciones internas entre sus componentes; la segunda se apoya en asociaciones léxicas o semánticas con unidades ya disponibles. En los nombres botánicos, la motivación sintagmática suele manifestarse mediante la combinación de una base denominativa con caracterizadores geográficos, morfológicos, ecológicos o culturales. La motivación paradigmática, en cambio, corresponde a relaciones analógicas, como la metáfora o la metonimia.

Esta distinción no tiene aquí un interés puramente descriptivo. En un arboreto, la forma de motivación de un nombre condiciona la manera en que el visitante interpreta la planta. Un exofitónimo puede proporcionar una primera orientación geográfica, morfológica o taxonómica, pero también puede reducir una especie desconocida a una categoría familiar, cómoda y, en ocasiones, imprecisa. Por ello, la motivación léxica debe ser considerada como una dimensión de la mediación científica: no se trata únicamente de escoger nombres breves o aparentemente naturales, sino de valorar qué información incorporan, qué asociaciones activan y qué tipo de percepción botánica favorecen.

Los procedimientos de motivación sintagmática construyen una denominación mediante la combinación de varios elementos. En nombres como **wolémia-das-Montanhas-Azuís** (*Wollemia nobilis*), **calitropse-da-Nova-Caledónia** (*Neocallitropsis pancheri*), **fitzroia patagónica** (*Fitzroya cupressoides*), **cataia china** (*Cathaya ar-*



Figura 4. Rótulo de *Pinus montezumae*, en la zona ampliada del arboreto.

gyrophylla) o **dacricarpo-da-Nova-Zelândia** (*Dacrycarpus dacrydioides*), el nombre no depende de una analogía global con una categoría vegetal ya conocida, sino de la combinación de una base denominativa con un elemento caracterizador. Esa base puede proceder del término científico, de una forma ya vernacularizada o de un hiperónimo botánicamente adecuado; el segundo elemento puede indicar procedencia, región biogeográfica, rasgo morfológico, hábitat, color, uso, descubridor u otra característica relevante. Otros nombres, como **guarda-sol japonês** (*Sciadopitys verticillata*), **folha-de-pente boliviana** (*Pectinopitys exigua*) o **ramiplano oriental** (*Platycladus orientalis*), muestran que la motivación sintagmática también puede construirse mediante compuestos internamente motivados, en los que la relación entre los componentes orienta la interpretación perceptiva o funcional del referente.

Los procedimientos de motivación paradigmática, por su parte, se basan en asociaciones con unidades ya disponibles. Su eficacia puede ser grande, porque permiten asimilar un referente nuevo a partir de otro ya conocido o culturalmente asociado. La metáfora, cuando funciona adecuadamente, esta-

blece una relación transcontextual: desplaza un nombre desde un dominio de experiencia a otro, manteniendo visible la distancia entre ambos. La metonimia no exige necesariamente esa distancia entre dominios, sino que se apoya en relaciones de contigüidad dentro de un mismo campo referencial, como cuando una planta se nombra por un rasgo saliente, por una parte característica, por un uso, por un producto asociado o por su procedencia. En ambos casos, la motivación facilita la comprensión del referente, pero debe evitar que la asociación se convierta en una falsa pertenencia categorial.

La relevancia de la metáfora en este campo no debe entenderse como un simple recurso ornamental. Desde la perspectiva desarrollada por Lakoff y Johnson, las metáforas participan en la estructuración de la experiencia y permiten comprender un dominio a partir de otro (Lakoff & Johnson, 1980). En la denominación botánica, esta capacidad puede resultar especialmente eficaz, porque ayuda a aproximar especies desconocidas a partir de formas, usos o categorías ya familiares; pero también puede producir equívocos cuando la semejanza metafórica pasa a interpretarse como pertenencia categorial.

Muchos nombres de plantas proceden de analogías con especies conocidas, pero esas analogías no siempre conservan una dimensión transcontextual clara. Si una conífera que no pertenece al género *Pinus* recibe el nombre de “pino”, si una cupresácea sudamericana recibe el nombre de “alerce”, si una especie de *Cunninghamia* se denomina “abeto” o “araucaria”, o si una proteácea chilena recibe el nombre de “avellano”, la relación puede dejar de ser interpretada como analogía y pasar a funcionar como clasificación popular. El visitante no siempre percibe que el nombre actúa por semejanza; puede entender, sencillamente, que la planta pertenece al grupo designado por el nombre común. Desde una perspectiva de semántica léxica, el problema no reside únicamente en la exactitud referencial del nombre, sino en la categoría que este activa para el hablante. Los nombres vernáculos orientan la interpretación mediante asociaciones, prototipos y extensiones de significado; pueden facilitar la comprensión, pero también desplazar la percepción hacia clases botánicamente inadecuadas (vid. Geeraerts, 2010).

Una escena observada hace años en un conocido jardín botánico vigués ilustra bien este riesgo. Un grupo escolar se detuvo ante un ejemplar etiquetado como **carballo australiano**, y la profesora que lo dirigía aprovechó la ocasión para explicar a los niños que el roble era el árbol que simbolizaba la identidad de Galicia. Sin embargo, el ejemplar correspondía en realidad a *Grevillea robusta*, una proteácea sin relación taxonómica con *Quercus*. El nombre común no fue interpretado como una analogía aproximativa, sino como una clasificación. El caso

muestra que las denominaciones vernáculos no solo facilitan el reconocimiento; también pueden orientar de manera errónea si la distancia entre analogía y pertenencia categorial no queda suficientemente marcada.

Esto no significa que las denominaciones metafóricas o analógicas deban ser rechazadas de forma general. Muchas forman parte legítima de la historia de las lenguas. Cuando una comunidad lingüística entra en contacto con una flora nueva, resulta normal que recurra a nombres ya disponibles para designar especies que presentan semejanzas de porte, hoja, fruto, madera o uso. En el español de Chile, **alerce** para *Fitzroya cupressoides* o **avellano chileno** para *Gevuina avellana* no son simples errores denominativos, sino resultados históricos de la adaptación del idioma a un medio vegetal diferente. Algo semejante ocurre con formas como **Chinese fir** en inglés o **Araucaria de Chine** en francés para *Cunninghamia lanceolata*. El problema no reside en la existencia histórica de esos nombres, sino en su posible traslado acrítico a otros contextos donde activan asociaciones distintas.

De ahí la necesidad de distinguir entre nombres vernáculos tradicionalmente estabilizados y denominaciones nuevas creadas en contextos de comunicación científica. Los primeros deben ser reconocidos como hechos lingüísticos y culturales, incluso cuando su motivación sea taxonómicamente imprecisa. Los segundos, en cambio, deberían someterse a criterios más exigentes, precisamente porque todavía existe margen para evitar nuevas confusiones. Si una comunidad ya denomina **alerce** a *Fitzroya cupressoides*, el arboreto puede reconocer ese uso, aunque debe contextualizarlo. Si se trata de nombrar en gallego una especie como *Wollemia nobilis*, no parece necesario introducir el calco **pinheiro-de-Wollemi** cuando existen alternativas menos distorsivas. Del mismo modo, ante una especie como *Cunninghamia lanceolata*, resulta preferible valorar formas como **cunninghamia lanceolada** o **cunninghamia-da-China** antes que reproducir automáticamente analogías del tipo “abeto chino” o “araucaria china”.

La diferencia fundamental puede formularse así: la metáfora es admisible cuando funciona como verdadera metáfora, es decir, cuando mantiene una distancia reconocible entre el dominio de origen y el dominio de aplicación. Cuando esa distancia se pierde, la metáfora deja de actuar como recurso de mediación y puede convertirse en falsa categorización. En esos casos, especialmente cuando no hay un uso vernáculo tradicional que deba ser respetado, conviene preferir procedimientos de motivación sintagmática o formas derivadas del nombre científico que permitan nombrar la especie sin absorberla en categorías botánicas familiares pero inexactas.

5. 3. Criterios de creación, adopción y adaptación

A partir de las consideraciones anteriores, resulta posible formular algunos criterios prácticos para la creación, adopción o adaptación de exofitónimos en un arboreto orientado a la conservación *ex situ* y a la comunicación pública de la biodiversidad. Estos criterios no pretenden constituir una norma cerrada ni una nomenclatura alternativa a la científica. Su función es evitar que la denominación vernacula de especies foráneas quede sometida a la improvisación, al calco mecánico o a la reproducción acrítica de categorías botánicas imprecisas, sin excluir por ello una creatividad denominativa guiada por la transparencia, la coherencia y la utilidad educativa.

El primer principio consiste en mantener la primacía identificativa del nombre científico. Todo exofitónimo debe entenderse como una forma de mediación, no como sustituto del nombre botánico. El nombre vernáculo facilita la comunicación, pero no puede asumir por sí solo la función taxonómica. Por ello, en la señalización de un arboreto, debe aparecer siempre en coordinación con el nombre científico y, cuando sea pertinente, con la familia, la procedencia geográfica o el estado de conservación.

Un segundo principio consiste en distinguir entre nombres tradicionalmente asentados y denominaciones nuevas creadas en contextos de comunicación científica. Los primeros deben ser reconocidos como hechos lingüísticos y culturales, incluso cuando su motivación sea taxonómicamente imprecisa. Nombres como **alerce chileno** para *Fitzroya cupressoides*, **avellano chileno** para *Gevuina avellana* o **Chinese fir** para *Cunninghamia lanceolata* no son simples errores, sino resultados de tradiciones denominativas concretas. Ahora bien, reconocerlos no significa convertirlos automáticamente en nombres preferentes en otro contexto lingüístico. Cuando puedan inducir una categorización equívoca, conviene jerarquizarlos como nombres secundarios y explicarlos.

