rAACI

Revista de la Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería

2026

Director y Responsable de Publicaciones: Mario Díaz y Cristina Rodríguez

Consejo de Redacción (2026): José Luis Acuña y Abelardo Margolles
Coordinador técnico: Javier Sebastián

Consejo Científico

José Luis Acuña	Catedrático de Ecología. Univ. de Oviedo
Antonio Bahamonde	Catedrático de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial. Univ. de Oviedo
Javier Cuevas	Catedrático de Física. Univ. de Oviedo
Mario Díaz	Catedrático de Ingeniería Química. Univ. de Oviedo
María Ángeles Gil	Catedrática de Estadística. Univ. de Oviedo
Carlos López-Otín	Catedrático de Bioquímica. Univ. de Oviedo
Abelardo Margolles	Profesor de Investigación. IPLA - CSIC
Consuelo Martínez	Catedrática de Álgebra. Univ. de Oviedo
Rosa Menéndez	Profesora de Investigación. INCAR - CSIC
María Rosario Rodicio	Catedrática de Microbiología. Universidad de Oviedo
Cristina Rodríguez	Catedrática de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Univ. de Oviedo
Javier Sebastián	Catedrático de Tecnología Electrónica. Univ. de Oviedo

rAACI

Revista de la Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería

Dirección postal: Edificio Histórico de la Universidad de Oviedo.
C/ San Francisco, 3, 33001 Oviedo
http://www.aaci.es. Correo electrónico: info@aaci.es

ISSN 2792-9302





Depósito legal: AS1265-2022
Gestor web: Cristina Rodríguez
Diseño, Maquetación y Revisión: Javier Sebastián, Mª Ángeles Gil, Mª del Rosario Rodicio y José Luis Acuña

©2026 AACI

Vol. 6, Año 2026

Índice

No dejes para mañana lo que puedas lo que puedas hacer hoy
Mario Díaz 5

Resúmenes de los artículos 7

Virus y pandemias
Santiago Melón García 9

Materias primas críticas y transición energética: Perspectivas globales, cadenas de valor, y el rol estratégico para España y Asturias
Juan María Menéndez Aguado 33

La Geología como clave para entender el paisaje: el caso de Asturias
Montserrat Jiménez-Sánchez 51

Cómo aprovechar (y evaluar) el potencial de la Ciencia para impulsar el crecimiento económico de los territorios
Fernando Rubiera Morollón 81

No dejes para mañana lo que puedas hacer hoy

No es un tema especialmente grato, pero quisiera comentar los rankings universitarios, una cuestión que reaparece cada verano. Se refieren sobre todo a la investigación y solemos fijarnos en nuestra posición entre las universidades españolas, generalmente públicas. Estas evaluaciones solo consideran una parte de la actividad universitaria, aunque una función crucial, especialmente cuando las instituciones compiten por atraer talento y destacar en el ámbito científico y tecnológico.

La ausencia de la docencia en buena parte de estos análisis merece ser señalada. La enseñanza es esencial para valorar la universidad y justificar su apoyo social e institucional. También debemos seguir la evolución de la demanda de titulaciones y las preferencias de los estudiantes, información necesaria para decidir sobre nuevos grados y modelos formativos. Tampoco se refleja adecuadamente la investigación orientada a la transferencia y al desarrollo tecnológico, fundamental para evaluar el papel de una universidad. Deberíamos valorarla mediante organismos como la Agencia prevista en la Ley de la Ciencia y analizar su respuesta a las necesidades regionales. La transferencia de conocimiento y tecnología debe ser un elemento esencial de su impacto.

Los comentarios sobre el ranking de Shanghái han insistido en la importancia de las políticas de personal. Aunque introducir cambios resulta difícil, comienzan a surgir modelos regionales diferentes, algunos con suficiente trayectoria para ser evaluados y, en su caso, considerados. Entre los aspectos prioritarios están la selección y conservación del talento durante la carrera profesional, las políticas de incentivos, la colaboración entre grupos, las agrupaciones de investigación y la atención a ámbitos científicos estratégicos. También debemos reforzar la captación de talento y la cooperación internacional, aprovechando las experiencias de otros países. Asimismo, los buenos resultados dependen de una gestión administrativa eficaz. El sistema universitario necesita buenos investigadores y docentes, pero también una organización capaz de sostener adecuadamente su funcionamiento.

En este contexto, debemos reconocer la importancia de la Ley de la Ciencia aprobada el pasado año en nuestra región. Sus herramientas deberían ponerse en marcha cuanto antes. Algunas contribuirán a mejorar nuestra posición en los rankings, aunque su alcance es mucho mayor. El desarrollo de esta Ley sería una excelente noticia para Asturias, nuestra Universidad y el sistema de investigación. Debería marcar un antes y un después y ayudar a convertir Asturias en una región atractiva para la investigación, con la participación de instituciones autonómicas y nacionales.

Otro asunto cuyo interés ha crecido entre los científicos es el impacto de la inteligencia artificial. Desde la AACI procuramos abordar cuestiones relacionadas con este ámbito. En nuestras Conferencias de Primavera hemos tratado la ciberseguridad, con intervenciones sobre los teléfonos móviles y la defensa. También fue el tema de la conferencia del Día de la Ciencia y la Ingeniería en Asturias, celebrado el pasado septiembre.

El interés de la inteligencia artificial supera sus aspectos técnicos. Su impacto sobre las personas y la sociedad es cada vez más evidente, y también sus dimensiones filosóficas. Un ejemplo es Anthropic, que contactó el pasado agosto con la filósofa y teóloga inglesa Carmody Grey para orientar la formación moral de sus sistemas de inteligencia artificial. Tras estudiar la propuesta, decidió no aceptarla. Otro es el trabajo de Nancy Cartwright, que ha renovado la filosofía de la ciencia al relacionar teorías y modelos con la causalidad y la inferencia causal, así como con las decisiones políticas. Recupera planteamientos próximos a los empirismos de Neurath y Mill, frente a las concepciones más vinculadas a Hume o Carnap. Los tecnólogos recurren también a los literatos para comprender los nuevos escenarios. En La Biblioteca de Babel, Jorge Luis Borges imaginó una biblioteca que contenía todos los libros posibles, es decir, toda la información. El problema pasa entonces a ser distinguir lo verdadero del ruido.

En este sexto número de nuestra revista abordamos cuatro temas tratados de forma exhaustiva. Uno de los artículos analiza los virus, sus características e impacto, con especial atención a las grandes pandemias y al SARS-CoV-2, que nos afectó hace cinco años. Otro estudia las materias primas críticas, uno de los grandes problemas de la transición energética, y examina la situación y el papel de España y Asturias.El paisaje asturiano, además de constituir nuestro entorno vital, posee un importante valor social y económico. El trabajo dedicado a él aborda sus aspectos geológicos, su formación y evolución, y las transformaciones que sigue experimentando. Finalmente, incluimos un artículo sobre la evaluación de la investigación, su impacto y su contribución al crecimiento económico regional, en relación con el desarrollo de nuestro sistema de I+D+i.

Esperamos que estos trabajos sean una referencia para quienes desean conocer estos campos científicos. Incorporan también contenidos divulgativos e históricos, de acuerdo con la línea editorial de la revista. Contribuir a su difusión es otro de nuestros objetivos. Por ello, se edita en papel y formato digital, con libre acceso desde la página web de la Academia. Además, como en las cinco ediciones anteriores, durante la primavera de 2027 se divulgará en distintos concejos asturianos con el apoyo de la Fundación Caja Rural de Asturias.

Debemos agradecer el apoyo de los patrocinadores de nuestra Academia: ILAS-Reny Picot, SATEC y CAPSA FOOD, así como el de ALSA, la Consejería de Ciencia y la Universidad de Oviedo. Con todo ello queremos promover la difusión de la ciencia y la ingeniería y acercarlas especialmente a los jóvenes.

Animamos a los alumnos de los dos últimos cursos de ESO, Bachillerato y Formación Profesional a participar en un concurso que se resolverá en la primavera de 2027, mediante vídeos científicos basados en los artículos de esta revista. Decía Francis Bacon que «*la lectura hace al ser humano completo; la conversación lo hace ágil; el escribir lo hace preciso*». Gracias, finalmente, a los cuatro autores de este número por su magnífico trabajo.

¡Un cordial saludo!



Mario Díaz
Presidente de la
Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería

Artículos – Resúmenes



Santiago Melón García

Virus y Pandemias

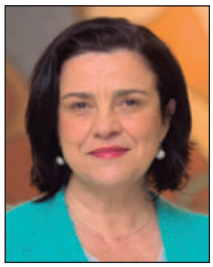
El denominado Coronavirus tipo 2 del Síndrome Respiratorio Agudo Grave (SARS-CoV2) provocó que la Organización Mundial de la Salud declarase un estado de pandemia en marzo de 2020, obligando a confinar a la población mundial, lo que no había sucedido nunca. El SARS-Cov2 no ha sido el único virus que ha provocado la infección masiva. Gripe, sarampión o viruela son enfermedades recurrentes a lo largo de la historia que han diezmado la población. Aunque algunas de estas enfermedades han sido erradicadas (viruela) en otras, aunque bajo control, no se ha logrado eliminar la transmisión, como es el caso del SIDA. Tras la reciente pandemia y con todo lo aprendido, ¿estamos exentos de nuevas pandemias? ¿Estamos preparados para afrontarlas?



Juan María Menéndez Aguado

Materias primas críticas y transición energética: Perspectivas globales, cadenas de valor, y el rol estratégico para España y Asturias

Una de las consecuencias más evidentes en la transición hacia un modelo energético descarbonizado es la necesidad de un suministro intensivo de materias primas críticas y estratégicas. Este artículo expone una revisión detallada de las operaciones unitarias y las rutas de metalurgia extractiva —hidrometalúrgicas y pirometalúrgicas— para recursos en los que España juega un rol importante dentro de la Unión Europea (UE), como son la celestina (estroncio), magnesita, cobre, metales refractarios (wolframio y tantalio), tierras raras (REE), silicio metalúrgico y subproductos complejos (cadmio, arsénico, antimonio, germanio).



Montserrat Jiménez-Sánchez

La Geología como clave para entender el paisaje: el caso de Asturias

La diversidad paisajística de Asturias comprende una gran variedad litológica, una historia geológica compleja, y un conjunto de procesos geológicos externos activos que, a su vez, son los que más interfieren con el ser humano en esta región. Para entender el papel de la geología en el modelado del paisaje asturiano, recordaremos la dinámica de la Tierra a la luz de la Tectónica de Placas, las orogenias varisca y alpina, que definen las líneas maestras del paisaje asturiano, y el conjunto de procesos geológicos que han modelado este paisaje en distintas etapas, como ríos, glaciares, gravedad, litorales y kársticos. Este "paisaje geológico" ha condicionado el devenir del pueblo asturiano y contribuye a explicar sin duda alguna por qué Asturias es así y no de otra manera.



Fernando Rubiera Morollón

Cómo aprovechar (y evaluar) el potencial de la Ciencia para impulsar el crecimiento económico de los territorios

El progreso científico y tecnológico facilita el cambio tecnológico gracias al cual se incrementa la productividad y se consigue el crecimiento económico. Pero el aprovechamiento del potencial de los avances científicos para generar cambios tecnológicos depende en buena parte de características endógenas de cada lugar. Este carácter endógeno puede provocar que la Ciencia y la Tecnología contribuyan a aumentar las desigualdades espaciales. Una evaluación integral de la investigación científica no debe limitarse al desempeño de los científicos o las instituciones de investigación, sino también considerar su contribución al crecimiento económico y su impacto sobre las desigualdades entre territorios, ya sean países o regiones. Todas estas cuestiones son ilustradas con ejemplos y casos concretos, varios de ellos referidos a Asturias.

Virus y Pandemias

Santiago Melón García
Jefe de Servicio de Microbiología y Parasitología del Hospital Universitario Central de Asturias (HUCA).

Resumen- **En enero de 2020 China decreta el cierre de la ciudad de Wuhan de 12 millones de habitantes. La causa, un microorganismo diez millones de veces más pequeño que un ser humano: el denominado Coronavirus tipo 2 del Síndrome Respiratorio Agudo Grave (SARS-CoV2 de sus iniciales en inglés). Este virus provocó que la Organización Mundial de la Salud (OMS) declarase un estado de pandemia en marzo de 2020, obligando a confinar a la población mundial, lo que no había sucedido nunca. Después de tres años de medidas restrictivas y más de 7 millones de muertos, hemos vuelto a la "normalidad".**

El SARS-Cov2 no ha sido el único virus que ha provocado la infección masiva. Gripe, sarampión o viruela son enfermedades recurrentes a lo largo de la historia que han diezmado la población. Aunque algunas de estas enfermedades han sido erradicadas (viruela), en otras, aunque bajo control, no se ha logrado eliminar la transmisión, como es el caso del SIDA (Síndrome de Inmuno-Deficiencia Adquirida) causado por el VIH (virus de la Inmunodeficiencia Humana).

Después de esta última pandemia y de todo lo que hemos aprendido, ¿estamos exentos de nuevas pandemias?. ¿Estamos preparados para afrontarlas?

I. INTRODUCCIÓN

Hace 5 años, casi nadie esperaba que en el siglo XXI un microorganismo provocase una enfermedad infecciosa incontrolable que pusiese en riesgo la vida de la población mundial. Aunque no hay que olvidar que hace un siglo tuberculosis, gripe, infecciones intestinales o neumonías eran las principales causas de mortalidad.

La causa de esa afectación masiva fue vivir en un mundo globalizado e interconectado. Pero el acceso a los numerosos avances tecnológicos de los que gozamos en la actualidad nos permitió conocer en un tiempo aceptable de dónde procedía la amenaza y buscar las soluciones oportunas en un tiempo récord, después de los titubeos de asombro e incredulidad ante lo que luego se confirmó.

Pocos podían imaginar en el 2020 una infección de tal calibre. Pero tampoco que se pudiesen desarrollar vacunas efectivas frente al SARS-Cov2 en tan sólo 6 meses. Y no sólo eso, sino que se organizase todo un sistema de distribución y aplicación mundial.

Uno de los grandes riesgos en la aparición de las infecciones masivas es el contacto estrecho con los animales (las zoonosis). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se calcula que alrededor del 60% de las enfermedades infecciosas emergentes proceden de animales. En las últimas décadas se han detectado más de 30 nuevos agentes patógenos humanos, de los cuales el 75% tienen origen animal (WHO, 2023).

La relación entre especies es inevitable y seguirá aumentando inexorablemente, no sólo con los animales domésticos, sino con todo tipo de animales por las necesidades que todavía subsisten en más de tres cuartas partes del mundo y por ese carácter "aventurero" del ser humano.

Así pues, los saltos de distintos microorganismos entre especies, y en particular de los virus (el sistema más sencillo de vida, como veremos más adelante) son muy posibles.

Además, estamos en un mundo que, hoy en día, se recorre en menos de 24 horas y permite poner en contacto individuos con culturas y peculiaridades muy distintas y desconocidas.

Por tanto, parece inevitable que en ese intercambio de culturas y civilizaciones también surjan problemas, que podremos minimizar si cuidamos el entorno y prevenimos el deterioro del planeta con medidas eficientes.

II. PANDEMIAS

Según la Real Academia Española (RAE), el término pandemia se define como una enfermedad epidémica causada por un microorganismo patógeno que se extiende a muchos países o que ataca a casi todos los individuos de una localidad o región, o sea, que afecta a un gran número de individuos y en una extensión geográfica amplia y que suele causar estragos en forma de secuelas o muertes (Figura 1).



Figura 1. Miniatura de Pierart dou Tielt, c 1353, mostrando a ciudadanos de Tournai enterrando a víctimas de la peste negra (Biblioteca Real de Bélgica).

Así pues, las pandemias, a diferencia de las epidemias que se desarrollan en un territorio limitado, se caracterizan por la propagación rápida y generalizada de la enfermedad a nivel mundial (Castañeda et al., 2021).

La OMS define una pandemia como la propagación mundial de una enfermedad infecciosa para la que define cuatro requerimientos clave (WHO-PAN, 2020):

- Primero: prepararse y estar a punto.
- Segundo: detectar, proteger y tratar.
- Tercero: reducir la transmisión.
- Cuarto: innovar y aprender.

La Dra. María Teresa Herrero Zamorano en su libro *Los algoritmos de la vida*, concluye que "para estudiar una pandemia y comprender su evolución se necesitan poner en juego muchas áreas de conocimiento. Una enfermedad infecciosa es un fenómeno biológico en su origen, epidemiológico en su contención, médico en el tratamiento, geográfico en su ubicación y expansión y matemático en su análisis" (Herrero Zamorano, 2025).

En esos modelos matemáticos cobran especial relevancia términos como "número reproductivo básico, que indica la tasa de contagio o transmisión" (R_0) o "número reproductivo efectivo" (Rc o Rt).

El R0 es la tasa de contagio esperable sin medidas especiales y con él se estima la velocidad con que una enfermedad puede propagarse en una población, o sea el número de casos nuevos con respecto a un periodo anterior. Por ejemplo, si R0 es igual a 2 significa que un individuo infectado es capaz de producir dos contagios y a su vez, cada uno de ellos otros dos y así sucesivamente. Siempre que sea superior a 1 la enfermedad se extiende en la población.

Esta tasa es muy útil para hacernos una idea general, pero nos oculta saltos en niveles más bajos. Por su parte, el Rc es la estimación de cuántas personas en promedio se han contagiado cada día a partir de los casos. La TABLA I indica el R_0 estimado para distintos virus.

TABLA I
VALOR DE Ro ESTIMADO PARA DIFERENTES ENFERMEDADES

Enfermedad	Ro
Sarampión	12-18
Viruela	6-7
Rubeola	5-7
Poliomelitis	5-7
Paperas	4-7
Ébola	1,5-2,5
Hepatitis C	1,2-1,7

Otros términos de interés son el "período de incubación" de una enfermedad definido como el tiempo transcurrido entre la exposición a un patógeno y el inicio de síntomas; el "intervalo serial" que transcurre entre el inicio de la enfermedad en el caso primario y el inicio de la enfermedad en los secundarios; así como la tasa de recuperación, el periodo latente, el riesgo de infección o la virulencia (Ridenhour et al., 2018).

Sin embargo, en salud pública la característica de mayor interés puede ser la tasa de ataque global, que es el porcentaje de individuos que enfermarán.

Todos estos parámetros son necesarios para comprender la infección, la transmisión, la evolución de la epidemia o pandemia e incluso la respuesta ante las soluciones adoptadas por parte de la autoridad competente. Por ejemplo, se puede evaluar el uso de vacunas si conocemos su eficacia y calibrar los objetivos de dicha vacunación, y conocer la población a inmunizar, como se muestra en la Figura 2 (Herrero Zamorano, 2021).

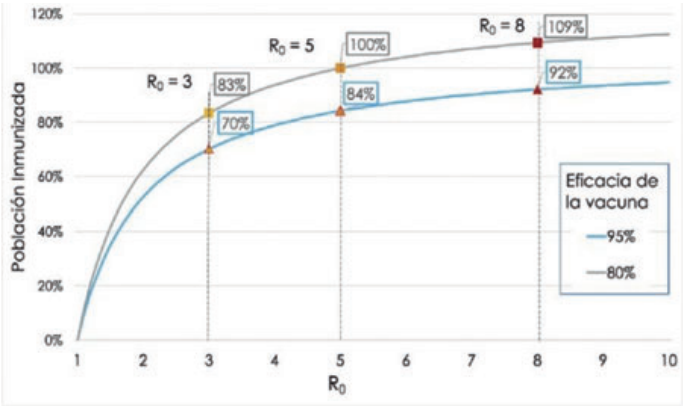


Figura 2. Porcentaje de la población que debe estar vacunada en función de la tasa de contagio, asumiendo una eficacia de la vacuna del 80 y del 95%.

Pero, independientemente de todos los modelos matemáticos y estudios epidemiológicos necesarios para la comprensión y solución de una pandemia infecciosa, siempre se requiere un microorganismo que se propague rápidamente y de manera extensa en una población, del que habrá que tener en cuenta su evolución para conocer la dinámica de la pandemia.

En una pandemia se pueden distinguir 6 fases: en la primera fase no hay casos en humanos; en la segunda tampoco hay casos en humanos, pero comienza el riesgo; la fase III es de alerta de pandemia, con casos confirmados en el laboratorio. Las fases IV a VI son propias de pandemia y atienden a la extensión geográfica que abarquen: una, varias o múltiples zonas geográficas (López-Goñi, 2020).

Aunque pueda parecer un concepto actual, ya se describen pandemias en las antiguas civilizaciones con las primeras concentraciones de individuos y animales domésticos, a pesar de que la población mundial era mucho menor y había menos contactos y menos viajes. En aquellos tiempos, eran las guerras las que causaban destrucción y propagaban las enfermedades (poco ha cambiado después de tantos siglos).

En los años 1200 a.C. se informa de una posible epidemia por gripe e Hipócrates describe una enfermedad respiratoria (¿gripe?) en el año 412 a.C. en su "Libro IV de las Epidemias" (López Piñero, 1987).

Entre los años 165 y 189, durante el asedio romano de Seleucia (Mesopotamia), la peste de Antonino acabó con la vida de 5 millones de personas. Se cree que pudo ser causada por el virus de la Viruela o del Sarampión (Cravioto & García, 2007).

Entre los años 541-542, la peste de Justiniano, producida por *Yersinia pestis,* llegó a matar a 25 millones de personas. O entre los años 1347 y 1353, la peste bubónica o muerte negra, provocada por la misma bacteria, se calcula que pudo acabar con la vida de hasta 200 millones de personas (Castañeda Guillot et al., 2021; Mordechai et al., 2019).

En las epidemias/pandemias pueden estar implicados todo tipo de microorganismos, pero de las 15 pandemias más mortíferas, donde se calculan más de 1 millón de muertos, 10 fueron causadas por virus.

III. VIRUS

III.1. PIRATAS DE LAS CÉLULAS

La existencia de los virus se demostró en el siglo XIX. En 1989 Martinus Beijerink repitió un experimento de Dmitri

Ivanoski que había aventurado que la enfermedad del mosaico de tabaco era causada por un organismo transmisible que no era retenido con los filtros más pequeños que retenían las bacterias (filtro de Chamberland, colaborador de Louis Pasteur) y que denominó como "contagium vivum fluidum" (germen viviente soluble). Este germen se multiplicaba solamente en células que se estaban dividiendo. Era el virus del mosaico del tabaco que no se visualizó hasta los años 30 (1939) del pasado siglo al microscopio electrónico (Figura 3). En el mismo año, Friedrich Loeffler y Paul Forsch, utilizando el mismo filtro descubrieron la causa de la fiebre aftosa del ganado, el primer virus animal, después de que L. Pasteur no lograse encontrar el agente causante de la rabia.

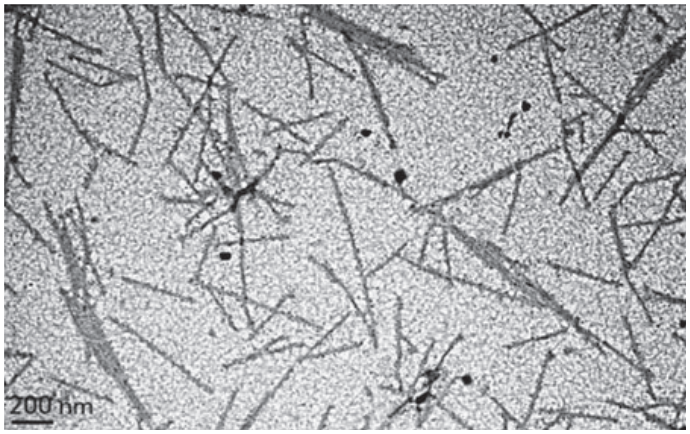


Figura 3. Micrografía del virus del mosaico del tabaco al microscopio electrónico de transmisión.

Los virus (del latín "veneno") son "microorganismos" sencillos que constan de genoma, proteínas y en algunas ocasiones envuelta, y que necesitan de otros organismos para su subsistencia. Desde siempre, subyace el dilema de si los virus son seres vivos o no. Aunque no parece que eso sea especialmente relevante, es raro que un biólogo corrija a otro por considerarlos microorganismos. Es más, habría que discutir qué consideramos "vivo" o "vida".

En algunos casos se enumeran características vitales como la locomoción, la nutrición, el crecimiento, la respiración, la excreción, la sensibilidad y la reproducción. Y según estos criterios, los virus no serían organismos vivos. Pero todos los organismos que consideramos vivos, ¿cumplen estos criterios?. ¿Una bacteria siente?.

Otros consideran que algo está "vivo" si es capaz de evolucionar por selección natural: hacer copias de sí mismo y cambiar de forma gradual, adquiriendo ventajas reproductivas. Y en este sentido, los virus son seres vivos.

Finalmente, algunos autores pueden hacer constar que la característica fundamental de un ser vivo es ensamblarse en estructuras biológicas complejas a partir del mundo inanimado, en contra de la segunda ley de la termodinámica, que promulga que la entropía (desorden) de un sistema se incrementa con el tiempo.

En cualquier caso, es cierto que los virus no son criaturas de "vida libre" independientes. Necesitan de una célula para vivir. Son los piratas de las células (Scott, Andrew, 1985).

Pero, ¿acaso el ser humano no depende de un entorno que le proporciona todas las condiciones de vida?: nosotros no somos tan dependientes como los virus, pero tampoco tan independientes como creemos. Es más, después de tantos procesos evolutivos se calcula que cerca de un 8% del genoma humano es de origen viral, porcentaje mayor que el que codifica nuestras propias proteínas, que no supera el 2%. Esta transferencia horizontal genómica se considera un método fundamental de evolución de los organismos celulares, donde los virus actúan como vehículos para transferir genes entre especies e insertarlos en el código genético (Figura 4) (Herrero Zamorano, 2025).

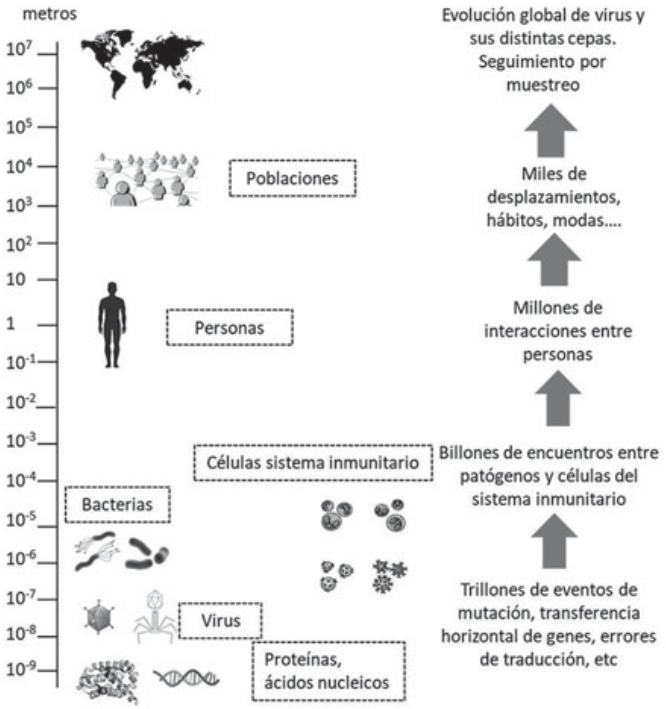


Figura 4. Evolución e integración de los genomas virales. (Herrero Zamorano, 2025).

Así que, rigurosos o no, debemos considerar que los virus son parte de la vida, y como tal, interaccionan con organismos "superiores" provocando alteraciones, que en la evolución natural serán beneficiosas para ambos, pero que en los inicios de su convivencia pueden provocar múltiples problemas.

III.2. COMIENZO O FINAL. CARACTERÍSTICAS VIRALES

Los virus son los "microorganismos" más pequeños conocidos hasta el momento oscilando entre 20 y 300 nm de diámetro. Están compuestos, básicamente, por ácido nucleico y proteínas. Son metabólicamente inertes, pero como cualquier otro microorganismo pueden hacer copias de su genoma y subsistir en un medio adecuado (celular).

Si antes se discutía si tenían vida o no, más difícil será dilucidar si son el comienzo o el final de la evolución.

Por su condición de parásitos (que sólo pueden vivir si explotan a un huésped) pueden tener su origen en estructuras que se reorganizan para aprovecharse de otros microorganismos y

de ahí evolucionar. O por el contrario, ¿debemos tener en cuenta la teoría regresiva que indica que el desarrollo evolutivo los ha simplificado tanto que son la tendencia final y descienden de orgánulos celulares?.

Es difícil responder a esas preguntas. Lo que sí es cierto es que los virus rompen con el dogma central de la biología propuesto en 1958 por Francis Crick, donde describía que la información genética tenía un flujo unidireccional de ADN a ARN y finalmente a proteínas (Crick, 1958; Crick et al., 1961).

Los virus son estructuras implicadas en transferir ácido nucleico de una célula a otra. Este ácido nucleico puede ser ADN o ARN, nunca ambos y en todas las modalidades posibles: desde ADN de cadena sencilla a ARN de doble cadena. Además los genomas pueden ser fragmentados, duplicados, de distinto tamaño... Así se reflejó en la clasificación propuesta por el virólogo David Baltimore en 1971 (Figura 5, original) (Baltimore, 1971).

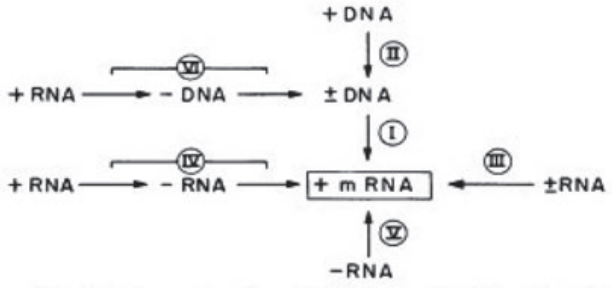


FIG. 1. *Examples: I = T4 phage, vaccinia virus; II = ΦX174; III = reovirus; IV = RNA phages, polio-virus; V = vesicular stomatitis virus, Newcastle disease virus; VI = RNA tumor viruses.*

Figura 5. Clasificación viral propuesta por David Baltimore en 1971. Los números romanos indican la clase de Baltimore a la que pertenecen.

En esta clasificación, se contemplaba la polaridad del genoma según su capacidad de duplicarse o de codificar otros genomas y proteínas. El genoma más versátil es el ARN+ (positivo), que además de crear otras copias genómicas para mantener su estirpe, es capaz de codificar proteínas directamente.

Una revisión de la clasificación primigenia que propuso Baltimore, añade un nuevo sistema de replicación-expresión (Figura 6 -original) (Koonin et al., 2021).

La existencia de ciclos de replicación-expresión diferentes al de las células eucariotas, parecen el legado de una etapa de la evolución donde el ARN (de cadena positiva) parece ser el centro de la ecuación (Figura 7 -original) (Koonin et al., 2021).

Si pensamos que los orígenes de la vida pudieron estar en una molécula de ARN, los consideraremos parte de nuestros ancestros. El ARN ribosómico (ARNr) contiene información secuencial, pero es también una enzima, por lo que puede haber llevado a cabo un desarrollo evolutivo autosostenible y autopropagable de información genética (Carey, 2015).

En 2009, un grupo de investigadores crearon dos moléculas de ARN que podían actuar como enzimas, que combinadas con bases simples de ARN lograron hacer copias de sí mismas y un sistema autosostenible. Cuando en el experimento introdujeron nuevas moléculas de ARN distintas, las moléculas más eficientes prevalecían, con lo que demostraban la selectividad del proceso

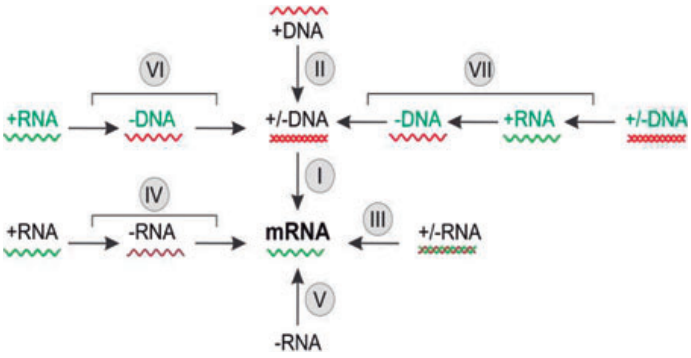


Figura 6. Clasificación de Baltimore revisada, con 7 grupos, donde se muestra la transferencia de información genética entre viriones con distinta dotación genómica. La doble cadena se representa como +/-.

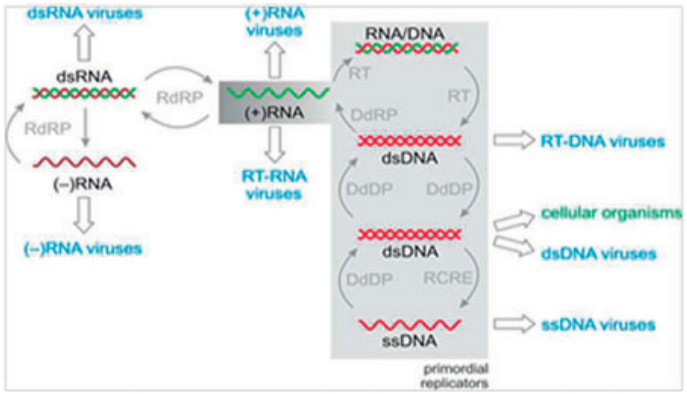


Figura 7. Clasificación de Baltimore revisada y evolución de los replicadores primordiales (sombreado). DdDP: ADN polimerasa dependiente de ADN; DdRP: ARN polimerasa dependiente de ADN; RdRP: ARN polimerasa dependiente de ARN; RCRE: endonucleasa de iniciación; RT: retrotrapcriptasa.

(Chen et al., 2010). Anteriormente, otros científicos consiguieron generar copias de sí mismas de las moléculas de ARN enzimáticas (da Costa Martins et al., 2008). La capacidad evolutiva de los virus reside en la aparición y estabilización de mutaciones en su genoma. La necesidad de los virus para sobrevivir en una célula provoca que, por lo general, tengan tasas de replicación muy altas y consecuentemente se produzcan mutaciones. Que serán más abundantes si su dotación genética es ARN, por la carencia de corrección de errores en sus polimerasas. Esto no quiere decir que todos los cambios genómicos sean válidos. En esas rondas de replicación se pueden sintetizar más del 90% de virus defectivos. Por ejemplo, el VIH es capaz de producir hasta 1010 partículas virales diarias, de las que más del 93% pueden ser defectuosas (Bruner et al., 2016).

Estas mutaciones pueden producirse como simple deriva génica o como cambios mayores. Deleciones, inserciones, recombinaciones e incluso reorganizaciones de genomas entre distintas especies que infectan (como con el virus de la Gripe) determinan la evolución de dicha especie (Burrell et al., 2016). Como parásitos intracelulares obligados con un limitado tamaño de genoma, los virus son una de las formas de vida más eficiente y económica: son capaces de incrementar su capacidad codificante utilizando más de un marco de lectura para obtener proteínas no relacionadas, ya sea mediante una iniciación alternativa durante la traducción, desplazando el comienzo de la lectura (varios ARNm del mismo fragmento), o fragmentando el ARNm.

El genoma de cualquier virus está recubierto por una nucleocápside proteica de codificación viral con simetría icosaédrica o helicoidal.

En algunos casos, pueden poseer una envuelta lipídica (virus con envuelta) de origen celular. La presencia de la envuelta condiciona su capacidad de infección. Los virus con envuelta insertan sus proteínas en la bicapa lipídica de diversos orgánulos celulares: membrana plasmática, aparato de Golgi, retículo endoplásmico o membrana nuclear. Estos virus son más lábiles que los virus "desnudos", pero también son mejor tolerados al tener un componente del huésped.