Un tercer principio consiste en evitar la introducción de nuevas analogías engañosas cuando no exista una tradición vernacula que las justifique. El hecho de que una especie sea conocida como *Wollemi pine*, *Huon pine*, *white pine*, *Chinese fir* o *Araucaria de Chine* no implica que esas formas deban traducirse literalmente. El calco transmite familiaridad, pero puede importar una categorización taxonómicamente distorsionada.

Un cuarto principio consiste en favorecer procedimientos de motivación transparente. El exofitónimo puede apoyarse en la adaptación vernacula del nombre científico, en un rasgo morfológico saliente, en una referencia ecológica, en una pro-



Figura 5. Rótulo y ejemplar de *Agathis australis*.

cedencia biogeográfica o en una imagen perceptiva eficaz. Formas como **ramiplano oriental**, **halocarpa-das-turfeiras**, **afrocarpo falcado**, **guarda-sol japonês** o **folha-de-pente boli-viana** muestran que el nombre puede ofrecer al visitante una primera clave de interpretación. La motivación no tiene que ser total ni técnicamente exhaustiva; basta con que oriente sin distorsionar.

Un quinto principio consiste en utilizar la referencia geográfica o biogeográfica solo cuando sea informativa y distintiva. Decir que una planta es patagónica, neocaledonia, andina, japonesa, californiana o de China meridional puede ayudar a asociarla a una historia evolutiva, a un paisaje y a unas condiciones ecológicas. Pero el caracterizador geográfico no debe emplearse de manera automática: puede ser insuficiente si varias especies próximas comparten procedencia. Así, **douglásia-de-Forrest** distingue mejor *Pseudotsuga forrestii* que una forma genérica como **douglásia chinesa**, y **dacrídio araucarióide** individualiza mejor *Dacrydium araucarioides* que **dacrídio neocaledónio**.

Un sexto principio consiste en valorar cada nombre dentro de una serie denominativa interna. Un arboreto no nombra ejemplares aislados, sino especies que se comparan y se interpretan conjuntamente. Series como **douglásia comum** (*Pseudotsuga menziesii*), **douglásia azul** (*P. menziesii* var. *glauca*), **douglásia macrocónica** (*P. macrocarpa*), **douglásia chinesa** (*P. chinensis*) y **douglásia-de-Forrest** permiten mantener continuidad léxica y capacidad distintiva. De modo semejante, **ramiplano oriental** (*Platycladus orientalis*) y **ramiplaninho siberiano** (*Microbiota decussata*) expresan una semejanza perceptiva, pero marcan también diferencias de porte e identidad botánica.

Un séptimo principio consiste en atender a las interferencias semánticas de la lengua receptora. Una forma derivada del nombre científico puede ser formalmente correcta y, sin embargo, resultar poco adecuada si activa asociaciones dominantes ajenas al referente botánico. **Microbiota**, por ejemplo, reproduce directamente el género *Microbiota*, pero en el uso contemporáneo remite de inmediato al conjunto de microorganismos de un organismo o ambiente. En tal caso, **ramiplaninho siberiano** puede resultar más eficaz que **microbiota siberiana**, porque evita una interferencia semántica fuerte y ofrece una motivación perceptiva vinculada al porte bajo y a los ramos achatados de la planta.

Un octavo principio consiste en admitir analogías controladas cuando expresan semejanza sin producir falsa clasificación. No toda analogía es engañosa. El problema aparece cuando el nombre induce pertenencia categorial indebida. Recursos como **-oide** o bases prefijadas como **para-** pueden cumplir una función didáctica si se mantienen subordinados al nombre científico y a una explicación clara. Formas como **tsugoide chinesa** (*Nothotsuga longibracteata*), **dacrídio araucarióide** o **paratuia japonesa** (*Thujopsis dolabrata*) indican semejanza o proximidad perceptiva sin afirmar identidad taxonómica.

Finalmente, conviene distinguir entre nombre preferente, nombres secundarios y nota explicativa. Una señalización botánica eficaz no tiene por qué excluir denominaciones tradicionales, comerciales, internacionales o locales, pero debe jerarquizarlas. El nombre preferente responde a los objetivos comunicativos del arboreto; los nombres secundarios aportan contexto; y la nota explicativa aclara relaciones taxonómicas, procedencias y posibles equívocos. Así, **fitzroia patagónica** puede ir acompañada de la indicación de que *Fitzroya cupressoides* es conocida como **alerce chileno** o **alerce patagónico**, aunque no pertenece al género *Larix*; **dacricarpo-da-Nova-Zelândia** puede mencionar el nombre maorí **kahikatea**, y **lagarostróbia huonense** puede recoger el nombre inglés **Huon pine** sin traducirlo como **pinheiro**.

Todos estos criterios remiten a una exigencia común: procurar coherencia interna dentro de la colección. Los exofitónimos no deben crearse de manera aislada, sino como parte de un sistema denominativo. Esta coherencia no busca reproducir la sistemática científica, sino evitar que la propia señalización contribuya a la confusión. En una colección centrada en gimnospermas, puede resultar pedagógicamente útil que **pinheiro** se reserve para *Pinus*, **larício** para *Larix*, **abeto** para *Abies*, **araucária** para *Araucaria*, y que formas como **wolémia**, **fitzroia**, **douglásia**, **dacricarpo**, **afrocarpo** o **cunninghamia** permitan reconocer otros linajes menos familiares.

6. ALGUNOS EJEMPLOS APLICADOS

Las directrices denominativas del Arboretum-Pinetum Lucus Augusti no pretenden producir una lista cerrada e inamovible de nombres, sino establecer criterios de decisión aplicables a casos diversos. La tabla siguiente recoge una muestra representativa de esos criterios. Se trata de una versión reducida de la tabla disponible en la página web del Arboretum-Pinetum Lucus Augusti¹, seleccionada aquí para mostrar cómo se combinan identificación científica, mediación vernácula, transparencia comunicativa y prevención de analogías taxonómicamente engañosas.

Los ejemplos muestran que no existe un único procedimiento válido para todos los casos. Algunos exofitónimos se construyen mediante la adaptación del género científico; otros recurren a una referencia geográfica, ecológica o cultural, y otros exigen una creación vernácula nueva para evitar calcos engañosos. Lo decisivo es mantener una misma lógica comunicativa: identificar con precisión, orientar la percepción del visitante y distinguir entre nombre preferente, nombres secundarios y nota explicativa. Así, denominaciones como **Wollemi pine**, **Huon pine**, **kahikatea**, **alerce chileno** o **hinoki cypress** pueden conservarse como información contextual, histórica, comercial o etnobotánica, pero no deben ocupar automáticamente el lugar del exofitónimo preferente cuando trasladan a la lengua local una categoría poco adecuada. En una colección viva, la función del nombre no es solo designar: es ayudar a mirar correctamente.

¹ <https://tinyurl.com/arboretum-lugo>

7. CONCLUSIONES

La experiencia del Arboretum-Pinetum Lucus Augusti permite defender que la conservación *ex situ* no puede reducirse al mantenimiento material de ejemplares vivos fuera de su área natural. Esa dimensión es imprescindible: sin plantas correctamente identificadas, cultivadas, documentadas y conservadas, no existe una verdadera colección viva con valor conservacionista. Sin embargo, en un arboreto orientado a la educación ambiental y a la comunicación pública de la biodiversidad, la conservación alcanza su pleno sentido social cuando las especies conservadas se vuelven también visibles, inteligibles y culturalmente significativas.

A lo largo de este artículo se ha intentado mostrar que los arboretos pueden funcionar como espacios de mediación entre biodiversidad, conocimiento científico y sociedad. Su valor no reside únicamente en reunir especies singulares, sino en hacerlas recorribles, comparables, observables y narrables. Una colección viva permite que el visitante establezca una relación directa con organismos que, de otro modo, quizá solo conocería como nombres latinos, fotografías, entradas en bases de datos o categorías abstractas de una lista roja. Esa presencia material crea una posibilidad de conocimiento situado, pero necesita ser orientada mediante etiquetas, nombres, relatos, visitas, materiales interpretativos y decisiones lingüísticas coherentes.

En este marco, la elaboración de exofitónimos constituye una herramienta concreta de comunicación botánica. Estos nombres vernáculos, atribuidos a especies vegetales foráneas sin denominación tradicional estabilizada en la comunidad lingüística receptora, no sustituyen la nomenclatura científica. Su función es aproximar, orientar, facilitar la memoria y contribuir a que la especie pueda integrarse en el repertorio lingüístico y perceptivo del visitante. Por ello, deben evaluarse no solo por su naturalidad inmediata, sino también por el tipo de motivación que introducen, por las asociaciones que activan y por la percepción botánica que favorecen.

La distinción entre motivación sintagmática y motivación paradigmática permite formular un criterio especialmente útil. Las metáforas y analogías pueden ser eficaces cuando el hablante reconoce que el nombre se aplica por semejanza y no por pertenencia categorial. Pero, cuando esa distancia desaparece, la metáfora deja de actuar como puente cognitivo y puede convertirse en falsa clasificación. En tales casos, especialmente si no existe una tradición vernácula consolidada

Especie	Nombre(s) de referencia	Exofitónimo preferente	Criterio aplicado
<i>Wollemia nobilis</i>	Wollemi pine	wolémia-das-Montanhas-Azuís	Se evita el calco pinheiro-de-Wollemi , que trasladaría al gallego-portugués la analogía engañosa de <i>pine</i> para una especie que no pertenece a <i>Pinus</i> . La forma propuesta adapta el género y añade una referencia geográfica significativa.
<i>Pinus torreyana</i>	Torrey pine	pinheiro-de-Torrey	Uso legítimo de pinheiro , por tratarse de una especie del género <i>Pinus</i> . El epónimo permite distinguir una especie de distribución natural muy restringida sin generar confusión taxonómica.
<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>glauca</i>	blue Douglas-fir	douglásia azul	Se adopta douglásia como base denominativa para <i>Pseudotsuga</i> , evitando el calco abeto de Douglas . El adjetivo permite construir una serie coherente: douglásia comum , douglásia azul , douglásia macrocónica , douglásia china .
<i>Fitzroya cupressoides</i>	alerce chileno, alerce patagónico	fitzroia patagónica	Se reconocen los nombres hispanoamericanos tradicionales como denominaciones secundarias, pero se evita su traducción literal como laricio chileno o laricio patagónico , que sugeriría una falsa relación con <i>Larix</i> .
<i>Lagarostrobos franklinii</i>	Huon pine	lagarostróbia huonense	Se evita el calco pinheiro-de-Huon , que reproduciría la analogía engañosa de <i>pine</i> . La forma propuesta adapta de manera más eufónica el género científico y conserva la referencia tradicional asociada al río Huon.
<i>Microcachrys tetragona</i>	strawberry pine, creeping strawberry pine	cacrinho rasteiro	Creación vernácula motivada a partir de una adaptación breve de <i>Microcachrys</i> y del porte rastroso de la especie. Se evitan calcos como pinheiro-morango o pinheiro rasteiro , que presentarían como <i>Pinus</i> una podocarpácea.
<i>Dacrycarpus dacrydioides</i>	kahikatea, white pine	dacricarpo-da-Nova-Zelândia	Adaptación del género científico como dacricarpo y uso de una referencia geográfica clara. El nombre tradicional kahikatea puede conservarse como secundario, mientras que white pine no se calca por su analogía engañosa.
<i>Nageia nagi</i>	nagi	nagueia japonesa	Adaptación gráfica del género. El elemento geográfico caracteriza la especie sin recurrir a hiperónimos imprecisos.
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	hinoki cypress	paracipreste hinoki	Uso de para- como recurso de analogía controlada: indica semejanza con los cipreses sin identificar la especie como <i>Cupressus</i> . El elemento hinoki permite distinguirla de otros <i>Chamaecyparis</i> japoneses, como <i>C. pisifera</i> .
<i>Thuja koraiensis</i>	Korean arborvitae	tuia-da-Coreia	Uso legítimo de tuia , por tratarse de una especie del género <i>Thuja</i> . La referencia geográfica resulta transparente y suficiente para distinguir la especie dentro de la serie denominativa del género.

Figura 6. Ejemplos seleccionados de exofitónimos y criterios aplicados.

que deba ser reconocida, conviene favorecer denominaciones sintagmáticas, adaptaciones críticas del nombre científico o formas motivadas por referencias geográficas, biogeográficas, morfológicas o ecológicas.

Al mismo tiempo, los nombres vernáculos tradicionales deben ser reconocidos como hechos lingüísticos y culturales. Denominaciones como **alerce chileno**, **avellano chileno**, *Huon pine*, *Chinese fir* o *Araucaria de Chine* no deben ser tratadas simplemente como errores, pues pueden responder a historias denominativas legítimas. La función educativa del arboreto no consiste en suprimir esos nombres, sino en jerarquizarlos y explicarlos cuando puedan inducir confusión en otros contextos. El nombre preferente, el nombre secundario y la nota explicativa forman así parte de una misma estrategia de mediación.

En último término, nombrar una planta no garantiza su conservación, pero puede contribuir a crear las condiciones culturales para que esa conservación sea comprendida, valorada y socialmente sostenida. Una especie sin nombre común puede permanecer distante para el visitante; una especie nombrada de manera equívoca puede ser mal interpretada; una especie nombrada de forma orientadora puede empezar a ocupar un lugar en la memoria lingüística y perceptiva de una comunidad. Por eso, en determinados contextos, nombrar no es simplemente designar. Nombrar puede ser una primera forma de hacer visible, de educar la percepción y, en definitiva, de conservar.

BIBLIOGRAFÍA

1. Crystal, D. 2000. *Language Death*. Cambridge: Cambridge University Press.
2. Eco, U. 1984. *Semiotics and the Philosophy of Language*. Bloomington: Indiana University Press.
3. Geeraerts, D. 2010. *Theories of Lexical Semantics*. Oxford: Oxford University Press.
4. Göpferich, S. 1995. "A Pragmatic Classification of LSP Texts in Science and Technology". *Target* 7(2): 305-326.
5. Heywood, V. H. 2011. "The role of botanic gardens as resource and introduction centres in the face of global change". *Biodiversity and Conservation*, 20, pp. 221-239.
6. Lakoff, G., & Johnson, M. 1980. *Metaphors We Live By*. Chicago: University of Chicago Press.
7. Oldfield, S., & Newton, A. C. 2012. *Integrated conservation of tree species by botanic gardens: a reference manual*. Richmond: Botanic Gardens Conservation International.
8. Pérez-Rodríguez, J. H. 2024. Lugo será un refugio climático para los árboles dinosaurio. *Quercus*, 459, 14-15.
9. Ullmann, S. 1962. *Semantics: An Introduction to the Science of Meaning*. Oxford: Basil Blackwell.
10. Unseth, P. 2005. "Sociolinguistic parallels between choosing scripts and languages". *Written Language & Literacy*, 8(1), pp. 19-42.
11. Wilson, E. O. 1984. *Biophilia*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

DECONSTRUYENDO EL CUBO DE RUBIK:

UNA SITUACIÓN DE APRENDIZAJE TRANSVERSAL STEAM

Adrián López Mourelle¹, María Lourdes Mourelle Mosqueira²

¹ CPEIBas Arteaga de Sucina. Murcia. España.

² Grupo de investigación FA2. Departamento de Física Aplicada. Universidade de Vigo. Campus de Vigo. España.

INTRODUCCIÓN

Esta investigación forma parte de un trabajo de fin de máster en el que se realiza una propuesta didáctica innovadora basada en el enfoque STEAM (*Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics*), empleando el cubo de Rubik como nexo entre la Tecnología, la Ingeniería, el Arte y las Matemáticas. Esta integración no solo refleja una educación contemporánea que busca la confluencia de disciplinas variadas para un aprendizaje holístico, sino que también honra la visión de Ernő Rubik. El cubo, diseñado originalmente como herramienta educativa para explicar conceptos tridimensionales a sus estudiantes de arquitectura, ejemplifica una práctica educativa que es intrínsecamente STEAM, fusionando el diseño, la ciencia, la ingeniería y el pensamiento crítico.

Esta propuesta se pone en práctica como una experiencia piloto con el alumnado de 1º de ESO en el C. C. La Flota de Murcia, un centro educativo concertado situado en un céntrico barrio de la ciudad de Murcia. En el proyecto el alumnado realizará un mosaico empleando 100 cubos de Rubik.

Además del propio Ernő Rubik, otra persona que ha ejercido una influencia importante en la elaboración de este documento es Ernesto Fernández, que ha batido numerosos récords en la creación de mosaicos con cubos de Rubik y que supo transmitir, en un encuentro personal y familiar, unos valores que a posteriori hemos desarrollado en las competiciones de *speedcubing* de la WCA (*World Cube Association*). Estos valores pretenden hacer las competiciones de cubos accesibles y fomentar comunidades inclusivas donde los competidores de todas las edades, sexos y nacionalidades se relacionan entre sí. En ellas se fomenta también la responsabilidad individual, el espíritu emprendedor en los jóvenes, desde un ambiente de competición sana y a la vez

colaborativa. Al respecto, cabe citar la película *Speedcubers* del director Sue Kim¹.

Al centrarse en el cubo de Rubik, este proyecto no solo trata de motivar al alumnado mediante un aprendizaje práctico y tangible, sino que también promueve el desarrollo de habilidades cruciales como la resolución de problemas complejos y el pensamiento lógico y crítico. Este enfoque busca preparar al alumnado para enfrentarse a los desafíos de este siglo.

Además, la creación de mosaicos mediante el cubo sirve como un puente hacia el arte, permitiendo a los estudiantes explorar la expresión visual de una manera que fomenta tanto la creatividad como la metacognición. Este aspecto artístico del proyecto no solo mejora el aprendizaje significativo, sino que también permite a los discentes reflexionar sobre sus procesos de aprendizaje y entender mejor sus propias estrategias cognitivas.

Al integrar estos elementos, este proyecto busca revitalizar la educación secundaria, ofrecer un currículo relevante, atractivo y enriquecedor, preparando a los estudiantes para los retos del futuro con una base sólida en STEAM y un fuerte sentido de comunidad y colaboración global.

La motivación para la elaboración de este proyecto parte de la inquietud por aplicar proyectos transversales a las diferentes materias impartidas en la enseñanza secundaria, integrar otras disciplinas, dinamizando las clases a través de un aprendizaje práctico y cercano a los intereses del alumnado.

La propuesta busca asimismo la transferencia de conocimientos y métodos de enseñanza-aprendizaje a otras materias y ámbitos, sirviendo de modelo de aprendizaje STEAM para la comunidad educativa en general.

Siguiendo estas directrices, el proyecto también busca escalar, de forma que, con la colaboración de otros grupos, se pueda llevar a cabo un mosaico cuyos límites los establece únicamente el número de centros que quieran participar.

MARCO TEÓRICO

El enfoque STEAM en la educación

El enfoque STEAM se presenta como una evolución del enfoque STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*), al incorporar el Arte como una disciplina clave que potencia la creatividad y la innovación dentro del proceso educativo. Este enfoque responde a la necesidad de preparar al alumnado para los desafíos del siglo XXI, promoviendo el desarrollo de competencias transversales esenciales, como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la colaboración. Según Elizondo², es fundamental adoptar una visión global que permita entender los problemas en su contexto general. Para ello, es clave conectar diferentes disciplinas y ajustar su grado de relación en función de las necesidades de comprensión y análisis en cada caso.

Desde una perspectiva práctica, el aprendizaje STEAM implica la realización de proyectos interdisciplinares donde el alumnado se enfrenta a problemas reales y complejos, estimulando su curiosidad y motivación por aprender. La implementación de metodologías activas en el enfoque STEAM favorece la participación del estudiante como protagonista de su propio aprendizaje, permitiendo un proceso educativo más dinámico e interactivo. Este tipo de aprendizaje fomenta no solo la adquisición de conocimientos, sino también el desarrollo de habilidades prácticas y sociales necesarias para el futuro.