Los virus desnudos icosaédricos con un ARN positivo, parecen ser la solución más sencilla para llevar ARNm a los ribosomas de la célula huésped y se pueden relacionar con el comienzo de la vida. Pero la necesidad de un virus para poder replicarse y desarrollarse y la capacidad de especializarse para infectar distintos tipos de células, sugieren un estado evolutivo alto. Así que, se desconocen todavía muchas estrategias de expresión y amplificación genética viral.

Determinar si los virus son el comienzo o el final de la evolución quedará pendiente para nuestra inventiva. En cualquier caso, lo que no se puede negar es que hay una interacción con otros organismos.

El virus alcanza el organismo utilizando distintas vías de transmisión, aunque la transmisión aérea parece la más efectiva por la gran cantidad de virus que se pueden liberan (Figura 8).

Independientemente de la adquisición de la infección y a pesar de ser muy distintos unos de otros, su ciclo vital es similar en todos: adhesión a la célula, penetración (por varios mecanismos), replicación y ensamblaje (Knipe & Howley, 2020).

Una vez infectado el organismo, el virus puede permanecer de por vida en estado crónico con largos periodos de incubación (VIH), en estado latente provocando problemas periódicos (grupo herpes) o abandonar el huésped rápidamente (virus respiratorios) (Figura 9).

La gravedad de la infección dependerá del tipo de virus y de las condiciones inmunológicas y sanitarias del huésped. Habrá virus banales que, por lo general, no provocan grandes problemas. Otros, sin embargo, son de difícil curación (ébola) o, incluso, son prácticamente mortales (rabia).

Pero también dependerá de si los virus tienen un único huésped o pueden infectar distintos tipos de organismos o animales donde pueden modificar o reorganizar su genoma y cambiar su virulencia. En este caso, los huéspedes/vectores intermedios actuarían como laboratorios de "nuevos" virus.

La extensión de la infección dependerá de la facilidad de la transmisión. La transmisión aérea será la más efectiva. Pero también será muy efectiva donde haya una intervención de vectores (sobre todo insectos), por la dificultad de control de los mismos.

IV. LOS DOS JUNTOS: PANDEMIAS Y VIRUS

Como se comentaba anteriormente, siempre hay una relación estrecha entre los microorganismos y los organismos superiores, entre los que se encuentra el hombre. Desde hace más de 10000 años, con la aparición de la agricultura, la domesticación de los animales, el hacinamiento de la población en núcleos urbanos y,

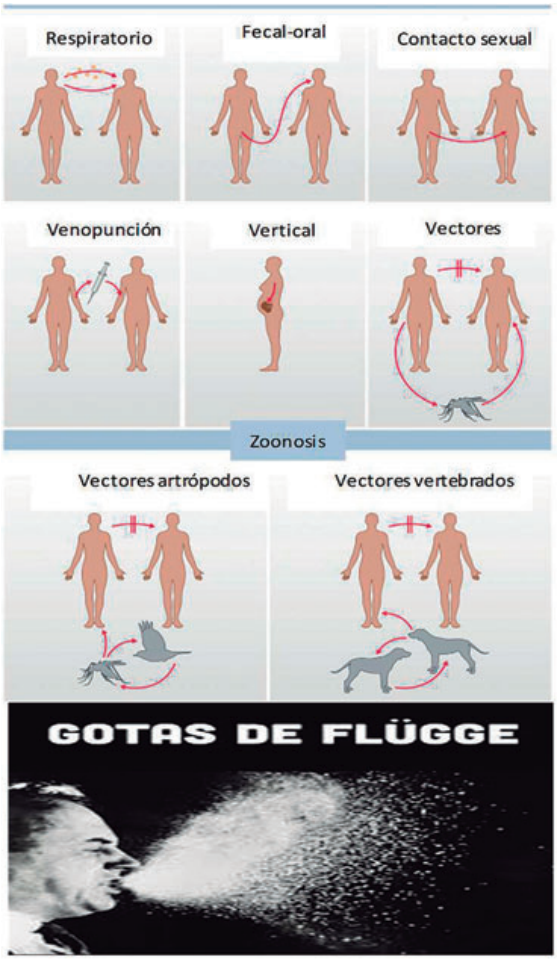


Figura 8. Vías de transmisión (Burrell et al., 2016), con imagen de estornudo con liberación de las partículas de Flügge, que pueden portar virus.

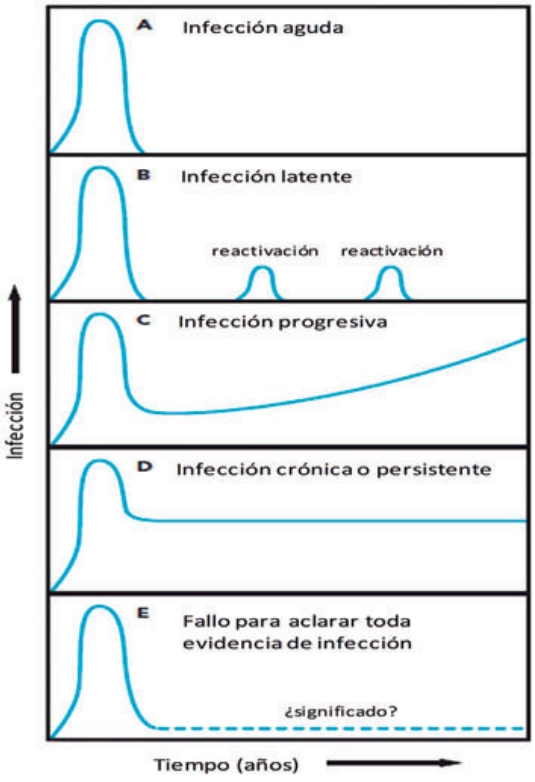


Figura 9. Tipos de infección viral (Knipe & Howley, 2020).

en muchos casos, las condiciones insalubres de esas ciudades, se disparan las enfermedades transmitidas desde otros animales (zoonosis) y son difíciles de controlar. Si a esto unimos el desplazamiento de personas para comerciar o invadir otras zonas, se crea un caldo de cultivo excelente para provocar epidemias.

Un ejemplo típico de esta situación fue la llegada de la peste a Europa de la mano de los invasores mongoles o, más bien, de las ratas que los acompañaban en sus campamentos. O la llegada de la viruela o el sarampión al continente americano de la mano de los europeos. Con estos ejemplos ya podemos deducir que el carácter local de las epidemias empieza a perder sus límites, a ser más extenso y casi podríamos utilizar el término de pandemia.

Entre los microorganismos que pueden provocar estas epidemias/pandemias, están los virus, que cuando infectan a humanos pasan por unas fases de adaptación que, en la mayoría de las ocasiones, incluyen huéspedes intermedios (Figura 10).

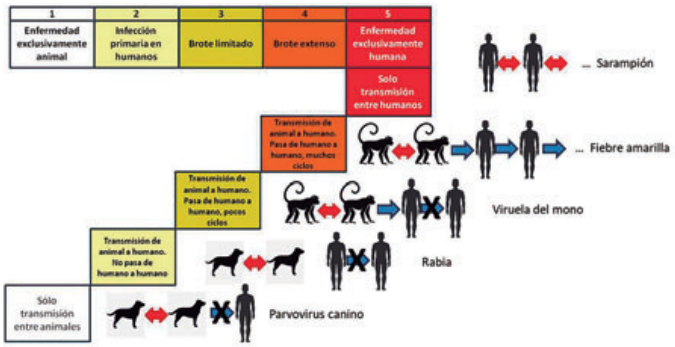


Figura 10. Fases de adaptación de diversos virus humanos (Herrero Zamorano, 2025).

Los virus se reconocen en el momento que provocan problemas concretos, periódicos y extensos en los humanos, sin negar que el virus haya existido desde mucho tiempo atrás. Virus como el Sarampión, la Fiebre Amarilla o la Gripe, llevan provocando problemas desde incluso la era antes de Cristo, como se indicaba en la introducción. Si anteriormente se comentaba que en 15 de ellas se calculaba más de 1 millón de muertos, un dato a tener en cuenta es que de las 10 pandemias más mortíferas, 7 son causadas por virus. (TABLA II).

Ante una pandemia la facilidad de la transmisión del microorganismo, la desprotección de la población y las condiciones sociales deficientes van a influir en su gravedad.

En las pandemias por virus podemos reconocer virus de siempre, como los virus de la Viruela o el Sarampión o la Poliomielitis, los transmitidos por vectores como los de la Fiebre Amarilla o el Dengue, entre otros, y los de última "generación" como el Ebola, el SARS-Cov2 o el MERS.

Virus como la Gripe, VIH o SARS-Cov2 merecen capítulos aparte.

Como se puede observar en la tabla anterior, el virus que mayor mortalidad ha causado en un único proceso (o pandemia) es el **virus de la Viruela** o **virus Variola**, perteneciente a la familia de los Poxviridae. Se trata de un virus ADN de doble cadena, con envuelta, que sólo infecta a humanos y que se transmite principalmente por contacto directo.

La primera evidencia de la viruela se puede encontrar en los restos del faraón egipcio Ramsés V, sobre el año 1145 a.C. En los siglos XVII y XVIII, la viruela se extendió por toda Europa. Sólo en Inglaterra afectó a más del 90% de la población. Con la infección del virus, más del 30% de las personas podían morir en pocos días, pero esa mortalidad podía alcanzar el 80% de los casos y supuso más de 300 millones de defunciones. Pero se tiene constancia que en siglos anteriores la viruela ya había provocado estragos. Por ejemplo, en el siglo VIII había causado más de dos millones de muertos en Japón (Suzuki, 2011), o en los años 1519-1520 en México supuso más de 8 millones de fallecidos (Acuna-Soto et al., 2002).

TABLA II
TASA DE LETALIDAD Y MUERTES ASOCIADAS A DIFERENTES ENFERMEDADES

Enfermedad	Año descubrimiento	Patógeno	Tasa de letalidad	Muertes ($x10^6$)
Viruela	1795	Variola virus	30%	>300
Sarampión	1954	Morbillivirus	2%	>200
Peste bubónica	1894	*Yersinia pestis*	80%	>150
Hepatitis B	1963	Hepadnavirus	3%	>60
Gripe	1918	Influenza A/H1N1	20%	>50
SIDA	1981	VIH-1	100%	>40
Hepatitis C	1989	Flavivirus	3.9%	>15
Fiebres entéricas	1885	*Salmonella enterica*	10%	>12
Cólera	1854	*Vibrio cholerae*	40%	>10
Covid-19	2019	SARS-Cov2	1.25%	>7

La infección cursaba con fiebre alta repentina, a veces con petequias (pequeños puntos rojizos en la piel), a los que se asociaba dolor de cabeza, de espalda, vómitos y postración. En uno o dos días aparecía una erupción que comenzaba en la boca y se extendía centrífugamente por el tronco hasta alcanzar las extremidades. La erupción comenzaba con máculas que progresaban a pápulas y costras. (Figura 11).

Pero para ser justos, también hay que comentar que la viruela impulsó la vacunación al ser la primera enfermedad sobre la que se ensayó una especie de inmunización pasiva. (Knipe & Howley, 2020; Tuells & Ramírez, 2003).

El virus de la Viruela es el único que se ha erradicado de la naturaleza, en concreto en 1980, después de que la OMS instaurara un programa de vacunación universal en 1959 (WHO-SPox, 2010).

Esto se consiguió porque la viruela es una enfermedad que sólo ocurre en humanos y por lo tanto no hay reservorios animales donde se pueda "esconder" el virus. Además el virus es muy estable y homogéneo genéticamente y siempre que infecta a un ser humano se manifiesta la enfermedad, con lo que no hay portadores asintomáticos que pueden transmitirla (por contacto estrecho) sin conocimiento. El diagnóstico es fácil y rápido, condición esencial para controlar una infección. Una vez pasada

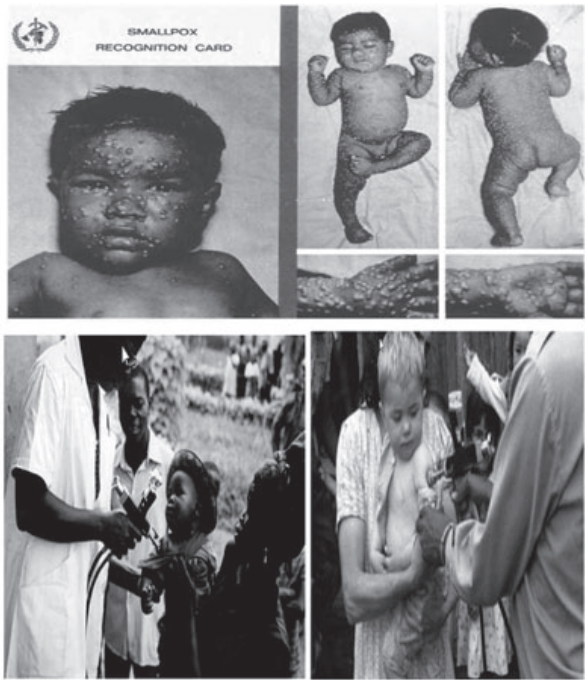


Figura 11.-Lesiones típicas de la viruela y programa de vacunación de la OMS para su erradicación (WHO, 2010).

la infección, quedaba el recuerdo inmunológico que protegía en nuevos contactos con el virus (WHO-SPox, 2010; López-Goñi, 2020/2020).

Aunque la pandemia se define como la propagación generalizada de un microorganismo "rápidamente", otro virus ADN que supone un gran problema no tanto por la rapidez de propagación, pero sí por su extensión es el **virus de la Hepatitis B** (VHB), de la familia Hepadnaviridae.

La OMS estima que en la actualidad, más de 255 millones de individuos están infectados con el VHB, de los cuales 25% desarrollarán una enfermedad crónica del hígado, un carcinoma hepatocelular o morirán. Geográficamente, más del 80% de los individuos infectados se encuentran en África o Asia.

Cada año se producen 1,2 millones de nuevas infecciones y en 2022 se calcula que murieron 1,1 millones de personas por la hepatitis B (WHO-VHB, 2024).

El VHB es un virus singular, ya que su ADN de doble cadena es pequeño (3000 pb) y una cadena supone dos tercios de la otra. Es un virus de sólo 22 nm y desnudo, lo que lo convierte en un virus resistente. Tiene la característica de, en algunos casos, permanecer en el organismo replicándose continuamente (infección crónica). Se puede transmitir por contacto con fluidos corporales o de madres a hijos.

La coloración amarillenta de la piel, orina oscura, cansancio, náusea, vómitos o dolor abdominal son síntomas indicativos de tener una hepatitis.

Actualmente hay vacunas y tratamientos antivirales satisfactorios que permiten evitar y/o controlar la infección, pero poco accesibles a países en desarrollo.

Tanto el virus de la Viruela como el VHB son virus ADN, pero son los virus ARN los que pueden causar mayores problemas a toda la población por su alta capacidad de mutación y su dificultad de control. Y sobre todo si son desnudos y se transmiten por vía aérea.

Uno de esos virus ARN que han provocado problemas a lo largo de la historia fue el **virus del Sarampión**.

Es un virus de la familia Morbilliviridae, de ARN de cadena sencilla, pleomórfico (longitud variable), grande (300 nm) con envuelta y altamente virulento. De hecho se considera que tiene la tasa de reproducción más alta (R_0=12-18, TABLA I).

El sarampión es una enfermedad relativamente nueva en humanos adquirida posiblemente de los gatos domésticos, aunque filogenéticamente el virus que la provoca se parezca más al Morbillivirus del ganado. Se caracteriza por presentar unos pródromos con fiebre, coriza, tos y conjuntivitis, seguida de una erupción maculopapular generalizada, que en ocasiones puede desembocar en encefalitis o meningitis. Extraordinariamente (1 de cada 10000 infecciones) puede provocar la Panencefalitis esclerosante subaguda, enfermedad neurológica mortal.

La transmisión más eficiente se realiza por contacto directo con un individuo infectado, pero el virus puede permanecer en gotas que expulsamos durante horas y suele ser más contagioso unos días antes de que comience la típica erupción (Figura 12).



Figura 12. Lesiones típicas del sarampión. https://basicmedicalkey.com/measles-virus.

No se conocen reservorios animales. Para mantener la infección, estudios matemáticos indican que se necesitaría una núcleo de población entorno al medio millón de personas, que era la población que tenían las civilizaciones urbanas de la antigua Sumeria 3000 años a.C., que es cuando se postula que pudo emerger el virus. Aunque no se conoce exactamente su origen, si parece que fueron las poblaciones de Oriente Medio las que pudieron mantener su transmisión.

Las primeras descripciones de la enfermedad las realizó Abu Becr (mediados del siglo IX, conocido en occidente como Rhazes de Bagdad), un médico árabe que definía el sarampión como "hasbah" (erupción), donde la ansiedad mental, las náuseas y la opresión en el pecho eran mayores que en la viruela. Ya en el siglo VIII, la infección se extendió a Francia a través de los Pirineos con la invasión de los sarracenos. Posteriormente, entre los siglos XI y XII también se registran repetidas epidemias caracterizadas por erupciones cutáneas, a las que se denominó con el término italiano de "morbilli" (pequeñas enfermedades). Entre los siglos XVI y XVIII se constatan varias epidemias en el norte de América. (Knipe & Howley, 2020).

El sarampión todavía provoca alta mortalidad en niños, pero de nuevo la vacunación universal, como en el caso de la viruela, logró controlar la infección, aunque todavía no se haya logrado erradicar el virus. Posiblemente por la falta de campañas en los países en desarrollo y la corriente antivacunas actual en algunos países más "desarrollados".

Una de las enfermedades que más casos produjo en el siglo XX fue la poliomielitis. Aunque los problemas se hayan registrado en el siglo pasado, se piensa que es una enfermedad

antigua desde que un grabado egipcio de un joven con una extremidad atrofiada del segundo milenio a.C. muestre una secuela de la enfermedad. En 1840, von Heine publicó una monografía que describía con precisión los síntomas de la enfermedad, posteriormente completada por Medin, de ahí que la poliomelítis paralítica también se conozca como enfermedad de Heine-Medin (Figura 13).