En cuanto a la legislación, la LOMLOE (*Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación*)³ hace una modificación de la ley de educación, rediseñando las competencias y creando una nueva competencia matemática y en ciencia, tecnología e ingeniería cuyo acrónimo designa como STEM.

La integración del enfoque STEAM, tal y como plantea Romero Ariza⁴, no solo facilita la comprensión de los contenidos, sino que también permite al alumnado desarrollar una mayor capacidad para aplicar los conocimientos en distintos contextos. Esto se alinea con el objetivo de fomentar "el uso significativo de la lectura, la escritura, el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación", tal como establece el currículo de la Región de Murcia, que prioriza metodologías

que faciliten el aprendizaje integrado y colaborativo en situaciones de aprendizaje contextualizadas.

Ventajas del Enfoque STEAM

La adopción del enfoque STEAM en el aula presenta diversas ventajas, ya que permite al alumnado abordar problemas desde múltiples perspectivas, enriqueciéndose con la diversidad de enfoques que cada disciplina aporta. Según Chisholm *et al.*⁵, este enfoque prepara a los estudiantes para el mundo laboral, donde se valoran habilidades como la innovación, el trabajo en equipo y la adaptabilidad a diferentes contextos.

Dentro de este enfoque STEAM podemos también encuadrar la publicación de Klymchuk en la que se aprecia un aumento significativo en la motivación al realizar "non-routine problem-solving", entre los que se puede incluir la resolución de puzzles como el cubo⁶.

Por último, el enfoque STEAM promueve la alfabetización digital y la competencia tecnológica, fundamentales en la sociedad actual, facilitando que el alumnado sea capaz de investigar, crear y comunicar utilizando herramientas tecnológicas avanzadas. Es por ello por lo que, esta integración interdisciplinaria, ayuda a desarrollar las competencias clave necesarias para que el alumnado pueda afrontar con éxito los desafíos de la sociedad actual y futura.

Metodologías activas

Aprendizaje basado en proyectos

El Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) es una metodología activa que se adapta bien al enfoque STEAM, ofreciendo al alumnado experiencias de aprendizaje significativas y prácticas. En el contexto del mosaico de cubos de Rubik, esta metodología no solo facilita la integración de disciplinas como la tecnología, la ingeniería, las matemáticas y el arte, sino que también promueve un aprendizaje centrado en la resolución de problemas y el trabajo colaborativo. El ABP fomenta un cambio en los roles tradicionales de enseñanza, donde el alumnado toma un papel activo y el profesorado actúa como facilitador y guía, lo cual es fundamental para el desarrollo de competencias clave en un entorno interdisciplinario.

En este enfoque, el ABP permite al alumnado enfrentar desafíos reales, como diseñar y construir un mosaico de cubos de Rubik, aplicando conocimientos teóricos en un proyecto tangible. Este método promueve habilidades como el pensamiento crítico, la creatividad y el trabajo en equipo, aspectos esenciales en el aprendizaje STEAM. El Decreto 235/2022 apoya estas metodologías activas, destacando su capacidad para incrementar la motivación del alumnado y desarrollar compe-

tencias significativas a través de proyectos que vinculan el aprendizaje con el mundo real.

En proyectos STEAM, el ABP facilita un aprendizaje más significativo, permitiendo que el alumnado se involucre de forma profunda y reflexiva. Según Zambrano *et al.*⁷, esta metodología también contribuye a la interdisciplinariedad y prepara a los estudiantes para futuros desafíos en un entorno globalizado. Con este enfoque, el proyecto de mosaico se convierte en una oportunidad para el desarrollo integral del alumnado, promoviendo tanto la exploración creativa como la aplicación práctica de conocimientos.

Gamificación

La gamificación es una metodología activa que utiliza elementos y dinámicas de juego en contextos no lúdicos, como la educación, para motivar y mejorar el aprendizaje. En un proyecto STEAM que implica la creación de un mosaico con cubos de Rubik (considerado como un puzle), la gamificación puede ayudar a incrementar el interés y compromiso del alumnado, al introducir elementos de competencia y recompensa que hagan el proceso más atractivo y dinámico.

Este enfoque fomenta un aprendizaje activo y participativo, en el que el alumnado puede asumir retos y trabajar en equipo. Incorporando técnicas de gamificación donde se emplean elementos de juego para la enseñanza de tecnología, se logra potenciar la creatividad y la resolución de problemas, haciendo el aprendizaje más significativo. Además, la gamificación facilita la integración de habilidades digitales y la motivación del alumnado, en línea con el uso de metodologías innovadoras para un aprendizaje eficaz.

La gamificación, al integrarse con el enfoque STEAM, no solo permite que el alumnado se divierta mientras aprende, sino que también fomenta habilidades esenciales para el siglo XXI, como el trabajo en equipo y la resiliencia. Según el Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado (INTEF), el uso de estrategias de juego, como los Escape Rooms y los breakout digitales, pueden ser particularmente efectivos para involucrar a los estudiantes en proyectos complejos y colaborativos. Esta metodología, aplicada al diseño del mosaico, puede incluir niveles de dificultad o recompensas que mantengan el interés y promuevan un aprendizaje autónomo y orientado a objetivos, ideal para un proyecto de estas características.

Art Thinking

El Art Thinking es una metodología innovadora que introduce el arte como un marco de acción para la educación, permitiendo al alumnado involucrarse en el proceso creativo y desarro-

llar un pensamiento divergente. Acaso y Megías⁸ definen el Art Thinking como un "marco de acción" que permite aplicar cualquier forma de proceso artístico en la educación, desde la creación visual hasta la sonora y la arquitectónica, y que enfatiza el aprendizaje colaborativo, la producción cultural en el aula y el pensamiento divergente.

Al aplicarlo en el proyecto STEAM del mosaico de cubos de Rubik, el Art Thinking facilita una conexión profunda entre las disciplinas artísticas y científicas, fomentando un ambiente en el que el alumnado puede expresar sus ideas y reflexionar críticamente. Como se destaca en la entrevista realizada a María Acaso en la revista Educación 3.0, esta metodología ofrece un enfoque holístico que abarca diversas expresiones artísticas no solo como contenidos, sino como métodos para enfrentar desafíos educativos⁹.

Además, el Art Thinking se centra en la motivación y en hacer que el proceso de aprendizaje sea placentero y significativo, utilizando el arte como antídoto contra el aburrimiento en las aulas. Esta metodología no sigue un esquema rígido, sino que se desarrolla de forma rizomática, permitiendo la libre asociación de ideas y la exploración sin restricciones, lo que la hace particularmente adecuada para proyectos STEAM donde se valora la creatividad y la experimentación.

Así, integrar el Art Thinking en un proyecto STEAM no solo impulsa la creatividad, sino que también desarrolla habilidades críticas y colaborativas, preparando al alumnado para resolver problemas de manera innovadora.

Design Thinking

El Design Thinking (DT) es una metodología creativa de resolución de problemas que se centra en el usuario y promueve la creación de soluciones innovadoras, lo cual se alinea bien con el enfoque de las fases del proceso tecnológico contemplado en la materia de Tecnología y Digitalización. En el contexto educativo, esta metodología es ampliamente utilizada para desarrollar competencias clave como el pensamiento crítico, la colaboración y la creatividad.

Al igual que el proceso tecnológico, el Design Thinking se estructura en fases iterativas que incluyen empatizar, definir, idear, prototipar y testear, permitiendo al alumnado identificar necesidades y resolver problemas mediante la creación de soluciones prácticas y relevantes. Como señalan Flores y Tena¹⁰, esta metodología no solo mejora el rendimiento académico, sino que también fomenta el trabajo en equipo y el dominio de recursos tecnológicos, siendo de gran utilidad para proyectos STEAM en los que se requiere una aproximación interdisciplinaria.

En un proyecto como el mosaico de cubos de Rubik, el Design Thinking puede facilitar que el alumnado desarrolle un enfoque estructurado para diseñar y ejecutar el proyecto, desde la identificación de los requisitos hasta la creación del prototipo final, promoviendo la experimentación y la mejora continua en cada iteración. Al igual que en el proceso tecnológico, el DT utiliza una dinámica cíclica, en la que se fomenta la adaptación y la evaluación continua, lo que lo convierte en un método efectivo para proyectos donde la innovación y la creatividad son esenciales.

La coevaluación y la autoevaluación. CoRubrics

La autoevaluación y la coevaluación son prácticas educativas que han demostrado ser beneficiosas en diversos contextos de aprendizaje. Más aún en casos de trabajos en grupo empleando ABP, en los que se hace necesario conocer la evaluación dentro del equipo. Estas metodologías no solo fomentan la reflexión crítica entre los estudiantes, sino que también promueven el desarrollo de habilidades metacognitivas y la autoeficacia. La extensión CoRubrics, que se utiliza para facilitar estos procesos, ha sido objeto de estudio en múltiples investigaciones que destacan sus ventajas.

Uno de los beneficios más significativos de la autoevaluación es su capacidad para mejorar la autoeficacia de los estudiantes. Según Papanthymou y Darra¹¹, la autoevaluación puede aumentar la autoestima y la comunicación entre estudiantes y docentes, lo que resulta en un ambiente de aprendizaje más colaborativo y efectivo.

En cuanto a la herramienta de autoevaluación CoRubrics, Romero-Montero y Torrebaddella, en su artículo titulado CoRubrics de Google Drive: Una evaluación innovadora para una escuela innovadora afirman que se trata de una herramienta de evaluación que se ajusta a todos los requisitos necesarios para llevar a cabo una evaluación inclusiva, orientada al aprendizaje y con un enfoque formativo¹².

La coevaluación, por su parte, ofrece beneficios adicionales al fomentar la colaboración y el aprendizaje entre pares. La investigación de Al-Abdullatif también sugiere que la coevaluación puede aumentar la validez y la fiabilidad de los procesos de evaluación, al complementar la autoevaluación con la evaluación de pares¹³. Esto es especialmente relevante en entornos de aprendizaje en línea, donde la interacción entre estudiantes puede ser limitada.

Además, la implementación de herramientas como CoRubrics puede facilitar la autoevaluación y la coevaluación al proporcionar criterios claros y estructurados para la evaluación. Según Groenendijk *et al.*, el uso de rúbricas visuales en la

autoevaluación ayuda a los estudiantes a relacionar su trabajo con los objetivos educativos, lo que mejora su capacidad de auto-regulación¹⁴. Esto es fundamental, ya que la auto-regulación se ha relacionado con un mejor rendimiento académico y una mayor satisfacción en el aprendizaje¹⁵.

Por último, es importante mencionar que, aunque la autoevaluación y la coevaluación ofrecen múltiples beneficios, su efectividad depende de la correcta implementación y del contexto educativo. La investigación de Panadero *et al.* sugiere que la autoevaluación puede tener un impacto positivo en el aprendizaje autorregulado y la autoeficacia, pero también enfatiza la necesidad de condiciones adecuadas para que estas prácticas sean efectivas¹⁶. Esto incluye la formación de los estudiantes en técnicas de autoevaluación y la creación de un ambiente de aprendizaje que valore la retroalimentación constructiva.

En conclusión, la autoevaluación y la coevaluación son herramientas poderosas en el ámbito educativo que, cuando se implementan adecuadamente, pueden mejorar significativamente el aprendizaje y el desarrollo personal de los estudiantes. La extensión CoRubrics se presenta como una solución eficaz para facilitar estos procesos, promoviendo un aprendizaje más reflexivo y colaborativo.

El cubo de Rubicks como herramienta educativa

A pesar de que en su inicio el cubo de Rubik nació como una herramienta pedagógica para ayudar a sus estudiantes a entender conceptos tridimensionales y de geometría, su uso se hizo popular en el ámbito del juego, en detrimento de su uso en el ámbito educativo.

Revisando la literatura científica podemos encontrar numerosos ejemplos de investigación en torno a la Teoría de grupos dentro de las matemáticas en el ámbito universitario, resultando escasas las referencias en torno a la didáctica en etapas educativas previas.

Con respecto a la Teoría de grupos, Zeng *et al.*¹⁷ detalla el uso del cubo en la enseñanza de conceptos avanzados en las áreas de Matemáticas y Tecnología, aunque a unos niveles muy superiores a los de la enseñanza secundaria.

Por otra parte, Kerrigan¹⁸ explora cómo la resolución del cubo puede servir como un vehículo eficaz para enseñar y practicar habilidades de resolución de problemas. Esta perspectiva se alinea con los objetivos de esta PDI ya que es extrapolable al ámbito de la educación secundaria, profundizando en los métodos de resolución del cubo, acompañándose de ilustraciones para resolver el cubo 2x2x2, muy útiles para introducirse en la metodología didáctica de resolución del cubo.

METODOLOGÍA

Hipótesis

La implementación de la presente Propuesta Didáctica Innovadora (PDI), basada en la creación de un mosaico con cubos de Rubik desde un enfoque STEAM, que integra las asignaturas de Tecnología y Digitalización, Matemáticas, y Educación Plástica, Visual y Audiovisual, incrementará el interés y la motivación del alumnado. Esto promoverá un aprendizaje significativo de los saberes involucrados, fomentará la creatividad y mejorará las competencias digitales y tecnológicas de los estudiantes.

- Motivar al alumnado a través de una Propuesta Didáctica Innovadora basada en un enfoque STEAM, que vincule las disciplinas de Tecnología, Ingeniería, Arte y Matemáticas en un único proyecto multidisciplinar que resulte motivador para el alumnado por girar en torno al popular cubo.
- Fomentar el pensamiento lógico y crítico a través de la resolución de problemas y la manipulación del cubo de Rubik, incentivando al alumnado a desarrollar estrategias creativas y sistemáticas.
- Desarrollar habilidades en diseño digital y computacional mediante el uso de software de hojas de cálculo para el diseño preliminar de mosaicos, promoviendo la alfabetización digital y la competencia en herramientas tecnológicas.
- Mejorar la comprensión y aplicación de conceptos matemáticos, como la geometría y la espacialidad, al calcular y planificar los diseños de los mosaicos y su realización física con los cubos de Rubik.
- Incentivar la creatividad y expresión artística al permitir que los estudiantes exploren la representación visual mediante mosaicos, fomentando el aprecio por el arte y la estética.
- Promover el trabajo colaborativo y las habilidades de comunicación mediante actividades grupales diseñadas para la construcción conjunta de mosaicos, reforzando la importancia de la colaboración y la comunicación efectiva en entornos multidisciplinarios.
- Impulsar la reflexión sobre la interdisciplinariedad de las ciencias y las artes para que los estudiantes reconozcan cómo diferentes campos del conocimiento se interconectan y contribuyen al aprendizaje integral.
- Desarrollar habilidades de planificación y organización al gestionar las fases del proyecto, desde el diseño inicial hasta la ejecución final del mosaico, enseñando a los estudiantes la importancia del manejo del tiempo y los recursos.
- Explorar y analizar la evolución del objeto tecnológico a través de un enfoque histórico y práctico, utilizando el Cubo

de Rubik y las competiciones de speedcubing como estudio de caso para entender cómo los conocimientos técnicos y científicos influyen en el desarrollo tecnológico.

Caracterización de la muestra

La muestra estudiada consiste en el alumnado perteneciente a las dos aulas de 1º de ESO en el centro educativo C.C. La Flota, situado en un céntrico barrio de la ciudad de Murcia. En el centro todo el alumnado dispone de un ordenador personal tipo Chromebook de su propiedad. El nivel socioeconómico de las familias es medio-alto puesto que en la mayor parte de ellas hay al menos un miembro con estudios universitarios, según indica la propia PGA del centro.

El grupo A está formado por 20 alumnas y 8 alumnos y el grupo B está compuesto por 15 alumnas y 13 alumnos. En ambos grupos existen alumnos ACNEAE con diferentes diagnósticos, existiendo además en uno de los grupos una alumna ACNEE a la que es necesario hacerle una adaptación significativa de un nivel de 4º de primaria.

Las características de este alumnado con necesidades educativas han sido tenidas en cuenta para la conformación de los subgrupos que llevarán a cabo el proyecto.

El centro está incluido dentro de la red de centros con aulas abiertas de la Región de Murcia en las etapas de infantil, primaria y secundaria desde sus inicios, por lo que la integración forma parte de su seña de identidad. Existe también una colaboración y diálogo constante entre el centro educativo y las familias, que participan de forma activa en las actividades complementarias y extraescolares que se ofertan.

Metodología de la investigación

La presente Propuesta Didáctica Innovadora (PDI) sigue una metodología mixta, basada en el método de investigación-acción, que combina simultáneamente una intervención educativa y un proceso de investigación. El objetivo principal es implementarla siguiendo un enfoque STEAM, que promueva la mejora del proceso de enseñanza-aprendizaje mediante el desarrollo de un proyecto práctico y conectado con los intereses del alumnado: la creación de un mosaico con cubos de Rubik.

Se trata de una experiencia piloto que se ha ido desarrollando durante la redacción de la propuesta y que pretende sentar las bases de un proyecto a mayor escala, en el que la transversalidad no se limite a las diferentes materias de un único centro, sino que aspire a involucrar a un mayor número de centros para conectar al alumnado de diferentes regiones en un mosaico de dimensiones únicamente limitadas por el número de centros participantes.

El proceso se estructura en dos fases complementarias. En la primera fase, se llevará a cabo una investigación previa que consistirá en la observación y análisis de los grupos de 1° de ESO participantes. Este análisis inicial tiene como finalidad obtener una visión clara de las características del alumnado, permitiendo así adaptar la metodología y las actividades a sus intereses y habilidades, así como identificar posibles áreas de mejora en la propuesta.

En la segunda fase, se procederá con la implementación de la PDI junto con la investigación, donde se aplicarán estrategias pedagógicas innovadoras que integren disciplinas como la tecnología, la ingeniería, las matemáticas y las artes. Durante esta fase, la intervención educativa será evaluada en tiempo real, utilizando una combinación de métodos de evaluación cualitativos y cuantitativos para medir su impacto en el aprendizaje y en el desarrollo de competencias clave del alumnado.

En cuanto a los instrumentos de recogida de datos, se utilizará una observación estructurada durante la fase inicial, basada en una guía específica que ayudará a conocer mejor el entorno educativo y las dinámicas del alumnado. Además, se aplicarán cuestionarios o entrevistas para recabar información sobre las percepciones y actitudes del alumnado, así como su evolución a lo largo del proyecto. Esto permitirá ajustar tanto las acti-

vidades del proyecto como el proceso de trabajo en equipo, fomentando la colaboración y la autonomía del alumnado.

Al inicio de la intervención, se aplicará un cuestionario diseñado para conocer los conocimientos previos del alumnado, sus preferencias y habilidades en relación con las áreas STEAM, especialmente en la resolución de problemas y el trabajo colaborativo. Este mismo cuestionario se repetirá al finalizar el proyecto, con el fin de medir el progreso en sus habilidades y actitudes, así como su experiencia durante la construcción del mosaico.

Además, se emplearán preguntas abiertas antes y después de la intervención para recoger las opiniones del alumnado sobre el proceso, la metodología empleada y su percepción del aprendizaje. Esto permitirá no solo evaluar la eficacia de la propuesta, sino también fomentar la reflexión crítica sobre su propio trabajo y el impacto del proyecto en su aprendizaje y motivación.