Figura 13. Imagen fechada en el segundo milenio a.C en Egipto de un caso posible de polio y niños con poliomielitis.

En el siglo XX se comenzó a considerar que la enfermedad tenía una naturaleza infecciosa.

La poliomielitis que afecta principalmente a niños pequeños (menores de 5 años), con una incidencia estacional, entre julio y octubre. Está provocada por un Enterovirus (**virus de la Polio** o **Poliovirus**, de la familia Picornaviridae), considerado uno de los virus más simples: pequeño (unos 20 nm, de ahí Pico), con genoma ARN (Pico-rna) y sin envuelta (por tanto resistente a las condiciones externas). El virus de la Polio fue el primer virus clonado y secuenciado, el primer virus ARN de animales reconstruido con características infecciosas y del que primero se obtuvo su estructura tridimensional por cristalografía de rayos X (Knipe & Howley, 2020).

Se transmite de persona a persona con la ingesta de alimentos o agua contaminada y se replica activamente en el intestino. Puede cursar como una infección asintomática pero los portadores transmiten fácilmente la infección, por lo que se extiende rápidamente entre la población, sobre todo en condiciones de poca higiene. Puede llegar a causar secuelas neurológicas graves o paralizar los músculos pulmonares y causar la muerte.

En el año 1952 se llegaron a contabilizar 58000 casos de polio en EEUU. La alta incidencia, la fácil transmisibilidad y la gravedad de la infección obligaron en los años 50/60 del pasado siglo a desarrollar vacunas contra los tres genotipos conocidos

Los casos provocados por Poliovirus salvaje han disminuido un 99% desde que en 1988 se estableciesen campañas de vacunación por parte de la OMS, cuando la enfermedad era endémica en 125 países y se contabilizaban cerca de 350000 casos. Las vacunas lograron erradicar los genotipos 2 y 3, sin embargo, todavía hay focos de genotipo 1 en Afganistán y Pakistán, donde se considera una enfermedad endémica. En estos países, más que el tipo circulante del virus, el problema al que se enfrenta su eliminación o erradicación es la condición de subdesarrollo (WHO-Polio, 2026).

IV. 2. ARBOVIRUS. LA IMPOTANCIA DE LOS VECTORES

Los Arbovirus son unos microorganismos que tienen en común que se transmiten por artrópodos. Por sus siglas en inglés: **AR**trhopod, **BO**rne, **virus**es.

No son un grupo filogenético definido, sino que comprenden distintas familias como Flaviviridae (por ejemplo virus de la Fiebre Amarilla, del Dengue, virus West-Nile –Nilo Occidental- o del Zika –que se verá posteriormente- todos del género Flavivirus, familia a la que también pertenece el virus de la Hepatitis C, del género Hepacivirus), Togaviridae (como el virus Chikungunya) o Bunyaviridae (como el virus Crimea-Congo).

Unos de los virus que más problemas ha provocado a la largo de los siglos es el **virus de la Fiebre Amarilla**. Es el virus más representativo y que definió al género, ya que "Flavus" en latín es amarillo, término asignado por la ictericia que causaba en el organismo la disfunción hepática y provocaba ese color amarillento en la piel. La enfermedad se caracterizaba por presentar fiebre, ictericia, hemorragias y vómitos negros. Conocida como vómito negro o plaga americana, fue una de las enfermedades más importantes y devastadoras en América y África durante los siglos XVIII a XX con brotes periódicos que afectaban a miles de personas.

El Dr. Carlos Juan Finlay y Barrés (médico hispano-cubano, 1833-1915) fue el primero que a finales de los años 80 del siglo XIX propuso a la hembra del mosquito *Aedes aegypti* (Figura 14) como la transmisora de a la enfermedad, que a finales del siglo XIX causó más muertos en Cuba que la guerra que se libraba entonces.

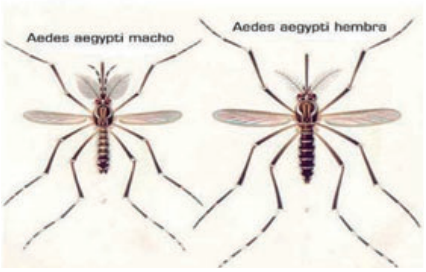


Figura 14. Esquema de los géneros del mosquito *Aedes aegypti*.

Por esa misma época, el comienzo de la construcción del canal de Panamá tuvo muchos retrasos por los continuos brotes de malaria y fiebre amarilla. En ambos casos, la forma de atajar los brotes epidémicos consistía en controlar el vector más que el virus en sí. Su origen parece estar en África, aunque el primer caso registrado fue en Yucatán (México) en 1640, posiblemente relacionado con el comercio de esclavos (López-Goñi, 2020/2020).

El virus de la Fiebre Amarilla, como otros Flavivirus, poseen un genoma ARN de cadena positiva sencilla, de tamaño medio/pequeño (50 nm) y con envuelta.

La transmisión puede ser a través del *A. aegypti*, pero también de otras especies de *Aedes sp.*, *Haemagogus sp*. o *Sabethes sp*. mosquitos que pican de día.

La fiebre amarilla sigue dando problemas en la actualidad. En diciembre de 2015 hubo uno de los peores brotes en Angola, que se extendió al Congo, Kenia, Marruecos o China.

La OMS calcula que cada año se pueden llegar a infectar unas 170000 personas, de las que 80000 pueden morir (sobre todo en África).

En la actualidad se dispone de una vacuna segura y asequible que con una sola dosis protege de por vida. Pero también se debe hacer prevención con el control del vector: eliminando los criaderos de mosquitos (por ejemplo agua estancada), utilizando larvicidas, además de vestir ropa protectora o utilizar repelentes (WHO-YF, 2025; WHO-ARB, 2026).

El **Dengue** (o fiebre quebrantahuesos), una de las infecciones virales más comunes transmitidas por mosquitos, está provocada por otro Flavivirus. La OMS calcula hasta 400 millones de infecciones anuales, sobre todo en zonas tropicales o subtropicales.

La mayoría de las personas que adquieren la infección no tienen síntomas o presentan síntomas leves como fiebre, cansancio, dolor de cabeza, nauseas y/o erupciones en la piel. Pero hasta el 5% de los casos pueden complicarse y producir hemorragias y muerte.

En las últimas décadas la incidencia del dengue ha aumentado considerablemente. Según la OMS, los casos notificados en el año 2000 apenas superaban el medio millón y en 2024 casi llegaron a 15 millones, ocurriendo en más de 100 países de todos los continentes, aunque el más afectado fue el continente americano. Ese mismo año se asociaron 13000 muertes al dengue (WHO-Dengue, 2024).

Existen 4 genotipos diferentes del virus y su origen parece ser un virus Dengue de simios (Figura 15).

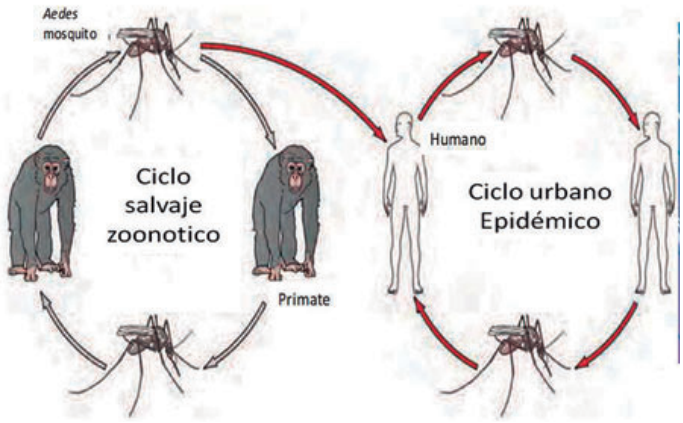


Figura 15. Ciclo de vida del virus del Dengue (Knipe & Howley, 2020).

Una primera infección con uno de esos genotipos no impide la infección por otro genotipo. De hecho, se cree que esa segunda infección del virus es la que causa una enfermedad más grave. Últimamente también se ha asociado la gravedad de la infección al genotipo tipo 2. Pero esa gravedad depende de múltiples factores, donde se incluyen condiciones del huésped, además de las características del virus (Kantor, 2025).

El virus se ha detectado en fluidos vaginales y sexuales, lo que sugiere que es posible una transmisión sexual del virus, aunque los datos que se tienen por el momento son escasos.

Otro Flavivirus que provocó un aumento de infecciones al final del siglo XX fue el virus del Nilo Occidental.

En 1999 se notificó el primer caso en New York y sólo tres años después se registraban más de 4000 casos repartidos en 44 estados y causando cerca de 300 muertos. En una década ya había llegado a todos los estados de la unión y las muertes alcanzan el millar (López-Goñi, 2020/2020).

Sin embargo el virus ya se había identificado en 1937 en una mujer del Nilo Occidental en Uganda. En 1957 se identificó en aves, donde no parecía causar problemas, hasta que una variante más virulenta empezó a provocar encefalitis, parálisis y muerte. Esa cepa es la que se cree que pasó a los humanos y a los equinos a través de los mosquitos, en esta ocasión del género Culex sp. (Figura 16).

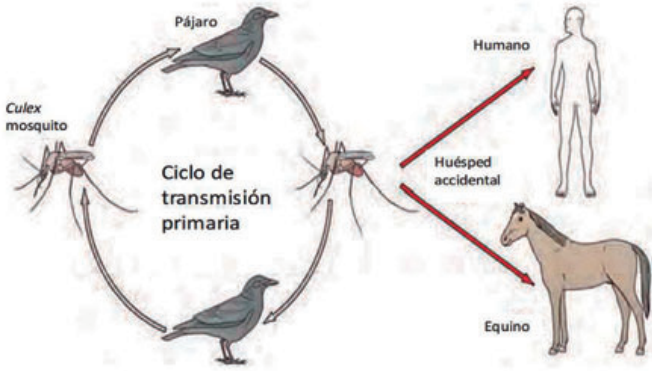


Figura 16. Ciclo de vida del virus del Nilo Occidental (Knipe & Howley, 2020).

En el 80% de los casos, la infección por el virus del Nilo Occidental es asintomática. En algunos casos puede presentar fiebre, cansancio, dolores corporales, nauseas. Y en ocasiones puede llegar a causar una enfermedad neuroinvasora como encefalitis, meningitis o poliomielitis (WHO-WN, 2017).

Uno de los síntomas más curiosos que se observaban en algunos pacientes en África a mediados del siglo pasado eran producidos por una enfermedad que impedía andar erguidos. En este caso el causante de los síntomas era un Togavirus, similar a los Flavivirus, el **virus del Chikungunya**, que en lengua makonde significa postura retorcida.

Además de este signo característico provocado por la inflamación de las articulaciones, la infección cursaba con síntomas similares a otros virus transmitidos por vectores como el Dengue: fiebre, dolores articulares, náuseas, cansancio y erupciones cutáneas (Figura 17).



Figura 17. Síntomas del virus Chikungunya. https://www.cmhw.icrt.cu/ciencia/el-chikungunya-del-dolor-y-otras-secuelas

Es un virus ARN de unos 70 nm de diámetro y con envuelta. Se describió por primera en 1952 en la actual República de Tanzania (Bettis et al., 2022) y desde entonces los brotes han ido en aumento, posiblemente después de que el virus sufriese una serie de mutaciones que favoreciesen su propagación a través del vector *Aedes albopictus*, más frecuente que el mosquito original que infectaba (*A. aegypti*).

En 2007 se registró un brote en Italia, donde el mosquito era ya muy abundante.

Hasta ahora se ha detectado en más de 110 países de Asia, África, Europa y América. En todas las regiones donde hay poblaciones de *A. albopictus* o *A. aegypti* se han registrado casos y una transmisión muy rápida. En 2014 se declaró el primer caso autóctono en Florida (EEUU). Un año más tarde se confirmaron 24000 casos, del millón que se calculaba que se podrían haber infectado.

Aunque la mortalidad es muy baja, el número de afectados es tan grande que las consecuencias pueden ser muy graves. Y puede ser mayor si los vectores se van adaptando a ambientes donde el cambio climático puede conducir a cambios de temperatura, humedad o precipitaciones (López-Goñi, 2020).

Pero no sólo los mosquitos son los vectores "culpables" de la propagación de las infecciones virales y la causa de brotes epidémicos. El **virus Crimea-Congo**, un Bunyavirus de ARN largo y tamaño "grande" (120 nm) con envuelta, se transmite a través de garrapatas del género *Hyalomma* (Figura 18).

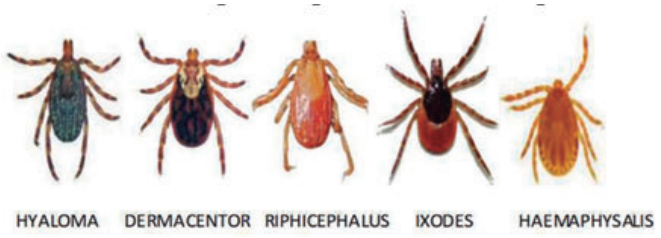


Figura 18. Tipos de garrapatas (https://www.scsalud.es/garrapatas)

La primera vez que se asoció una enfermedad a este virus fue en 1944, cuando se observó un brote de fiebres hemorrágicas de soldados rusos en la península de Crimea. En 1969 se demostró que el agente responsable era el mismo que el que había provocado patologías similares en el Congo. De ahí su nombre virus Crimea-Congo. Los síntomas comienzan con fiebre, mialgia, dolor y rigidez de nuca, lumbago, cefalea, irritación de los ojos y fotofobia. Las tasas de letalidad de los brotes puede alcanzar hasta el 40%.

La enfermedad se ha descrito en más de 30 países de África, Asia, Europa y Oriente Medio, donde se considera endémica. En la última década se han producido brotes en Turquía, Grecia, Bulgaria, Albania, Kosovo, Ucrania y Rusia. También en España se han declarado casos de Crimea-Congo, desde que en 2016 se diagnosticaron los dos primeros (López-Goñi, 2020; WHO-CC, 2025).

En este grupo de virus hay que tener en cuenta que además del microorganismo en cuestión, en muchas ocasiones hay que actuar sobre el vector. Igual que viajan las personas, los vectores también lo pueden hacer en cualquiera de los miles de materiales que hoy día se transportan a lo largo y ancho del planeta. Incluso se puede comprobar que los virus se pueden adaptar a vectores específicos de las regiones a las que llegan: no parece necesario que existan los vectores específicos en los que habitualmente se encuentran. La transmisión puede ser mayor si los vectores se van adaptando a ambientes sometidos al cambio climático.

Por eso, desde hace unos años existe una red europea de vigilancia de artrópodos (mosquitos, garrapatas, piojos y pulgas) que pueden actuar como vectores de enfermedades infecciosas.

IV.3. EL SIGLO XXI

Hace una década (mayo de 2016) científicos de varios países instaban a la OMS y al Comité Olímpico Internacional a cambiar el lugar de celebración de los Juegos Olímpicos de Río de Janeiro por el aumento de casos de infección del **virus del Zika**, un Flavivirus, como otros del apartado anterior, que se transmite a través de mosquitos del género *Aedes sp*.

El virus se identificó por primera vez en 1947 en Uganda en un mono Rhesus y posteriormente en humanos. Entre las décadas de 1960 y 1980, las infecciones humanas eran esporádicas en África y Asia, pero en 2007 se empezaron a detectar brotes en esas zonas y en América.

En el periodo 2015-2016 se diagnosticaron en Brasil 90000 casos de Zika, de los que 2000 eran infecciones congénitas: recién nacidos con microcefalia (Figura 19) y malformaciones fetales.

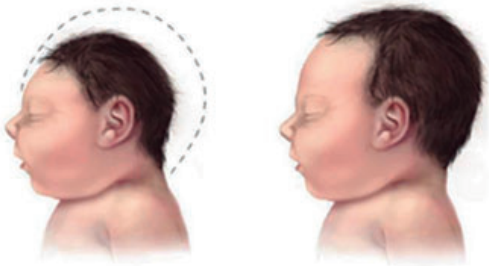


Figura 19. Esquema de la microcefalia por infección con el virus Zika. https://vacunasaep.org/profesionales/noticias/primera-vacuna-zika

Además de la microcefalía, la infección por el virus se asoció también al síndrome de Guillen-Barre (enfermedad neurológica y autoinmune), neuropatías y mielitis (de Araújo et al., 2018).

El virus se identificó por primera vez en 1947 en Uganda en un mono Rhesus y posteriormente en humanos. Entre las décadas de 1960 y 1980, las infecciones humanas eran esporádicas en África y Asia, pero en 2007 se empezaron a detectar brotes en esas zonas y en América.

En el periodo 2015-2016 se diagnosticaron en Brasil 90000 casos de Zika, de los que 2000 eran infecciones congénitas: recién nacidos con microcefalia (Figura 19) y malformaciones fetales. Además de la microcefalía, la infección por el virus se asoció también al síndrome de Guillen-Barre (enfermedad neurológica y autoinmune), neuropatías y mielitis (de Araújo et al., 2018).

A partir de 2017 los casos de Zika disminuyeron, pero sin llegar a desaparecer, sobre todo en América del Sur (WHO-Zika, 2025).

En marzo de 2014, saltó la alarma en los servicios de salud de Guinea porque dos aldeas del sur del país empezaron a comunicar varios casos de muerte por causa desconocida. A finales de

marzo, el Ministerio de Salud de Guinea declaraba un brote por **virus del Ébola**, que afectaba a medio centenar de personas.

Se piensa que los murciélagos son el huésped natural y que el virus se transmite por contacto estrecho. Es muy virulento y provoca una enfermedad muy grave donde la letalidad supera el 50% y puede alcanzar hasta el 90%. El origen del brote de 2014 se situó en diciembre de 2013, cuando un niño, jugando con un murciélago, adquirió el virus y se murió. Los ritos funerarios de la zona, donde los familiares se despiden del fallecido lavándolo, besándolo y abrazándolo, provocaron que también se infectasen y muriesen la madre, la abuela y una hermana del niño. La infección se transmitió a muchos familiares que posteriormente provocaron el brote indicado en marzo de 2014. Durante unos meses, Europa estuvo en alerta ante la posibilidad de la llegada de casos, pero España fue el único país con un caso autóctono: una enfermera que trató a un misionero repatriado por la infección. La enfermera se recuperó. El misionero desgraciadamente falleció.