Plan de trabajo

El plan de trabajo de la Propuesta Didáctica Innovadora (PDI) se organiza en varias fases que involucran las asignaturas de Tecnología y Digitalización, Matemáticas y Educación Plástica, Visual y Audiovisual (EPVA), con el objetivo de desarrollar un proyecto colaborativo centrado en la creación de un mosaico con cubos de Rubik. El proyecto se desarrolla a lo largo de va-

TABLA 1
Cronograma del plan de trabajo

Materia	Tarea	Comentario	Número de sesión por materia											Criterios de evaluación
Tecnología y Digitalización	Evaluación inicial para elaboración de grupos	Realizar un cuestionario para evaluar los perfiles del alumnado y organizar grupos homogéneos	1											Evaluación inicial
Tecnología y Digitalización	Introducción al cubo.	Elaboración de un trabajo de investigación sobre la evolución del cubo de Rubik y el Speedcubing		2	3	4								4.1 1.1
Tecnología y Digitalización	Deconstrucción del cubo.	Desmontar un cubo por equipos para comprender su funcionamiento, para volver a montarlo ordenado					5							1.2
Matemáticas	Deconstrucción del cubo.	Cálculo de áreas y volúmenes			1	2								5.1 2.1
EPVA	Difusión del proyecto	Explicación de cómo se va a realizar la difusión del proyecto para su planificación por parte del alumnado			1									8.2
Tecnología y Digitalización	Planificación del proyecto.	Búsqueda de diferentes soluciones presupuestadas para llevar a cabo el mosaico					6							1.1 2.1
Tecnología y Digitalización	Planificación del proyecto.	Explicación del presupuesto y su realización en una hoja de cálculo						7						2.2
EPVA	Diseño del mosaico	Comenzar a diseñar del mosaico relacionado con el tema deseado			2	3								2.1 5.1 7.1
Matemáticas	Diseño del mosaico	Búsqueda de patrones y simetrías en el cubo						3						3.1 6.2 3.2
Tecnología y Digitalización	Diseño del mosaico. Hojas de cálculo	Make Art with Google Sheets - Applied Digital Skills de Google.						8						7.1
EPVA	Elección del proyecto a realizar	Valoración y votación por el mejor mosaico de los propuestos						4						2.2 3.2
Tecnología y Digitalización	Ejecución del mosaico	Explicación de cómo se resuelve una de las caras del cubo, aplicando algoritmos de resolución del mismo							9	10	11			5.2 4.2
EPVA	Difusión del proyecto	Elaboración la presentación multimedia para la difusión del proyecto a otros centros								5	6	7		6.2 5.2
Tecnología y Digitalización	Evaluación del proyecto	Coevaluación y autoevaluación empleando CoRubrics											12	Evaluación final

rias sesiones, resumidas en la Tabla 1, organizadas las materias por colores, indicando el número de sesiones que se necesitan para cada tarea o subtarea y los criterios de evaluación.

DESARROLLO DEL PROYECTO

A continuación, se describen las fases del proyecto y actividades realizadas en las tres asignaturas seleccionadas: Tecnología y Digitalización, Matemáticas y EPVA.

Evaluación inicial y formación de grupos

Se comienza con una evaluación inicial en la asignatura de Tecnología y Digitalización (aunque se podría realizar igualmente en las otras dos) con el objetivo de generar grupos equilibrados y homogéneos entre el alumnado. Para ello, se utiliza un cuestionario web que permite identificar los perfiles del alumnado en función de sus conocimientos sobre el cubo de Rubik, competencia digital, capacidad organizativa, intereses y roles de liderazgo, pero también es fundamental el conocimiento que el profesorado tiene del propio alumnado. Una vez identificado en qué rol destaca el alumnado, se asigna los diferentes grupos.

Introducción al Cubo de Rubik y deconstrucción

El alumnado realizará una investigación sobre la evolución del cubo de Rubik, que incluye la historia de cómo se concibió el famoso juguete y cómo ha ido evolucionando gracias al speed-cubing (competiciones de velocidad en resolver el cubo organizadas por la World Cube Association). En su portfolio digital el alumnado debe subir un documento o presentación (el formato es totalmente libre) sobre los resultados de su investigación. A continuación, antes de la elaboración de la presentación, se realiza una actividad de deconstrucción del cubo, donde los estudiantes desmontan y vuelven a ensamblar el cubo para comprender su funcionamiento. Esta actividad se complementa en la asignatura de Matemáticas, donde se trabajan conceptos de áreas y volúmenes relacionados con el cubo.

Una vez realizada la deconstrucción del cubo, se procede a introducir los conceptos geométricos de longitud, superficie y volumen en la asignatura de Matemáticas. La visualización y el cálculo geométrico en una figura con la que ya se han familiarizado ayudará al alumnado a adquirir esos conceptos de forma significativa.

Planificación del proyecto y diseño del mosaico

El mosaico es diseñado en las asignaturas de Tecnología y Digitalización y EPVA, donde se combinan el uso de hojas de cálculo y herramientas artísticas para crear el diseño del mosaico.

Difusión del proyecto

En la primera sesión de la materia de EPVA se dedicará a explicar al alumnado que deberá realizar un trabajo para la difusión del proyecto, en el que deben recopilar información de cómo han realizado el proyecto para su posterior difusión de cara a enseñar a otros centros cómo llevar a cabo el proyecto. Uno de los formatos que encaja muy bien en esta propuesta es un videotutorial comentado por los propios estudiantes.

Búsqueda de soluciones presupuestadas

En las siguientes sesiones de EPVA, el alumnado elaborará un presupuesto de la solución más económica para la realización del mosaico, indicando dónde y a qué precio van a adquirir los cubos y el soporte en el que los colocarán para realizar el mosaico. Durante la experiencia piloto empleamos el mosaico 10x10 de la marca Gan Cube, puesto que se trata de una solución económica y que facilita la uniformidad de colores en caso de escalar el proyecto.

Es recomendable realizar en sesiones en paralelo de Tecnología y Digitalización la tarea de Make Art with Google Sheets incluida en las Applied Digital Skills. Con ella el alumnado aprende a emplear el formato condicional de las hojas de cálculo para asignar los 6 colores del cubo en función de un número natural que introducirán de forma manual en la celda. De esta forma podrán ayudarse de la hoja de cálculo para diseñar el mosaico olímpico, si es que prefieren la opción digital frente a la analógica que iniciaron en EPVA.

Análisis de patrones y simetrías en Matemáticas

En este punto el alumnado debe buscar simetrías o patrones en sus mosaicos. Esto ayudará a realizar el mosaico de forma más rápida y eficiente. También es posible conectar los patrones con los algoritmos de resolución del cubo, que se aplican en función de patrones que se vayan encontrando.

Debido a la dificultad de hacer múltiples mosaicos, será necesario llevar a cabo una votación en EPVA para seleccionar el mejor diseño propuesto por los estudiantes.

Ejecución del mosaico

En esta fase, el alumnado aprenderá a resolver una de las caras del cubo de Rubik utilizando algoritmos específicos. Este aprendizaje será clave para la ejecución colaborativa del mosaico, aplicando lo aprendido en sesiones anteriores y fomentando el aprendizaje entre iguales, permitiendo que el alumnado se ayude y se explique entre sí.

Difusión del Proyecto y Evaluación Final

Las últimas sesiones de Educación Plástica, Visual y Audiovisual se dedicarán a la edición de la presentación multimedia sobre el proyecto. Este tipo de actividades potencia la autorreflexión, lo que mejora el aprendizaje competencial¹⁹.

Una vez terminado el mosaico, se lleva a cabo una evaluación del proyecto en Tecnología y Digitalización utilizando herra-

mientas como CoRubrics para la coevaluación y autoevaluación de los estudiantes (ver Anexo I).

Anexo I Criterios de evaluación	
Anexo I.1. Tecnología y Digitalización	
1.1.	Definir problemas o necesidades planteadas, buscando y contrastando información procedente de diferentes fuentes de manera crítica y segura, evaluando su fiabilidad y pertinencia.
1.2.	Comprender y examinar productos tecnológicos de uso habitual a través del análisis de objetos y sistemas, empleando el método científico y utilizando herramientas de simulación en la construcción de conocimiento.
2.1.	Idear y diseñar soluciones eficaces, innovadoras y sostenibles a problemas definidos, aplicando conceptos, técnicas y procedimientos interdisciplinares, así como criterios de sostenibilidad con actitud emprendedora, perseverante y creativa.
2.2.	Seleccionar, planificar y organizar los materiales y herramientas, así como las tareas necesarias para la construcción de una solución a un problema planteado, trabajando individualmente o en grupo de manera cooperativa y colaborativa.
4.1.	Representar y comunicar el proceso de creación de un producto desde su diseño hasta su difusión, elaborando documentación técnica y gráfica con la ayuda de herramientas digitales, empleando los formatos y el vocabulario técnico adecuados, de manera colaborativa, tanto presencialmente como en remoto.
5.2.	Automatizar procesos, máquinas y objetos de manera autónoma, con conexión a internet, mediante el análisis, construcción y programación de robots y sistemas de control.
6.2.	Crear contenidos, elaborar materiales y difundirlos en distintas plataformas, configurando correctamente las herramientas digitales habituales del entorno de aprendizaje, ajustándolas a sus necesidades y respetando los derechos de autor y la etiqueta digital.
Anexo I.2. Educación Plástica, Visual y Audiovisual	
1.1.	Reconocer los factores históricos y sociales que rodean las producciones plásticas, visuales y audiovisuales más relevantes, así como su función y finalidad, describiendo sus particularidades y su papel como transmisoras de valores y convicciones, con interés y respeto, desde una perspectiva de género.
2.1.	Explicar, de forma razonada, la importancia del proceso que media entre la realidad, el imaginario y la producción, superando estereotipos y mostrando un comportamiento respetuoso con la diversidad cultural.
2.2.	Analizar, de forma guiada, diversas producciones artísticas, incluidas las propias y las de sus iguales, desarrollando con interés una mirada estética hacia el mundo y respetando la diversidad de las expresiones culturales.
3.2.	Argumentar el disfrute producido por la recepción del arte en todas sus formas y vertientes, compartiendo con respeto impresiones y emociones y expresando la opinión personal de forma abierta.
5.1.	Expresar ideas y sentimientos en diferentes producciones plásticas, visuales, audiovisuales, a través de la experimentación con diversas herramientas, técnicas y soportes, desarrollando la capacidad de comunicación y la reflexión crítica.