La primera vez que se identificó al virus fue en 1976 en el Congo (antes Zaire) y Sudán, donde se detectaron más de 500 casos con una tasa de mortalidad de un 75%. Desde entonces se han registrado más de 20 brotes en África central (Knipe & Howley, 2020).

El virus pertenece a la familia Filoviridae, cuyo genoma es ARN, pleomórfico con envuelta y está considerado como patógeno de nivel 4 (el más virulento y peligroso) (Figura 20).

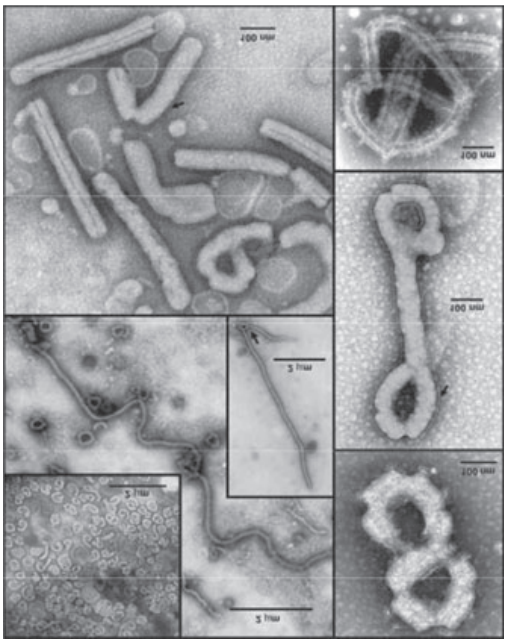


Figura 20. Micrografías de Filovirus al microscopio electrónico (Knipe & Howley, 2020).

El virus del ébola sigue la premisa de que la gravedad de la infección es proporcional a su baja capacidad de transmisión. Pero en estos casos, su alta letalidad obliga a seguir estando alerta ante su aparición.

En el momento de escribir este artículo (junio de 2026), los CDC (siglas derivadas de *Centers for Disease Control and Prevention* –de EEUU) alertaba de un brote del virus Ebola, del subtipo Bundibugyo en la República Democrática del Congo y en Uganda, que afectaba a unos 400 individuos de los que se notificaban al menos 61 muertes, demostrando una vez más su alto grado de letalidad (CDC, 2026).

Como curiosidad científica, en 2010 se descubrió un "pariente" del ébola por reconstrucción genética a partir de cadáveres de murciélagos, el Filovirus Lloviu en la cueva homónima de Asturias, y se clasificó en un nuevo género, el Cuevavirus. No se sabe si ese virus es incluso patógeno para los murciélagos, ya que no se ha podido cultivar y ensayar con él. Un patógeno similar descubierto en Hungría y que si se ha podido aislar, no parece provocar grandes trastornos.

Por lo tanto, parece claro que estos virus no suponen ningún problema para los humanos, pero también que no estamos tan lejos del riesgo (Negredo et al., 2011).

A primeros de siglo, dos virus de la misma familia, **Coronaviridae**, fueron objeto de atención especial Los Coronavirus son unos virus ARN, de tamaño medio (120 nm) con envuelta y que provocan infecciones respiratorias y gastrointestinales en humanos, igual que en aves o cerdos, de donde se supone que se adquieren.

Fueron los primeros virus en establecerse como grupo taxonómico en los años 60 del pasado siglo gracias a la microscopía electrónica. Y fue la Dra. June Almeida (de soltera June Dalziel Hart) la primera investigadora que los observó en 1964 (Figura 21) (Almeida June et al, 1979).



Figura 21. Dra. June Almeida y micrografías de Coronavirus al microscopio electrónico (Knipe & Howley, 2020).

Hasta comienzos de este siglo, los Coronavirus se asociaban con infecciones del tracto respiratorio superior y con letalidad baja. Sin embargo, en el 2003 el Dr. Carlo Urbani, que trabajaba en Hanoi para médicos sin fronteras, alertó a la OMS de una enfermedad respiratoria grave altamente contagiosa que había diagnosticado en un paciente que falleció. Los adelantos tecnológicos que se empezaban a imponer en ese momento (secuenciación masiva de nueva generación) lograron conocer toda la secuencia del agente causal en menos de dos meses.

El virus se denominó coronavirus de dolor (distress en inglés) respiratorio agudo o, por sus siglas en inglés **SARS-CoV** (*Severe Acute Respiratory Sindrome Coronavirus*). La rápida respuesta de la OMS pudo salvar muchas vidas. Desgraciadamente no la del Dr. Urbani. Hoy se sabe que la infección comenzó en China y de ahí se expandió a Hanoi (Vietnam), Singapur y a otros países de otros continentes: Irlanda, Canadá, EEUU o Alemania.

La transmisión aérea del virus aumentó la preocupación de una diseminación incontrolable en la población. Sin embargo,

la propagación fue relativamente ineficaz, posiblemente por la especificidad de sus receptores celulares, lo que sólo produjo infección en contactos estrechos con el virus (Lipsitch et al., 2003; Riley et al., 2003).

La alarma volvió a saltar en 2012, cuando se aisló un Coronavirus de un paciente saudí con neumonía aguda y fallo renal. En 2013 la OMS confirmó que se trataba de un nuevo agente, el **MERS-CoV** (*Middle East respiratory sindrome Coronavirus*). Estudios genéticos demostraron que no estaba relacionado con el SARS-CoV sino con coronavirus aislados de murciélagos, aunque ambos pertenecían al mismo género, el Beta-Coronavirus. El MERS-CoV se aisló en Arabia, después de la ingesta de leche recién ordeñada de camellos y dromedarios (sus reservorios) práctica corriente en países de Oriente Medio. En algunos momentos, hubo brotes que preocuparon a la comunidad científica, sobre todo en ciertos eventos multitudinarios como la peregrinación a la Meca de los musulmanes. Estos brotes siguen registrándose hoy en día, pero el número de afectados es muy pequeño, aunque la letalidad puede ocurrir en uno de cada tres casos. A pesar de que la transmisión de SARS-CoV y MERS-CoV es respiratoria, no resultaron tan peligrosos como se sospechaba.

En situaciones con aumento rápido de casos con problemas respiratorios, siempre se piensa en el **virus Nipah** o en el **virus Hendra.** Los dos son Paramyxoviridae (virus ARN, relativamente grandes -200 nm- con envuelta) y comparten familia con agentes tan frecuentes como el virus Parainfluenza, que provoca laringitis en niños.

Sin ir más lejos, a comienzos de este año la OMS emitió un comunicado de la gravedad de una enfermedad provocada por el virus Nipah, de aparición brusca y que causaba muertes en el Sudeste asiático. Esta enfermedad emergente zoonótica se transmitía a humanos a través de comida contaminada con secreciones de sus reservorios (murciélagos de la fruta o cerdos). También se producía transmisión de humano a humano por contacto directo estrecho, pero no por vía aérea.

La tasa de letalidad se estimaba entre 40 y 75%, dependiendo de la capacidad de control y seguimiento de cada lugar afectado. La OMS apuntaba que no había ni tratamiento ni vacunas efectivos para el virus. Y concluían que desde 2001 se habían registrado varios brotes en India, con alta letalidad (WHO-Nipah, 2026).

Los primeros casos del virus Nipah se notificaron en 1998 y se considera que los murciélagos son el reservorio natural. Por su pare el virus Hendra, ha tenido menos repercusión salvo los casos que se comenzaron a declarar en 2017 en Australia, donde una vez más, los murciélagos pudieran ser los huéspedes naturales y desde los que se transmitieron a equinos y humanos.

Afortunadamente, estas alertas han quedado sólo en eso. Posiblemente por la incapacidad de adaptación del virus al ser humano de forma eficaz. Pero el riesgo de que una mutación provoque una transmisión efectiva sigue latente.

El 27 de abril de 2026, un hombre que presentaba síntomas de una neumonía es desembarcado en la isla de Ascensión (en el Atlántico) de un crucero (MV Hondius) de bandera holandesa que había partido el 1 de abril de Ushuaia (Argentina) y que tenía como destino Países Bajos. En el diagnóstico microbiológico de patógenos respiratorios no se encontró ningún microorganismo responsable. Del mismo barco habían desembarcado tres días antes en la isla de Santa Elena, una mujer que presentaba síntomas de una infección respiratoria aguda grave y el cadáver de su marido (que había muerto por con los mismos síntomas), con la intención de viajar hasta su país de origen, Holanda, vía Sudáfrica. En Johannesburgo, la mujer empeora y al no encontrar el agente etiológico responsable, se extiende el diagnóstico diferencial y se incluye (y se confirma) la detección de **Hantavirus**, después de conocer que la pareja estuvo viajando por Argentina y Chile durante tres semanas antes de embarcar, observando aves.

En el barco viajaban 147 personas (incluida la tripulación) de 23 países distintos. Finalmente se confirmaron 11 casos, uno de ellos después de abandonar el barco, y se registraron 3 muertes (Ismail, 04/062026).

El género Hantavirus, pertenecen a la familia Bunyaviridae. Son virus ARN zoonoticos que se transmiten a humanos a través de aerosoles de excreciones de roedores. El virus de los Andes fue la especie implicada en este brote, que cursa con fallos cardiovasculares muy graves, presenta alta letalidad y puede tener un periodo de incubación en el organismo de 40 días, lo que dificulta su control (Durante-Mangoni et al., 2026).

El brote de Hantavirus en este crucero ilustra como un virus con baja transmisibilidad en humanos, puede crear un gran problema y alarma mundial en un universo cada vez más interconectado. Lo que pone en valor el diagnóstico rápido y la actuación internacional coordinada.

V. LA ÚLTIMA PANDEMIA: SARS-COV2

El 30 de enero de 2020 se declara una emergencia de salud pública de importancia internacional.

Esta emergencia surge de la declaración de unos casos de neumonía en la última quincena de diciembre de 2019 en una ciudad de China, Wuhan, vinculados a un mercado mayorista de mariscos (Ren et al., 2020).

El 9 de enero de 2020, China confirma que el agente causante de la neumonía es un nuevo Coronavirus que denominan 2019-nCov y que se caracteriza por presentar fiebre, tos y dificultad respiratoria.

Dos días después, el 11 de enero, las autoridades sanitarias de la ciudad de Wuhan confirman el primer muerto.

El día 21 de enero se declara el primer caso en EEUU y el 25 en Italia. El 2 de febrero se declara el primer muerto fuera de China, en Filipinas.

En Asturias, se redactó un protocolo de actuación el 28 de enero de 2020. Y desde una semana antes, el laboratorio de Virología del Hospital Universitario Central de Asturias (HUCA), poseía una técnica diagnóstica de amplificación genómica (RT-PCR) de diseño propio que empieza a aplicar, no sólo a los viajeros, sino a todas las muestras que llegan con sospecha de infección respiratoria.

El 11 de marzo de 2020 la OMS declara el estado de pandemia.

El 14 de marzo, España declara el estado de alarma para la gestión de la situación de crisis sanitaria ocasionada por el 2019-nCov en el Real Decreto 463/2020.

Durante tres meses (enero-marzo de 2020), el mundo se mantuvo expectante e incrédulo ante lo que pasaba en el sudeste

asiático, incluso después de que la OMS hubiese declarado la alarma, ya que en otras ocasiones, como pasó con la del Ébola en 2014, la trascencencia fue menor de lo que la alarma suscitaba. De hecho, los CDC declararon que el virus se encuadraba entre los patógenos que se podían procesar en laboratorios de Bioseguridad de nivel 2, salvo que se quisieran realizar cultivos celulares, que se necesitaría un nivel 3, como la mayoría de patógenos que se manejan en un laboratorio de Microbiología clínica (CDC, 2020).

En cualquier caso, en diciembre de 2019 o incluso en los primeros meses de 2020, nadie podía imaginar lo que se avecinaba en los años siguientes. Ni siquiera cuando China empezó a confinar a la población de Wuhan el 23 de enero de 2020.

En este caso, la prudencia retrasó el control de la situación a nivel mundial. Y cuando el 13 de marzo, el director general de la OMS, el Dr. Tedros Adhanom Ghebreyesus ante la escalada de casos propuso "test, test, test", ya se había perdido un tiempo crucial.

Este dato se puede comprobar porque en los lugares donde se actuó rápidamente: diagnosticando y aislando a los casos confirmados, la primera ola fue mucho menor, como pasó en Asturias (Figura 22) (Alvarez-Arguelles et al., 2020).

El 2019-nCov finalmente se denominó **SARS-CoV2**, por su similitud con el aparecido en 2003, como se constató con los estudios genéticos realizados en tiempo récord (en menos de un mes) gracias a la tecnología disponible: en enero de 2020 estaba disponible el genoma completo del virus al servicio de cualquier investigador que lo precisara, poniendo de manifiesto el carácter altruista que debe imperar en cualquier investigación científica (Chan et al., 2020).

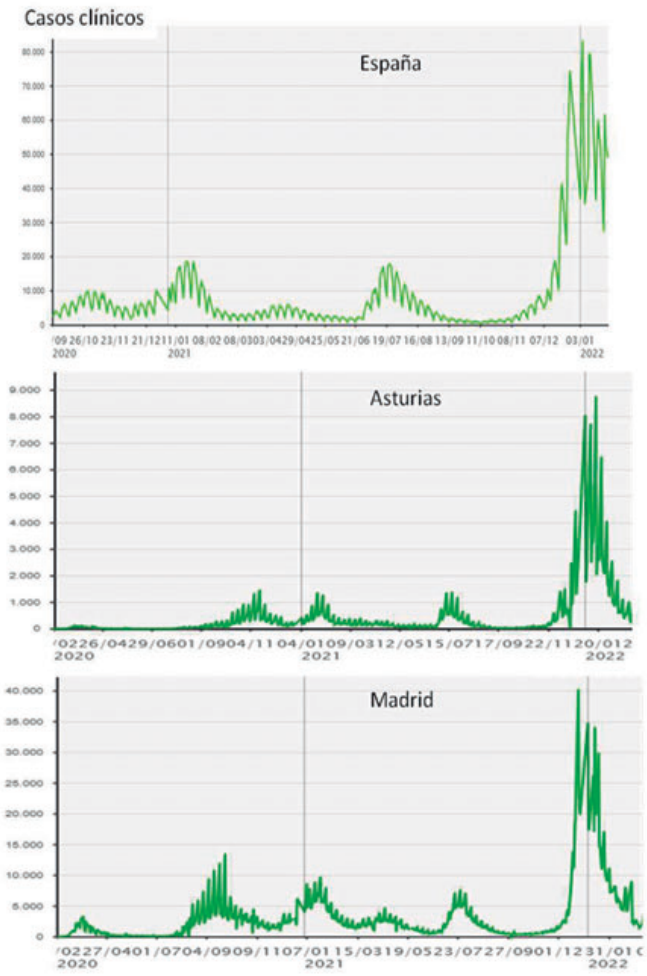


Figura 22. Casos clínicos de SARS-Cov2 en España, en Asturias y en Madrid en los dos primeros años. Fuente: Ministerio de Sanidad.

El virus (conocido también como Covid-19) pertenece a la familia Coronaviridae, relacionados con infecciones respiratorias y gastrointestinales. Son virus ARN de unos 30000 pb y unos 80 nm de diámetro (tamaño medio), con envuelta.

Es un virus zoonótico capaz de infectar mamíferos como murciélagos o roedores (el famoso pangolín), que actúan como reservorio. De hecho, se sugiere que el SARS-CoV2 surge como una recombinación o mezcla entre coronavirus de pangolín y murciélago.

En el Covid-19, se pudo observar que la transmisión era efectiva 2 días antes de que aparecieran los síntomas (sin evidencia de la infección). Y que esta transmisión se realizaba a través del aire, lo que la convertía en muy eficiente.

Durante la primera ola se ensayaron muchos tratamientos que, en ocasiones, nada tenían de actividad antiviral. Incluso se planteó utilizar sueros de personas infectadas, sin tener en cuenta que la variabilidad genética de un virus hace que los anticuerpos o las defensas generados por una persona, diseñados para una proteína concreta, no sean válidos para un segundo individuo.

Un gran acierto de la comunidad científica fue que enseguida se comenzó a trabajar en el diseño de vacunas. Además, algunas con un método revolucionario, que sólo se había investigado en el virus Sincitial Respiratorio (VSR) y que no parecía muy prometedor: vacunas de ARNm.

Podríamos afirmar que la palabra que mejor define el inicio de una pandemia es "incertidumbre". En este caso, al desconcierto inicial se sumó una carrera al esprint por conseguir reactivos para diagnosticar a las personas infectadas y actuar sobre los puntos "calientes".

Hacia abril, el diagnóstico rápido y las medidas de confinamiento lograron detener la pandemia, lo que redujo la tasa de contagio (Figura 23).

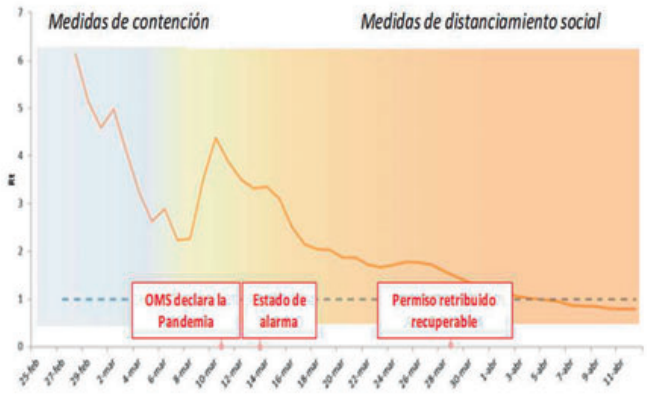


Figura 23. Número de reproducción efectivo del SARS-Cov2 en España en 2020 y medidas implementadas durante la pandemia. Fuente: Ministerio de Sanidad.

Pero al control inicial de la pandemia en los primeros meses y la consiguiente alegría, se sumó el desconcierto: cuando

todos nos creíamos que habíamos superado el virus y adquirido inmunidad, el estudio de seroprevalencia nacional realizado en mayo de 2020 demostró que sólo el 5% de los españoles habían estado en contacto con el virus. Y en Asturias, donde se había diagnosticado rápidamente y asumido unas medidas eficaces, la prevalencia de la infección apenas alcanzaba el 2,5% (Pollán et al., 2020).

En octubre de 2020, cuando todo se creía controlado e incluso estaban en perspectiva las vacunas, la mutación del virus y la relajación de las medidas sociales preventivas y de control desencadenaron un aumento significativo de la incidencia.

Y así como los chinos habían hecho un hospital en 10 días en los comienzos de la pandemia, el laboratorio de Microbiología del HUCA, como otros laboratorios de la región y del país, tuvo que adaptarse a una aumento desmesurado de muestras: pasó de procesar 250 muestras diarias a 5000 muestras (registradas el 3 de noviembre de 2020). Pero detrás de las mascarillas, siempre había una sonrisa (Figura 24).



Figura 24. Progresión de muestras recibidas en el HUCA y personal administrativo ante las peticiones a registrar

Con la esperanza de que el final de la pandemia llegase lo antes posible, después de haber puesto en marcha todos los mecanismos disponibles, no se tuvo en cuenta que el virus seguiría evolucionando para adaptarse mejor al huésped, con la idea final, si los virus pudiesen pensar y controlar el entorno, de no acabar con aquello que les mantenía vivos.

Quizás aquí deberíamos dedicar unos minutos a pensar en otro tema filosófico acerca de la "inteligencia" del microorganismo, si es adquirida o seleccionada. Pero no voy a entrar en especulaciones.

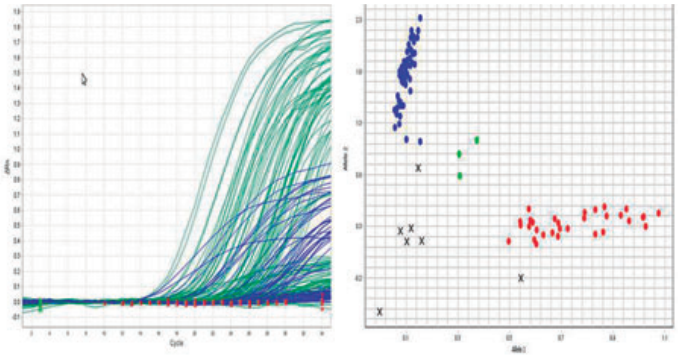


Figura 25. Diagramas de la discriminación alélica de muestras con variante alfa (azul) y Wuhan (verde y rojo) en la RT-PCR-tr.

En su evolución natural apareció la primera variante del virus (variante alfa) a finales de 2020 en el Reino Unido, lo que fue preocupante porque empezaron a aumentar los contagios y no se sabía si serían efectivas las vacunas que se comenzaban a utilizar y que tan rápidamente se habían conseguido sintetizar utilizando ARN mensajero (ARNm) como molde, donde uno de los pasos más complicados fue el desarrollo de una cápsula capaz de proteger al delicado ácido nucleico hasta llegar a las células.

Una vez más lo que se necesitaba era un método rápido de detección de variantes, por si había que aplicar algún correctivo. En el laboratorio de Microbiología del HUCA, se desarrolló una técnica de PCR que permitía conocer en menos de una hora si estábamos ante una variante inglesa (alfa) o no (Figura 25) (Sandoval Torrientes et al., 2021).

Por otra parte, también se comprobó que las primeras vacunas seguían siendo efectivas para la nueva variante (Jackson et al., 2020).

Como era de esperar en la evolución natural del virus, unas cepas se impondrían sobre otras trasmitiéndose mejor y evitando el sistema inmune del huésped o entorpeciendo su labor. A la variante alfa (inglesa) le siguieron la beta (brasileña o sudafricana), la delta (india) y así hasta la ómicron que circula hoy en día y que parece el último eslabón evolutivo.

Con cada variante era lógico suponer que habría un aumento de la incidencia al ser la transmisión más efectiva, lo que se podía comprobar por la carga viral media de cada una de ellas (Figura 26). Esto no significaba que la nueva variante fuese más virulenta, al contrario, iba adaptándose al huésped.

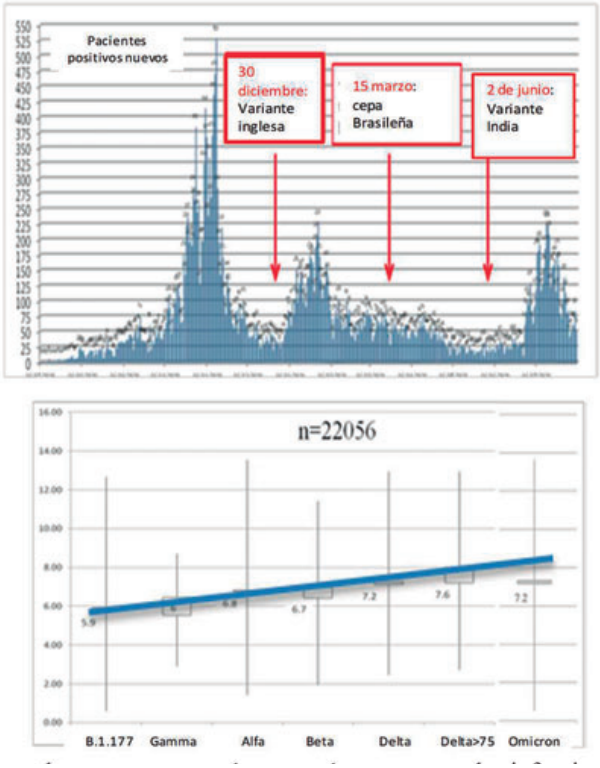


Figura 26. Incidencia de SARS-Cov2 en Asturias en los dos primeros años y aparición de las tres primeras variantes: alfa, beta o delta. La figura de abajo muestra la carga viral normalizada media de las variantes de SARS-Cov2.

Aunque ya parecía demostrado que las vacunas seguían siendo efectivas cuando apareció la variante alfa, se pensó que

la alta replicación del virus provocaría una continua aparición de variantes de modo que, en un momento determinado alguna mutación podría eludir la protección inmunológica preventiva. Sin embargo no fue así: los datos demostraban que las vacunas actuaban en mayor o menor medida contra las distintas variantes que iban apareciendo (Lopez Bernal et al., 2021; Chia et al., 2022).

Hay una asunción universal de que los virus ARN no controlan su capacidad de mutar. Pero si se hacen estudios filogenéticos evolutivos de las variantes del SARS-CoV2, se puede observar que esa asunción no es del todo cierta.

En los análisis bioinformáticos realizados en el laboratorio de Virología del HUCA se comprobó, después del análisis de millones de secuencias de todo el mundo incluidas las propias, que de los 10000 posibles cambios de aminoácidos, sólo alrededor de 150 se habían establecido en los cuatro años que llevaba evolucionando. La variante ómicron, que lleva circulando desde diciembre de 2022 hasta la actualidad, parece que se ha impuesto (Gonzalez-Alba et al., 2023; González-Alba et al., 2025).

La condición de emergencia se mantuvo hasta el 5 de mayo de 2023, más de 3 años. Hoy en día el SARS-CoV2 se ha sumado como un patógeno más causante de infecciones respiratorias.

Desde diciembre de 2019 se han registrado en el mundo cerca de 780 millones de casos y más de 7 millones de muertes (aunque esta cifra podría ser mayor por la infracomunicación de algunas zonas).

La mayoría de las personas se recuperan de una infección que en la actualidad no suele ser grave, existen antivirales específicos con mayor o menor eficacia. Y la OMS ha elaborado un plan estratégico y operativo para ayudar a los países a gestionar la COVID-19 como parte de los sistemas de salud habituales (WHO-COVID19, 2025).

Además se han administrado más de 13000 millones de dosis de vacuna, lo que supone que cerca del 70% de la población se ha inmunizado.

El SARS-CoV2 es el virus del que tenemos más datos y más completos. Cuando se analizan datos se intenta describir, comprender o predecir. En 4 años, se podían revisar en el PubMed (de los NHL, *National Institutes of Health*, de EEUU) casi medio millón de artículos relacionados con la Covid-19 o el SARS-CoV2, casi tres veces más de los que se pueden encontrar de la gripe en 47 años. Incluso bastantes más de los cerca de 325000 disponibles sobre el SIDA. Y a pesar de toda esa información, la predicción de cómo va evolucionar la infección es incierta. Y su aplicación a otras posibles pandemias puede no ser determinante, aunque con todo lo que hemos aprendido, podremos manejar mejor la situación, o al menos actuar con mayor celeridad. En este aspecto, la tan celebrada y anunciada IA (inteligencia artificial) podrá servir de ayuda.

En los tres años largos que duró la pandemia y con toda la tecnología al alcance de la comunidad científica hemos sido testigos de cómo un microorganismo surge, evoluciona y se adapta a un nuevo huésped.

VI. LA PANDEMIA QUE NO CESA: VIH

Fue hace casi 45 años cuando los CDC alertaban de 5 casos de neumonía por un hongo (Pneumocistis carinii) y una inmunodeficiencia grave en pacientes jóvenes, que era incontrolable y que parecía de origen infeccioso (MMWR-CDC, 1981). Ese fue el origen de lo que un año más tarde se denomina síndrome de inmunodeficiencia adquirida o SIDA (MMWR-CDC, 1982).

Un par de años después, en 1983, investigadores franceses bajo la dirección de la Dra. Barrè-Sinoussi (del grupo del Dr. Luc Montagner) logran aislar el virus responsable y lo denominan VAL (Barré-Sinoussi et al., 1983). Simultáneamente, científicos americanos bajo la supervisión del Dr. Robert Gallo, que había descubierto los retrovirus HTLVI y HTLVII, parecían haber identificado también el virus y lo denominan HTLVIII (Gallo et al., 1984). El grupo del Dr. Gallo había recibido muestras de los franceses para comprobar si el VAL era un retrovirus.

Después de 5 años de litigios entre los dos grupos y discusiones de si el virus americano era una contaminación de los cultivos del virus francés, se llegó a un consenso y en 1986 al agente causal del SIDA se denominó como Virus de la Inmunodeficiencia Humana o VIH, perteneciente al género Lentivirus, dentro de la familia Retroviridae.. Posiblemente el prestigio y las divisas también influyeron en esas discusiones.

Posteriormente se renombró como VIH-1, porque en 1986 apareció un virus del mismo género y familia (VIH-2) que no resultó tan agresivo (Figura 27).

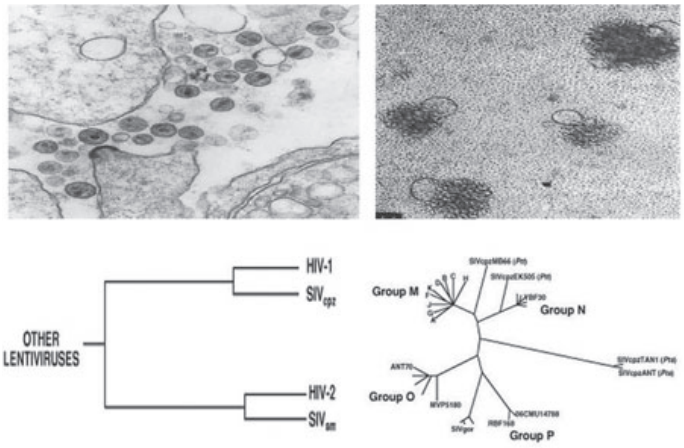


Figura 27. Micrografía del VIH al microscopio electrónico y cultivos celulares infectados con los sincitios típicos. Relación filogenética entre los distintos lentivirus que originaron el VIH-1, VIH-2 y SIV (Cpz: chimpancé; sm: mono mangabey gris) y los grupos del VIH-1 (Knipe & Howley, 2020).

El VIH es un virus ARN, con dos dotaciones genómicas, de tamaño medio (100-120 nm) y con envuelta. Necesita transformarse en ADN para conseguir su progenie y se mantiene inserto en el ADN celular. El virus tiene un 84% de homología con el Virus de la Inmunodeficiencia del Simio (SIV), que se supone que es su progenitor.

La primera evidencia del virus data de 1959 según los CDC, detectado en una muestra almacenada de un individuo masculino del Congo. Pero se estima que pudo infectar a humanos mucho antes, en las primeras décadas del siglo XX, cuando se realizaban cazas de chimpancés como alimento en algún lugar de África Central. Fenómenos demográficos y sociales como descolonización, y los movimientos de población distribuyeron el virus por todo el planeta.

Sus vías de transmisión no son muy efectivas: se necesita un contacto estrecho con un individuo infectado para adquirir el virus. Hoy en día se considera un virus de transmisión sexual, aunque no se puede obviar la transmisión vertical/perinatal. Y a mediados de los años 80, la transmisión por vía sanguínea fue devastadora.

Ya en 1985 se lograron diseñar sistemas de detección de anticuerpos específicos para diagnosticar la infección. Pero habían pasado casi 5 años desde que se habían notificado los primeros casos, lo que iba en detrimento del control de la transmisión.

Mientras el VIH se mantuvo confinado a zonas de África, su existencia era desconocida y su atención nula. Con el paso al mundo occidental, la infección se intentó relegar a ciertos colectivos con ciertas prácticas de riesgo. Incluso durante años se utilizaron los erróneos y discriminatorios nombres de "colectivos de riesgo". La aparición de personajes públicos importantes y con buen nivel de vida que declararon la infección permitió, no sólo proporcionar recursos para la prevención y el control de la infección, sino también para comprender que todos estamos expuestos al virus y que en vez de "colectivos" de riesgo hay que hablar de "prácticas" de riesgo. La pandemia por VIH siempre tuvo mucho componente social (Figura 28).

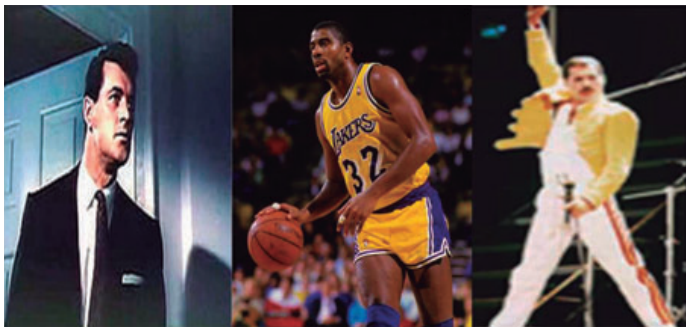


Figura 28. Personas famosas que declararon su infección por VIH en los años 80-90.

Uno de los principales problemas que agravan el control de la infección es que las células diana del virus más importantes pertenecen al sistema inmune que nos defiende (los linfocitos CD4). Además, su replicación es lenta pero continua, lo que invariablemente acaba en deceso si no se adoptan medidas de control y tratamiento.

Ante unos primeros años (finales de los 80 del pasado siglo) decepcionantes, la investigación científica consiguió añadir a los sistemas de diagnóstico rápidos y sensibles, marcadores de evolución de la infección (era la primera vez que se hablaba de carga viral) y tratamientos antivirales efectivos (Figura 29).

Desde el conocimiento de la infección por VIH y según los datos de UNAIDS, unos 91 millones de personas se han infectado. En la actualidad conviven con el virus cerca de 41 millones de personas, por lo que en su "corta" historia ("20 años no es nada", decía el tango; y menos en ciencia), se calcula que unos 50 millones se han muerto "por/con" el VIH. En 2024, a pesar de que casi el 75% de los individuos infectados tenía acceso a tratamientos, unos 630000 murieron por enfermedades relacionadas con el SIDA, como sarcoma de Kaposi, neumonía por *P. carinii*, Leucoencefalopatía Multifocal Progresiva, linfomas, etc. Pero lo que es peor, cerca de 1,3 millones de

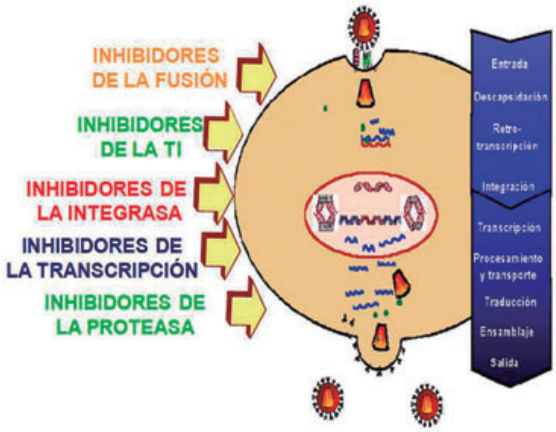


Figura 29. Ciclo replicativo del virus y dianas de los antivirales. Dibujo propio.

personas contrajeron la infección en ese año, incluso después de todas las campañas de concienciación de su gravedad.

Estos datos también tienen una lectura socio-económica: si bien la pandemia por VIH está controlada en el primer mundo, el verdadero problema está en los países en desarrollo: el 95% de los pacientes que viven con la infección están localizados en África, Asia o América del Sur (UNAIDS, 2025).

En los últimos años hay una ralentización en el ritmo al cual se van reduciendo las nuevas infecciones por el VIH. Se va aumentando el acceso al tratamiento y se va terminando con las muertes relacionadas con el SIDA, pero el objetivo 95% de diagnósticos, 95% de tratamientos y 95% con carga viral indetectable en plasma (95-95-95) para el año 2030 no parece muy realista, sobre todo desde la disminución de la financiación para el estudio y control de VIH (UNAIDS, 2025).

A pesar de que llevamos casi medio siglo en contacto con el virus, este no se ha adaptado lo suficiente al huésped hasta el punto de permitir la convivencia de ambos. La diferencia que se encuentra con el SARS-CoV2, es que en el VIH la transmisión no es tan efectiva y tan masiva, con lo que el virus no evoluciona tan rápidamente en su adaptación. Como otros virus ARN está sujeto a múltiples mutaciones, pero en este caso, es debido principalmente a la presión farmacológica. Esto obliga a un control continuo de la infección por medio de estudios de carga viral o de resistencias genotípicas, para el manejo y cambio de terapia antirretroviral cuando sea necesario.