5.2.	Realizar diferentes tipos de producciones artísticas individuales o colectivas, justificando el proceso creativo, mostrando iniciativa y autoconfianza, integrando racionalidad, empatía y sensibilidad, y seleccionando las técnicas y los soportes adecuados al propósito.
7.1.	Realizar un proyecto artístico, con creatividad y de forma consciente, ajustándose al objetivo propuesto, experimentando con distintas técnicas visuales o audiovisuales en la generación de mensajes propios, y mostrando iniciativa en el empleo de lenguajes, materiales, soportes y herramientas.
8.2.	Desarrollar producciones y manifestaciones artísticas con una intención previa, de forma individual o colectiva, organizando y desarrollando las diferentes etapas y considerando las características del público destinatario.

Anexo I.2. Matemáticas	
3.1.	Identificar propiedades geométricas de figuras y patrones.
4.2.	Modelizar situaciones y resolver problemas de forma eficaz interpretando y modificando algoritmos.
7.1.	Representar procedimientos y resultados matemáticos mediante diferentes modos de expresión visual.
5.1.	Reconocer relaciones entre conocimientos matemáticos, formando un todo coherente.
2.1.	Realizar estimaciones y cálculos de superficie de figuras geométricas.
6.2.	Identificar conexiones entre las matemáticas y otras materias resolviendo problemas contextualizados.
3.2.	Reconocer y describir simetrías y regularidades en figuras y patrones geométricos.
7.1.	Representar conceptos, procedimientos y resultados matemáticos visualizando ideas y estructurando procesos.
3.1.	Identificar propiedades geométricas de figuras y patrones, aplicando relaciones entre elementos.

EXPERIENCIA PILOTO

La experiencia se llevó a cabo en C.C. La Flota de Murcia durante el curso académico 2023-2024, con 35 alumnas y 21 alumnos de 1º ESO de las materias de Matemáticas, Tecnología y Digitalización y Educación Plástica, Visual y Audiovisual. El proyecto consistió en la construcción colaborativa de un mosaico temático de 100 cubos de Rubik, cuya temática estará inspirada en los Juegos Olímpicos, aprovechando el interés natural de los estudiantes por este evento global y por el icónico cubo.

El proyecto tiene como finalidad motivar al alumnado mediante la integración de varias disciplinas (Tecnología, Ingeniería, Arte y Matemáticas), fomentando así el pensamiento crítico y lógico a través de la manipulación del cubo de Rubik. Al abordar el diseño del mosaico, los estudiantes desarrollan competencias en diseño digital y computacional mediante el uso de herra-

mientas como hojas de cálculo de Google, lo cual no solo mejora su alfabetización digital, sino que también refuerza conceptos matemáticos, especialmente en geometría y simetría.

En la tabla siguiente se vinculan los objetivos de la propuesta con las tareas diseñadas para cumplirlos.

Tabla 2 Objetivos de la PDI	
Objetivos de la PDI	Tareas diseñadas para cumplir el objetivo
Motivar al alumnado a través de un enfoque STEAM que integre Tecnología, Arte y Matemáticas en un proyecto multidisciplinario.	Realización del mosaico con un elemento motivador como es el famoso cubo de Rubik, utilizando un tema de relevancia (Juegos Olímpicos) para captar el interés del alumnado.
Fomentar el pensamiento lógico y crítico mediante la resolución del cubo de Rubik.	Resolución de las caras del cubo, investigación y uso de algoritmos básicos para el speedcubing.
Desarrollar habilidades en diseño digital y computacional usando herramientas de hoja de cálculo.	Uso de Google Sheets para el diseño digital del mosaico, empleando formato condicional para asignar colores al mosaico.
Mejorar la comprensión y aplicación de conceptos matemáticos como la geometría y la espacialidad.	Cálculo de áreas y volúmenes del cubo, análisis de patrones y simetrías durante el diseño del mosaico.
Incentivar la creatividad y la expresión artística a través del diseño visual del mosaico.	Proceso de diseño artístico del mosaico en la asignatura de EPVA, exploración de técnicas de composición y balance visual.
Promover el trabajo colaborativo y las habilidades de comunicación mediante actividades grupales.	Organización de grupos de trabajo, asignación de roles y trabajo conjunto en la construcción del mosaico final.
Promover el trabajo colaborativo y las habilidades de comunicación mediante actividades grupales.	Organización de grupos de trabajo, asignación de roles y trabajo conjunto en la construcción del mosaico final.
Impulsar la reflexión sobre la interdisciplinariedad entre ciencias y artes.	Debate en clase sobre la conexión entre arte, matemáticas y tecnología en el contexto del cubo de Rubik.
Desarrollar habilidades de planificación y organización gestionando las fases del proyecto.	Planificación del proyecto a través de fases estructuradas: diseño, presupuesto, ejecución y evaluación del mosaico.
Explorar la evolución del cubo de Rubik y su relevancia como objeto tecnológico.	Investigación sobre la historia del cubo de Rubik, incluyendo sus aplicaciones y el fenómeno del speedcubing.

Se han empleado diferentes metodologías activas que ponen al estudiante en el centro del aprendizaje y encuadradas dentro del enfoque educativo STEAM. Estas son el ABP, la Gamificación, el Design Thinking, el Art Thinking, así como, la Autoevaluación y la Coevaluación.

Las metodologías empleadas permiten a los estudiantes aplicar sus conocimientos en un proyecto y contexto real y vinculado a sus intereses. Durante el proceso, se favorece la metacognición a través de la autoevaluación y la coevaluación,

permitiendo al alumnado reflexionar sobre su propio aprendizaje y el de sus compañeros, con el uso de herramientas digitales para el diseño y el desarrollo de proyectos colaborativos.

El proceso de creación del mosaico se estructura en varias fases, integrando las asignaturas de Tecnología y Digitalización, Matemáticas y Educación Plástica, Visual y Audiovisual (EPVA). Cada fase se centra en un aspecto clave: desde el análisis y diseño inicial del mosaico hasta su montaje y evaluación final. Estas actividades se hallan vinculadas transversalmente a las tres materias implicadas en el proyecto.

Durante la fase de diseño, el alumnado aprende a identificar patrones y simetrías en el cubo de Rubik, lo que facilita la planificación del mosaico. También se fomenta el aprendizaje colaborativo al asignar roles que permiten a los estudiantes compartir y construir conocimientos en equipo.

La evaluación se lleva a cabo a través de métodos cualitativos y cuantitativos, incluyendo observación estructurada y cuestionarios pre y post-proyecto, lo que permite medir el impacto de la PDI en el aprendizaje y desarrollo de competencias clave. Esta evaluación fomenta la autoeficacia y la capacidad del alumnado para aplicar lo aprendido en contextos variados.

Con esta PDI, se pretende sentar las bases para un aprendizaje integral y multidisciplinar, donde el alumnado no solo desarrolle habilidades técnicas, sino que también valore la colaboración, la creatividad y el esfuerzo compartido.

A continuación, se proponen rúbricas para la evaluación de las diferentes materias. Estas rúbricas están diseñadas empleando la herramienta CoRubrics, que nos facilita la elaboración de un formulario para la posterior autoevaluación y coevaluación del alumnado.

Resultados de la experiencia piloto

La implementación de la Propuesta Didáctica Innovadora (PDI) en el C.C. La Flota de Murcia ha permitido observar los siguientes resultados significativos:

- Aumento de la motivación: el alumnado mostró un notable interés y entusiasmo por el proyecto, superando la motivación observada en proyectos anteriores. Este incremento se relaciona con el enfoque práctico y lúdico que gira en torno al cubo de Rubik, un elemento que genera curiosidad y permite aplicar los conocimientos de manera tangible.
- Mejor relación con el profesorado: durante la realización de esta experiencia, se observó una mejora en la relación entre el alumnado y el profesorado. No se reportaron conflictos relacionados con el trabajo en equipo, lo que sugiere una atmósfera de colaboración positiva y armoniosa.

- Desarrollo del interés individual: un aspecto destacado fue que al menos un estudiante mostró un interés especial por perfeccionar sus habilidades de resolución del cubo, con la intención de participar en competiciones de speedcubing. Esto refleja un potencial impacto a largo plazo de la propuesta en términos de motivación personal y desarrollo de talentos.
- Aplicación de herramientas digitales: el alumnado, que inicialmente presentaba dificultades con la resolución del cubo, descubrió por su cuenta el uso de una herramienta online de resolución. Este hallazgo refleja el fomento de habilidades de investigación autónoma y metacognitivas, ya que ellos mismos buscaron y utilizaron recursos adicionales para cumplir con el objetivo de la actividad.
- Roles de liderazgo y desafíos: aquellos estudiantes con más experiencia en la resolución del cubo asumieron roles de liderazgo, lo que, aunque facilitó el trabajo en equipo, presentó también algunos retos. Se notó que estos roles, en algunos momentos, dificultan la participación equitativa de todos los miembros del equipo.

Con el objetivo de promover y difundir esta experiencia, además de la colaboración con otros centros para la elaboración de un mosaico de mayor envergadura, se propone la celebración en el centro de un evento speedcubing coorganizado con la WCA, en el que el alumnado podrá conocer de primera mano los valores que promueve esta institución.

DISCUSIÓN

Como se ha indicado con anterioridad, la presente PDI consiste en una experiencia piloto en la que se propone una actividad STEAM multidisciplinar.

Si se observan las tareas que se han llevado a cabo, se puede apreciar que todos los objetivos se han puesto en práctica durante la realización del proyecto.

La PDI parte de una reflexión tras conocer el perfil de competidores y competidoras en las jornadas de speedcubing. El índice de speedcubers con un alto nivel de competencia matemática y científica puede conducir a la idea de promover el desarrollo de la competencia STEM a través de la práctica de resolución del cubo. Sin embargo, las investigaciones de Arizpe et al., parecen indicar que se la relación podría producirse en un único sentido²⁰.

Una vez llevada a cabo la experiencia piloto, se observa un aumento generalizado de la motivación del alumnado en las

materias implicadas, pero no ha transcurrido tiempo suficiente para poder afirmar que la práctica en el speedcubing lleva a una mejora de la competencia matemática.

En la tabla siguiente se describe el método DAFO aplicado al proyecto piloto.

Tabla 3 DAFO aplicado al proyecto piloto	
Debilidades	Amenazas
Toma de datos de evaluación de la experiencia por parte del alumnado.	Mentalidad negativa por parte del profesorado o del alumnado por no sentirse capacitado para resolver el cubo y hacer el mosaico.
Fortalezas	Oportunidades
Multidisciplinariedad del proyecto, incluyendo las matemáticas, la tecnología y el arte.	Escalabilidad del proyecto a otros centros que quieran participar para realizar un mosaico lo más grande posible.
Con el proyecto se completa una parte importante del currículo, sobre todo en Tecnología y Matemáticas.	Organización de un evento speedcubing.
Se trabajan todos los objetivos planteados.	

Futuras líneas de investigación

Para mejorar esta PDI se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Elaboración de la situación de aprendizaje en eXeLearning en formato REA para facilitar el trabajo al profesorado de centros que deseen participar en el proyecto.
- Búsqueda de la causalidad entre el talento matemático y la resolución de puzzles, o más en concreto el propio cubo.
- Desarrollo de formularios o herramientas que faciliten la creación de grupos homogéneos.
- Monitorización del alumnado a medio-largo plazo para estudiar cómo influye la práctica del speedcubing en su rendimiento académico.

CONCLUSIONES

La implementación de la PDI basada en el cubo de Rubik dentro de un enfoque STEAM ha mostrado resultados positivos tanto en la motivación del alumnado como en el desarrollo de competencias clave. Esta propuesta no solo ha permitido integrar disciplinas como Tecnología, Ingeniería, Matemáti-

cas y Arte, sino que también ha promovido un aprendizaje significativo y contextualizado que resulta relevante para los intereses del alumnado.

En cuanto al impacto en el aprendizaje y la motivación, la PDI ha logrado despertar un mayor interés y compromiso en el alumnado, lo que se refleja en su participación activa y en el interés mostrado hacia las actividades del proyecto. Además, el aprendizaje ha sido más efectivo gracias al enfoque interdisciplinar que ofrece una comprensión más holística y práctica de los contenidos educativos.

En lo referente al desarrollo de competencias, a lo largo del proyecto, el alumnado ha tenido la oportunidad de aplicar y mejorar competencias digitales, tecnológicas, matemáticas y artísticas. Asimismo, ha desarrollado habilidades de trabajo en equipo, liderazgo y comunicación, esenciales para su desarrollo integral. Este enfoque ha facilitado la creación de un ambiente de aprendizaje inclusivo y colaborativo, alineado con el marco normativo que promueve la legislación actual en España.

Es necesario también reseñar limitaciones del proyecto. La experiencia también ha identificado algunas áreas de mejora, como la necesidad de un mayor apoyo inicial para aquellos estudiantes con dificultades en la resolución del cubo y la adquisición de los recursos necesarios para la implementación en otros centros. Asimismo, se observó que los roles de liderazgo asumidos por algunos estudiantes, si bien beneficiosos en ocasiones, también presentaron retos en términos de equidad en la participación de todo el grupo.

Por último, exponer el potencial de expansión del proyecto. La acogida positiva permite ampliar esta propuesta a otros centros educativos para evaluar su efectividad a mayor escala. Se considera que el enfoque STEAM, centrado en un objeto de aprendizaje tan versátil y popular como el cubo de Rubik, puede ser replicado exitosamente, promoviendo la transferencia de conocimientos entre diferentes áreas del currículo, pudiendo alcanzar incluso la interculturalidad.

En conclusión, esta PDI demuestra que el uso de proyectos STEAM transversales fomenta no solo el aprendizaje académico, sino también el desarrollo personal del alumnado, preparándolo para los desafíos de un mundo interconectado y dinámico.

Adicionalmente, es de interés reseñar que este proyecto didáctico ha sido seleccionado por la Asociación Española de Speedcubing para su difusión en el programa La Aventura del Saber de RTVE (<https://www.rtve.es/play/videos/la-aventura-del-saber/cubo-rubik/17054300/>)

BIBLIOGRAFÍA

1. Sue Kim (Director). (2020). *Speedcubers* [Broadcast]. <https://www.netflix.com/es/title/81092143>
2. Elizondo, C. (2020). *Ámbitos para el aprendizaje. Una propuesta interdisciplinar*. Octaedro.
3. *Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación*.
4. Romero Ariza, M. (2010). *El aprendizaje experiencial y las nuevas demandas formativas*. *Revista de Antropología Experimental*. Nº 10, 2010. Especial educación 8: 89-102. Universidad de Jaén (España). 8. <http://revista.ujen.es/rae>
5. Chisholm, C. U.; Harris, M. S. G.; Northwood, D. O., & Johrendt, J. L. (2009). The Characterisation of Work-Based Learning by Consideration of the Theories of Experiential Learning. *European Journal of Education*, 44(3), 319-337. <https://doi.org/10.1111/j.1465-3435.2009.01394.x>
6. Klymchuk, S.; Thomas, M.; Alexander, J.; Evans, T.; Gulyaev, S.; Liu, W.; Novak, J., Murphy, P., Stephens, J., & Zaliwski, A. (2020). Investigating the impact of non-routine problem-solving on creativity, engagement, and intuition of STEM tertiary students. Teaching and learning research initiative. http://www.tlri.org.nz/sites/default/files/projects/TLRI%20Summary_Klymchuk%28v3%29.pdf
7. Zambrano Briones, M. A., Hernández Díaz, A., & Mendoza Bravo, K. L. (2022). *El aprendizaje basado en proyectos como estrategia didáctica*. *Conrado*, 18(84), 172-182.
8. Acaso, M. y Megías, C. "Art Thinking. Cómo el arte puede transformar la educación": Barcelona: Paidós, 2017, 233 pp. ISBN 978-84-493-3370-5.
9. De Miguel, R. (2019). *María Acaso: «Art Thinking entiende las artes como herramientas para darle la vuelta al sistema»*. <https://www.educaciontrespuntocero.com/entrevistas/maria-acaso-art-thinking/>
10. Flores León, A. M., & Tena Fernández, R. (2016). Design thinking educational innovation and methodological research. *Revista DIM: Didáctica, Innovación y Multimedia*, 33.
11. Papanthymou, A., & Darra, M. (2018). The Contribution of Learner Self-Assessment for Improvement of Learning and Teaching Process: A Review. *Journal of Education and Learning*, 8(1), 48. <https://doi.org/10.5539/jel.v8n1p48>
12. Romero-Montero, S., & Torredadella Flix, X. (2018). CoRubrics de Google Drive: Una evaluación innovadora para una escuela innovadora. *Revista practicum*, 3(2), 77-94. <https://doi.org/10.24310/RevPracticumrep.v3i2.9867>
13. Al-Abdullatif, A. M., & Gameil, A. A. (2020). Exploring Students' Knowledge and Practice of Digital Citizenship in Higher Education. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, 15(19), 122. <https://doi.org/10.3991/ijet.v15i19.15611>
14. Groenendijk, T.; Kárpáti, A., & Haanstra, F. (2020). Self-Assessment in Art Education through a Visual Rubric. *International Journal of Art & Design Education*, 39(1), 153-175. <https://doi.org/10.1111/jade.12233>
15. Karaman, P. (2021). The Impact of Self-assessment on Academic Performance: A Meta-analysis Study. *International Journal of Research in Education and Science*, 7(4), 1151-1166. <https://doi.org/10.46328/ijres.2344>
16. Panadero, E.; Jonsson, A., & Botella, J. (2017). Effects of self-assessment on self-regulated learning and self-efficacy: Four meta-analyses. *Educational Research Review*, 22, 74-98. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2017.08.004>
17. Zeng, D.-X.; Li, M.; Wang, J.-J.; Hou, Y.-L.; Lu, W.-J., & Huang, Z. (2018). Overview of Rubik's Cube and Reflections on Its Application in Mechanism. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 31(1), 77. <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0269-7>
18. Kerrigan, N. (2017). Solving a Rubik's Cube: An Analysis of Problem Solving Strategies. *University of Rhode Island*. <https://digitalcommons.uri.edu/srhonorsprog/566/>
19. Sáez Pizarro; López, C.; Vergel, G.; García, A., & Paula, M. (2013). *Autorreflexión y autoevaluación: una experiencia para mejorar el aprendizaje mediante el desarrollo de competencias generales y emocionales*. *X Jornadas Internacionales de Innovación Universitaria*. Educar para transformar. <https://abacus.universidadeuropea.com/bitstream/handle/11268/2040/1604.pdf?sequence=1>
20. Arizpe, O.; Dwyer, J., & Stevens, T. (2009). Mathematical Self-Efficacy of Middle School Students Solving the Rubik Cube. Centre for Innovation in Mathematics Teaching (CIMT). *Texas Tech University, Lubbock*. <https://www.cimt.org.uk/journal/dwyer2.pdf>



XUNTA
DE GALICIA Xacobeo  2027

 CCT
INSTITUTO CULTURA CIENCIA Y TECNOLOGIA