Es importante tener en cuenta que los antirretrovirales (sobre los que se ha investigado mucho, quizás por los grupos que estaban implicados en el primer mundo) son efectivos y cada vez más fáciles de suministrar: el tratamiento de larga duración (*long-acting*) permite estar 6 meses sin administración de antivirales (NIH, 2025).

Pero aunque existan muchos sistemas de diagnóstico, muchas medidas preventivas (que no siempre llegan donde deben) y antirretrovirales efectivos (aunque no letales para el virus), sólo 10 pacientes se consideran curados.

El último de estos casos fue el llamado "paciente Oslo", que después de retirar el tratamiento sigue con carga viral indetectable. Este paciente, al igual que el de Berlín, (reconocido mundialmente como el primero que se curó del SIDA) y el resto que superaron la enfermedad, llegan a esta situación después de someterse a un trasplante de médula dentro de un proceso

hematológico, al recibir CD4 con una mutación (CCR5Δ32), que impide la unión del virus a la célula diana. Pero esta no es la solución para acabar con el virus, ya que los trasplantes de médula significan riesgos y complicaciones (Myhre et al., 2026).

En cualquier caso, los datos más alarmantes son los que indican que la infección se mantiene en los países menos desarrollados, donde habrá que seguir insistiendo en estrategias de prevención y control de la transmisión (Figura 30).



Figura 30. Consultorio de salud en Bikop (Camerún). Foto personal.

VII. LA PANDEMIA PERIÓDICAMENTE AMENAZANTE: GRIPE

El virus que más frecuentemente y mayores estragos conocidos ha provocado en el ser humano es el de la Gripe.

Ya en el año 1200 a.C., una epidemia en Asia parece que fue causada por el **virus de la Gripe o Influenza**. De las que se tienen más evidencias de la autoría del virus es de la epidemia descrita por Hipócrates en el 412 a.C. (en ocasiones denominada peste de Perinto) o la que en el mismo siglo describió Tucídides en la guerra del Peloponeso y denominó peste de Atenas (Spinney, 2018; Ortiz de Lejarazu, 2019).

La primera epidemia bien documentada en Europa ocurrió en el año 1170 (Potter & Jennings, 2011), pero es en el siglo XV, en 1557, cuando hay evidencias de que los síntomas que estaban padeciendo los ingleses eran claramente similares a los que los italianos habían definido como *influenza* (por la "influencia" que ejercían el frío y las estrellas en epidemias estacionales) y que los franceses habían denominado *grippe* (López-Goñi, 2020). De ahí que los dos términos se utilicen indistintamente.

En ese mismo siglo, una pandemia gripal que destacó por su gran difusión y virulencia, y que diezmó la población de Madrid y Barcelona, fue la de 1580 y que afectó a la campaña de la corona de Castilla en la conquista de Portugal. Esta epidemia se originó en Asia, como suele suceder, para pasar posteriormente a Europa.

En el siglo XIX, entre los años 1800 y 1875 se documentan hasta 16 actividades epidémicas gripales. En 1889 se declara una alta actividad gripal en Turquía con una morbilidad elevada, que luego se extiende a Europa y resto del mundo a través de Rusia y Finlandia. Esta epidemia parece ser la predecesora de la mal llamada gripe "española" de 1918 (Kousoulis & Tsoucalas, 2017).

La gripe de 1918 se considera "la madre de todas las pandemias". Su especial virulencia hace que sea un motivo de estudio y comparación ante alarmas sanitarias de esas características. En sólo tres meses se extendió por todo el planeta, en un momento en que las comunicaciones no eran tan frecuentes, pero había una guerra: en aquel año se libraba la primera guerra mundial, donde, paradójicamente, España no participaba.

La pandemia se denominó "gripe española" porque España no censuró la noticia, mientras que si lo hicieron los países participantes en la guerra con el fin de no desmoralizar a las tropas y evitar riesgos adicionales innecesarios. Pero los primeros casos no surgieron en nuestro país, sino en Francia y probablemente en EEUU. Existen evidencias consistentes que señalan un caso de gripe en marzo de 1918 en un campamento militar de Kansas, donde los soldados americanos se adiestraban para ir al frente europeo.

Se estima que la infección superó los 500 millones de personas. Si lo comparamos con la última pandemia del SARS-Cov2, donde se superaron los 700 millones de afectados, puede parecer que no fue tan trascendental, pero hay que recordar que hace un siglo las comunicaciones y la capacidad de movilidad eran muy limitadas (salvo por las "malditas" guerras) y los habitantes del planeta no llegaban a 2000 millones (hoy somos cuatro veces más).

La pandemia ocurrió en varias oleadas de distinta letalidad: empezó en primavera de 1918, tuvo un resurgir en otoño y un tercer pico en los primeros meses de 1919. En Europa, el pico de mortalidad se registró entre octubre y noviembre de 1918.

Las defunciones superaron a los nacimientos. Y Se consideró 25 veces más mortal que otras gripes anteriores.

La infección respiratoria por el SARS-CoV2 había causado cerca de 7 millones de muertos en cinco años. En la pandemia gripal se reconocen hasta 50 millones de muertes (3-5% de la población de aquella época) en el periodo 1918-20, más muertes de las que lleva el VIH en toda su existencia. Algunas fuentes consideran que las defunciones llegaron hasta 100 millones (Spinney, 2018).

En la prensa de aquella época no es raro encontrar imágenes que estuvieron muy presentes no hace tanto en nuestro mundo (Figura 31).



Figura 31. Imagen de archivo del diario la Voz de Galicia de la pandemia de 1918, publicada de nuevo el 4 de julio de 2018 (100 años después).

Los pacientes sufrían bronconeumonías agresivas, que podían llegar a ser mortales, asociadas a cianosis y a colapso progresivo. Investigadores actuales han postulado que las muertes podrían obedecer a mecanismos inmunopatogénicos que desembocaban en una tormenta de citoquinas. Todo recuerda a lo vivido en la última pandemia (Ortiz de Lejarazu, 2019).

No fue hasta 1933 cuando se confirmó la autoría viral de la pandemia de 1918, cuando se logró aislar el virus en cultivos celulares.

En 1995, un equipo de científicos encontró una serie de muestras de autopsias de aquella pandemia de 1918 en un estado de conservación razonable, lo que permitió analizar el genoma de aquel virus. Como ya se sabía, era un virus de la Gripe A tipo H1N1 muy diferente en sus ocho segmentos de ARN de las cepas que circulaban en aquel momento, lo que explica que el sistema inmunitario se encontrara totalmente inerme. La transmisión se había realizado directamente desde las aves al hombre, sin vector intermedio.

En el año 2005 se reconstruyó (no sin controversias) el virus a partir de muestras de autopsias de soldados americanos y cadáveres congelados en el permafrost de Alaska, confirmando que era un H1N1 (Nature, 2005; Tumpey et al., 2005).

Hasta ahora, se ha hablado del virus de la Gripe como si sólo hubiese un tipo dentro de la familia de Orthomyxovirdae, pero en realidad hay tres géneros que provocan problemas en el hombre: Gripe A, Gripe B y Gripe C.

Las gripes se transmiten por vía aérea y se propagan rápidamente en forma de brotes y epidemias (sobre todo la Gripe A), principalmente (aunque no de manera excluyente) en los meses de invierno.

Por regla general la gripe es una infección autolimitada, pero existen poblaciones de riesgo (inmunodeprimidos o mayores) donde los síntomas son más agresivos y para los que todos los años se programa una campaña vacunal para los tipos A y B. La gripe C suele cursar con síntomas más leves y no se incluye en la vacuna.

Esta vacuna se debe actualizar periódicamente (casi anualmente), para intentar abarcar las variantes circulantes más recientes. Esto es necesario por las características del virus.

Es un virus ARN, que como ya se comentaba anteriormente, sufre mutaciones en su proceso evolutivo, lo que se conoce como deriva ("drift") génica, que van influir en su virulencia. El virus, a diferencia de otros virus ARN se replica en el núcleo de la célula huésped para ser más eficiente en su lucha con las defensas celulares: se han documentado hasta cerca de 200 relaciones de proteínas virales con proteínas celulares con ese fin (Knipe & Howley, 2020).

Otra característica del virus que agrava el control de la infección es que el genoma está dividido en 8 fragmentos, cada uno de los cuales codifica una proteína distinta, con diferente función. Esos fragmentos se pueden reorganizar/recombinar en reservorios naturales donde confluyen distintos tipos de virus ("shift" genético).

Como casi todos los virus que hemos tratado hasta el momento, el virus de la Gripe es un virus zoonótico, con alta transmisibilidad persona a persona, donde los hospedadores naturales son las aves (sobre todo las aves silvestres) pero que también puede infectar a otras especies animales como cerdos, caballos o focas.

El cerdo actúa, en muchas ocasiones, como tubo de ensayo natural donde se pueden encontrar distintos tipos de virus, incluso de distintas especies, para dar lugar a un genotipo nuevo con mayor virulencia (Figura 32).

Como en cualquier virus, las proteínas que reconocen los receptores celulares del hospedador son claves para el establecimiento y transmisión de la infección.

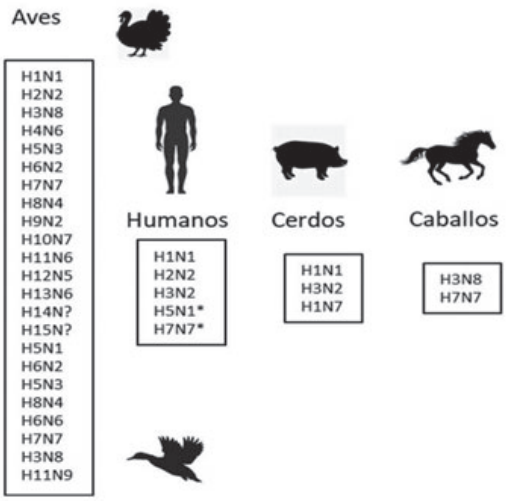


Figura 32. Cepas de gripe A que infectan diferentes especies, creadas por recombinación de fragmentos en el mismo o distinto reservorio.

Una diferencia que se observa entre los distintos géneros del virus de la Gripe, es que sólo el tipo A es capaz de reorganizar e intercambiar las glicoproteínas que se unen a los receptores celulares: la hemaglutinina (H) y la neuraminidasa (N), que son las que se utilizan para identificar la especie circulante. De ahí que hablemos de la gripe de 1918 como la gripe A H1N1.

Hasta la fecha se han identificado 16 tipos H y 9 tipos N, distribuidos en cada especie con distintas configuraciones. En el hombre, las combinaciones efectivas y transmisibles han sido H1N1, H2N2 y H3N2, sin obviar que otras combinaciones son posibles como veremos luego (Figura 33).

Después de la gripe de 1918, se registró una epidemia gripal en 1957, que se consideró la gripe asiática. El causante de dicha epidemia fue el H2N2 que provocó más de 5 millones de muertes.

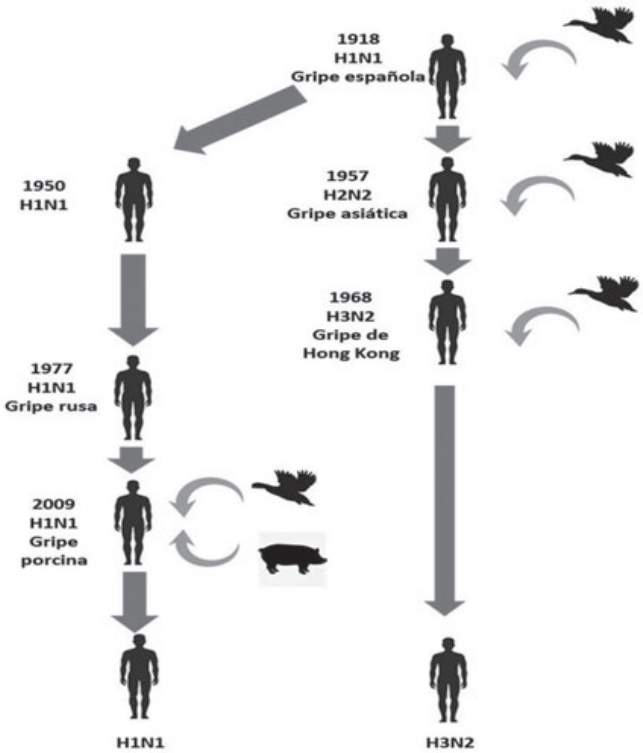


Figura 33. Distribución de proteínas H y N en virus de la Gripe que infectan distintos animales (Herrero Zamorano, 2025).

En 1968 hubo otro brote de gripe A, pero en este caso H3N2, que también hizo estragos mundiales. En la gripe de Hong Kong, que así se denominó, se calcula que fallecieron casi 2 millones de personas.

Pero todos recordaremos que hace 15 años una gripe provocó alarma mundial: la llamada gripe porcina pandémica pdmH1N1.

A finales de abril de 2009, la OMS anunció la aparición de un nuevo virus que estaba aumentando el número de casos de infección respiratoria tipo gripe y en un momento que no parecía lógico que circulase, pues ya comenzaba la primavera en el hemisferio norte y el otoño era muy reciente en el hemisferio sur. Los casos comenzaron a declararse en marzo/abril en Méjico y sur de EEUU, para pasar rápidamente a Europa. El primer caso declarado en España correspondía a un joven que acudió al hospital en Almansa (Castilla-La Mancha) el 22 de abril, después de un viaje fin de carrera en Cancún.

El 23 de abril se confirma que el agente causante es Gripe A/H1N1, que en un primer momento se denomina pandémica o porcina (A/H1N1pdm09).

Hasta entonces, nunca una pandemia se había detectado con tanta precocidad. La tecnología disponible en el momento permitió diagnosticar la infección y conocer el microorganismo implicado en muy poco tiempo (López-Goñi, 2020/2020).

Al igual que en 1918, era un virus H1N1, pero en este caso se evidenciaba la existencia de un huésped intermedio: el cerdo. El virus estaba compuesto con material genético de una cepa aviar, dos porcinas y una humana.

Los síntomas de esta gripe no eran tan graves como en ocasiones anteriores. Incluso se pudo comprobar que los mayores de 60 años tenían anticuerpos que podían neutralizar el virus, posiblemente por exposiciones previas a patógenos (en este caso virus) con epítopos similares (lo que se conoce como pecado original antigénico) (Hancock et al., 2009).

El 11 de junio de 2009, la OMS declaraba la alerta máxima de pandemia.

A pesar de que no fue un virus muy letal, se calcula que infectó a casi 600000 personas y acabó con la vida de alrededor de 18000.

En agosto de 2010 se consideró el fin de la pandemia. Desafortunadamente, la vacuna desarrollada llegó después de finalizada (WHO-FLU, 2010).

Es muy probable que el virus de la gripe de 1918 sea el antecesor de los actuales linajes H1N1 y H2N3 de humanos y cerdos. Y así sucesivamente hayan aparecido las variantes en las distintas pandemias (Figura 34).

Si las cepas que infectan a humanos y pueden transmitirse entre ellos son H1N1, H2N2 y H3N2, también se han podido diagnosticar gripes con otras composiciones: H5N1 o H7N9.

A finales de los años 90 del pasado siglo se asilaron cepas H5N1 muy virulentas para las aves. Incluso se informó el primer caso de muerte en humanos en 1997 en Hong Kong y se temió que podría provocar una nueva pandemia. Sin embargo, desde entonces no llegan a 1000 los casos declarados. Eso sí, con una mortalidad del 40%: el H5N1 ha causado poco más de 300 fallecidos en este siglo, frente al más de medio millón de las gripes estacionales H1N1 y/o H3N2.

En 2012 se publicaron dos trabajos que forzaban dos mutaciones en cepas H5N1 y los convertían en transmisibles

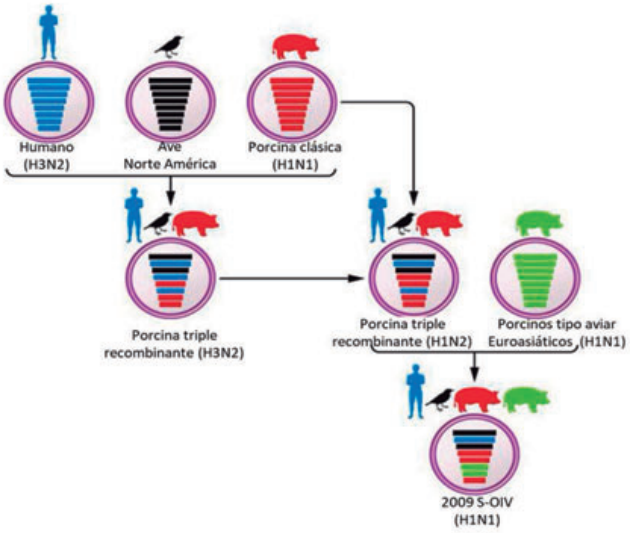


Figura 34. Evolución del virus de la Gripe A en las pandemias (Herrero Zamorano 2025).

entre mamíferos, con lo que sembraban la duda de que el virus pudiese ser incontrolable si naturalmente adquiría esas mutaciones (Herfst et al., 2012; Russell et al., 2012).

En 2013 se notificó el aislamiento de H7N9 en humanos. Hasta la fecha se han notificado unos 500 casos y su tasa de mortalidad alcanza el 27%. Este virus se ha encontrado también en pollos, patos y palomas. Pero al igual que en el caso anterior, la transmisión persona a persona es muy poco eficaz.

Desde 2016 ha habido brotes de H5N8, pero no parece afectar a mamíferos. Y últimamente se habla de los H9N9.

De momento todo son conjeturas y aunque en Virología se acepta la máxima de que un virus agresivo suele ser poco transmisible, puede llegar el "monstruo", como se apuntaba hace un par de décadas en un artículo del New England que aúne elevada virulencia y transmisibilidad (Figura 35 -original).

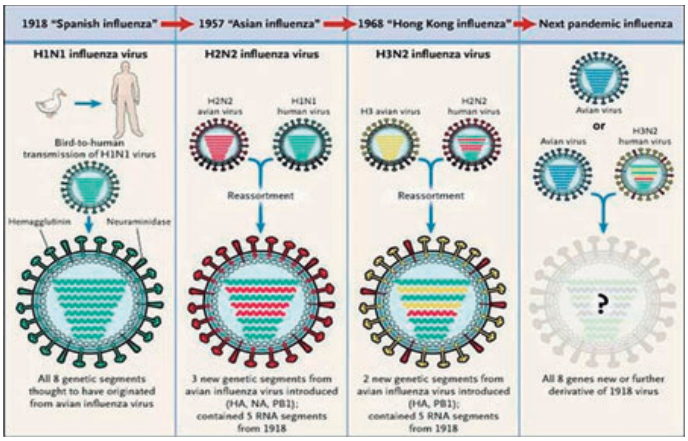


Figura 35. Virus de la gripe de las últimas pandemias (Belshe, 2005).

Los virus de la Gripe son los campeones de la variabilidad y poseen todos los factores de riesgo para ocasionar una pandemia difícil de controlar: rápida mutación, genomas fragmentados, con reservorios no humanos, recombinables y de fácil transmisión (por vía aérea)

Por eso se considera que es el virus que mejor esté "preparado" para causar una pandemia difícil de controlar.

VIII. LUCHA Y PREVENCIÓN

En la lucha con los virus podemos encontrar agentes viricidas como las sustancias químicas (lejía, derivados yodados, alcoholes, aldehídos o detergentes) que interactúan directamente con los componentes estructurales de las partículas virales. Estos se utilizan para la desinfección de los dispositivos médico-quirúrgicos, superficies y objetos inertes, y la antisepsia de la de la piel o de las mucosas.

Pero para atajar una infección viral se utilizan antivirales, sustancias químicas que inhiben la multiplicación intracelular del virus bloqueando alguna de las etapas del ciclo replicativo (como antes se esquematizaba en el VIH en la Figura 29) y que no tienen actividad sobre las partículas virales extracelulares ni sobre los virus en estado de latencia.

Hasta la fecha existen cerca de un centenar de fármacos con capacidad de control de las infecciones virales, pero casi la mitad se desarrollaron para la infección por el VIH con mayor o menor éxito.

La diana terapéutica es la célula infectada, lo que sitúa la quimioterapia antiviral a medio camino entre la quimioterapia antineoplásica y la antibioticoterapia, intentando proteger las células sanas de los efectos colaterales del tratamiento. Aunque la especificidad de los antivirales suele ser alta y cada molécula va dirigida a enzimas virales específicos (y está limitada a unos pocos virus relacionados), a veces se dirigen sobre procesos genéricos que también acontecen en la célula eucariota, comprometiendo su funcionalidad. Esto supone un freno considerable para el desarrollo de los fármacos antivirales.

Por tanto, siempre es recomendable buscar dianas virales que no se integren en el metabolismo celular, como puede ocurrir con el aciclovir que actúa sobre la timidin kinasa del virus Herpes Simplex.

Por otra parte, existen antivirales como la Rivabirina, a los que se recurre siempre que acontece una alarma y se desconocen las medidas específicas a implantar. Pertenece a la familia de los análogos de nucleósidos. Se utiliza en el tratamiento del VSR, pero es un antiviral de amplio espectro que también interactúa con el metabolismo de la célula huésped, por lo que no es aconsejable abusar de su uso.

Muchos de los antivirales sólo son efectivos en las primeras fases de la infección, como ocurre con el Oseltamivir en la infección gripal. Además, presentan otras limitaciones como la imposibilidad de erradicar las infecciones latentes, la aparición de resistencia, los efectos indeseables relacionados a menudo con la toxicidad celular relativa de las moléculas y el coste (Agut, 2022).

En cualquier caso, los antivirales son una herramienta terapéutica que reducen síntomas y, en ocasiones, han llegado a eliminar la infección, como los fármacos utilizados contra la infección por el virus de la Hepatitis C.

Pero antes de llegar a la lucha con un microorganismo, siempre es mejor prevenir. Una medida preventiva muy efectiva es la vacunación.

Se considera al Dr. Edward Jenner el padre de la vacunación después de comprobar la efectividad de su experimento sobre la viruela. El 14 de mayo de 1796, tomó material de una lesión pustular de viruela de vacas (causada por el Cowpoxvirus) de la mano de una ordeñadora y lo inoculó en el brazo del hijo de 8 años de su jardinero. Dos meses después inoculó material de una lesión proveniente de un enfermo con viruela y demostró que el niño no contrajo la enfermedad, sugiriendo que había quedado "inmune" (Figura 36) (Quezada, 2020).



Figura 36. Cuadro del pintor Gaston Melingue ubicado en la Academia Nacional de Medicina en Paris, representando la vacunación del Dr. E. Jenner.

El Dr. Jenner realizó sus ensayos después de conocer la técnica a través de Lady Mary Wortley Montagu, (de soltera Mary Pierrepont) que en diciembre de 1715 (80 años antes) describe el procedimiento empleado para combatir la viruela en el imperio otomano: "*La viruela, tan fatal y frecuente entre nosotros, aquí es totalmente inofensiva gracias al descubrimiento de la inoculación*". De vuelta en Inglaterra, Lady Mary hizo inocular a sus propios hijos después de ver morir a su hermano de viruela, enfrentándose a los prejuicios que había contra tal práctica (¡nada nuevo!).

La inoculación de la viruela, variolización o variolación, fue practicada originariamente en China y la India. Posteriormente se transmitió a los pueblos del entorno del Asia menor y Oriente próximo, Cefalonia, Tesalia, Constantinopla, el Bósforo, donde era utilizado por las clases populares como preservativo de la enfermedad.

La inoculación por inyección o arañazo de la piel no era el único medio para la vacunación. En el siglo VI a.C. en China practicaban la inoculación por aspiración vía nasal de costras de enfermos (Figura 37).



Figura 37. Xilografía china de instilación de la vacuna de la viruela.

En China además de esta práctica de pulverizar costras desecadas e introducirlas mediante un tubo de bambú por los orificios nasales, también practicaban la variolización introdu-

ciendo en los orificios de la nariz un pedazo de algodón empapado de pus extraído de pústulas de enfermos leves o ponien-do a un niño sano las ropas usadas de un enfermo.

En el desarrollo y difusión de la vacunación de la viruela, España jugó un papel excepcional con la *Real Expedición Filantrópica de la Vacuna* donde el médico valenciano Francisco Xavier de Balmis llevó la vacunación a las colonias españolas en el Nuevo Mundo y Ultramar. El Dr. de Balmis partió con 22 niños abandonados de la Casa de Expósitos y un grupo de asistentes, vacunando a los niños brazo a brazo en grupos de dos a lo largo del viaje, para que hubiera pústulas frescas en todo momento (Tuells & Ramírez, 2003).

Hoy en día se cuentan con vacunas para distintos virus con características distintas: vacunas de antígenos; vacunas de virus inactivados; vacunas de virus vivos atenuados (no patológicos), que son las más inmunogénicas; y vacunas recombinantes, donde el gen de la proteína inmunogénica se introduce en el genoma de un virus (normalmente Adenovirus o Retrovirus) para que se produzca junto con las proteínas virales.

Y el SARS-CoV2 afianzó una práctica que se había ensayado con el VSR, pero que no había sido del todo efectiva: vacunas de ARNm, y que ahora son una estrategia para combatir no sólo infecciones, sino también procesos cancerígenos.

En los últimos años, también se está ensayando lo que se ha denominado la "inmunización pasiva", que es la inoculación de anticuerpos monoclonales contra proteínas específicas del virus. Niservimab ha sido uno de esos ac. monoclonales que desde hace tres años se administra en España a los bebés para evitar, al menos, los efectos secundarios tan preocupantes que ocasiona el VRS.

La consecuencia de la no vacunación, que tanto proclaman algunos grupos negacionistas faltos de rigor científico, es la vuelta de infecciones superadas como el sarampión.

Pero la prevención pasa también por medidas de higiene, nutricionales, contactos sociales…. Y no sólo dirigidas a la especie humana, sino que habrá que pensar en las prácticas que se realizan en agricultura y/o ganadería para mejorar cosechas, como el uso de fertilizantes y antibióticos que pueden provocar mutaciones y relaciones inesperadas entre microorganismos.

Aunque siempre se ha tenido en cuenta que las actuaciones sobre las enfermedades infecciosas deben considerarse en global, hoy en día esta visión es imprescindible, integrando toda la vigilancia en lo que se conoce como "One Health", enfoque que reconoce la salud de las personas en consonancia con la salud animal y el medio ambiente.

IX. EL FUTURO VIRAL: ¿QUÉ NOS DEPARA EL DESTINO?

Un informe de la Universidad de Oxford de 2015 sobre riesgos mundiales, indicaba que el riesgo de guerra nuclear era del 0.005% o de cambio climático del 0.01%, y de una pandemia de sólo el 0.0001% (Panlin & Armstrong, 2015).

Pero llegó 2020…. Y Como decía una canción de los 80 (del siglo pasado….) "el futuro ya está aquí".

La OMS estima que en 2050 habrá 10 millones de muertes debidas a infecciones, superando a las enfermedades cardiovasculares, la principal causa actual. Y eso sin tener en cuenta las posibles pandemias o las situaciones especiales.

Nunca, hasta este siglo hemos estado tan expuestos a tantos ambientes distintos. Los viajes, las migraciones, los adelantos en maquinarias y transporte,…. nos acercan a cualquier escenario. Y la inquietud humana nos lleva a lugares recónditos con ambientes desconocidos.

Que un virus (o cualquier microorganismo) sea devastador, dependerá de su capacidad de infección, de su virulencia, de su capacidad de adaptación y de su evolución (nadie quiere acabar con la mano que te da de comer).

Además dependerá de la vía de transmisión y de los reservorios en los que pueda permanecer sin ser localizado. Esas vías de transmisión serán más factibles en condiciones adversas. Incluso el virus puede cambiar o adaptar nuevas vías de transmisión. También será mayor el peligro si entre esos reservorios puede estar el ser humano sin que padezca ningún síntoma o cuando el tiempo de incubación hasta la aparición de la enfermedad sea largo, ya que podrá transmitir el virus sin conocimiento.

Hay que tener presente que no todos los individuos nos comportamos igual ante una infección. Podemos clasificar a los individuos en tres tipos: los susceptibles, los infectados y los que ya superaron la infección. Incluso dentro de estos grupos, pacientes con déficits inmunológicos van a sufrir más en cualquier situación crítica y son los individuos donde será difícil erradicar la infección

No se sabe cuántos tipos de virus existen. Algunos autores sugieren que se desconocen más del 99% de ellos. Conocemos a los patógenos a medida que van provocando problemas en la población, pero pueden estar en nuestro entorno desde hace siglos sin tener idea de su existencia. En cualquier caso, simplificando su clasificación, se podría decir que hay dos categorías: aquellos de fácil transmisión, pero normalmente controlables con el tiempo (gripes) y otros de alta letalidad pero con huéspedes restringidos o incubación lenta (virus del Ébola, VIH). El paso de una categoría a otra puede ser cuestión de cambios puntuales como se comprobó en el H5N1.

Globalización, movilidad, aumento de población, deficiencias higiénicas y sanitarias, van en detrimento de un buen control de las infecciones. Podremos minimizar los problemas si cuidamos el entorno y prevenimos el deterioro del planeta con medidas eficientes. Si no, tendremos que adoptar soluciones en cada momento.

Así mismo, la influencia del cambio climático provoca el deshielo de zonas en las que se pueden recuperar restos de microorganismos desconocidos, surgidos hace millones de años de los que desconocemos su relación con nuestra especie.

Para controlar, o erradicar si fuese posible, una infección viral se deben adoptar medidas de higiene, saneamiento, cuarentenas, control de vectores (si fuese el caso), cambios de hábitos y/o vacunación.

Los conocimientos científicos no garantizan que estemos preparados para todo lo que nos pueda acontecer. Si bien las técnicas diagnósticas han experimentado un importante desarrollo y permiten el conocimiento de las causas que provocan los problemas (el patógeno infectante) en "horas", puede que en ocasiones no tengamos acceso al punto de inicio o se propague por causas que dificulten su comprensión.

Las vacunas, uno de los grandes avances de la pandemia SARS-CoV2, pueden no siempre ser tan fáciles de producir.

Por otra parte, el mal uso de ese conocimiento científico puede derivar en actuaciones de bioterrorismo y/o el negacionismo (volverán el sarampión y las paperas).

Y siempre tendremos una espada de Damocles con organismos que llevan "avisando" de su peligrosidad desde hace siglos: virus de la Gripe, Sarampión, Coronavirus, Viruela,…..

El Dr. Peter Brian Medawa, premio Nobel de Medicina de 1960 y considerado el padre de los trasplantes por sus trabajos en inmunología adquirida decía que los virus son "Un trozo de ácido nucleico rodeado de malas noticias".

Pero no siempre hay que considerarlos así. Los virus fueron esenciales en el desarrollo de vacunas, que algunos "locos" hoy repudian y se utilizan como vectores (Adenovirus, Retrovirus) para tratamientos de enfermedades de todo tipo con sistemas como el CART-T. Y como cualquier otro microorganismo, forman parte del ecosistema y ayudan a su regulación y control.

Nos hemos centrado en virus que provocan pandemias en humanos, tampoco debemos obviar los problemas que suponen los virus en el mundo animal o vegetal. Por ejemplo, los virus como la viruela del cerezo o la tristeza de cítricos pueden asolar una plantación, que si se extienden puede ocasionar problemas de alimentación mundiales.

Las pandemias generan resultados negativos, no sólo en el ámbito sanitario, sino también social y económico. Y a pesar de los adelantos científicos, siguen representando un desafío para todo tipo de profesionales. Por ello debemos seguir cuidando y mejorando los servicios de salud y las estrategias sanitarias.

Es posible que vengan nuevas pandemias, pero confiemos que los conocimientos de las anteriores y los medios tecnológicos disponibles nos harán salir airosos una vez más, si no maltratamos el planeta y dejamos de vivir en un mundo tan egoísta.

AGRADECIMIENTOS

A los doctores Rosario –Charo- Rodicio, José Luis Acuña Fernández y José Mario Díaz Fernández, del consejo científico de la rAACI, por invitarme a participar en esta edición

A todos mis compañeros de microbiología y en especial a los virólogos con los que tantos momentos he compartido y tanto me han ensañado (Marta, Susana, Merce, Jose, Zule, …). A todo el personal técnico y administrativo del laboratorio del HUCA. Y como no, a la Dra. María de Oña Navarro, que me introdujo en el proceloso, aunque "satisfactorio", mundo de los virus.

El autor es miembro del grupo de Microbiología y Parasitología Infecciosa del ISPA y .pertenece al grupo "Consorcio cROS:: respuesta celular al estrés oxidativo", uno de los grupos de investigación de Organismos públicos de I+D+I del Principado de Asturias.

REFERENCIAS

Acuna-Soto, R., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., & Therrell, M. D. (2002). Megadrought and megadeath in 16th century Mexico. *Emerging Infectious Diseases*, 8(4), 360-362. https://doi.org/10.3201/eid0804.010175

Agut, H. (2022). Antivirales (a excepción del virus de la inmunodeficiencia humana y la hepatitis). *EMC - Tratado de Medicina, 26(2)*, 1-10. https://doi.org/10.1016/S1636-5410(22)46453-1

Almeida, June D., Bradley, D., Maynard, J. E., Voller, A., Atanasiu, P., Gardner, P., Schuurs, A., & Yolken, R. (1979). *Manual for rapid laboratory viral diagnosis* (Offset Publication No. 47). WHO. https://iris.who.int/items/7b1e3781-01d9-4ea2-a5cd-ef0f2e32e192

Alvarez-Arguelles, M. E., Rojo-Alba, S., Melón, S., & Vazquez, F. (2020). [Diagnostic of SARS-Cov-2 and the radical uncertainty]. *Journal of Healthcare Quality Research, 35(4)*, 199-201. https://doi.org/10.1016/j.jhqr.2020.07.001

Baltimore, D. (1971). Expression of animal virus genomes. *Bacteriological Reviews, 35(3)*, 235-241. https://doi.org/10.1128/br.35.3.235-241.1971

Barré-Sinoussi, F., Chermann, J. C., Rey, F., Nugeyre, M. T., Chamaret, S., Gruest, J., Dauguet, C., Axler-Blin, C., Vézinet-Brun, F., Rouzioux, C., Rozenbaum, W., & Montagnier, L. (1983). Isolation of a T-lymphotropic retrovirus from a patient at risk for acquired immune deficiency syndrome (AIDS). *Science*, 220(4599), 868-871. https://doi.org/10.1126/science.6189183

Belshe, R. B. (2005). The origins of pandemic influenza—Lessons from the 1918 virus. *The New England Journal of Medicine,* 353(21), 2209-2211. https://doi.org/10.1056/NEJMp058281

Bettis, A. A., Jackson, M. L., Yoon, I.-K., Breugelmans, J. G., Goios, A., Gubler, D. J., & Powers, A. M. (2022). The global epidemiology of chikungunya from 1999 to 2020: A systematic literature review to inform the development and introduction of vaccines. *PLOS Neglected Tropical Diseases, 16*(1), e0010069. https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0010069

Bruner, K. M., Murray, A. J., Pollack, R. A., Soliman, M. G., Laskey, S. B., Capoferri, A. A., Lai, J., Strain, M. C., Lada, S. M., Hoh, R., Ho, Y.-C., Richman, D. D., Deeks, S. G., Siliciano, J. D., & Siliciano, R. F. (2016). Defective proviruses rapidly accumulate during acute HIV-1 infection. *Nature medicine*, 22(9), 1043-1049. https://doi.org/10.1038/nm.4156

Burrell, C. J., Howard, C. R., & Murphy, F. A. (2016). *Fenner and White's Medical Virology*. Academic Press. https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780123751560/fenner-and-whites-medical-virology

Carey, N. (2015). *Junk DNA: A Journey Through the Dark Matter of the Genome*. Columbia Univ PR.

Castañeda Guillot, C., Martínez Martínez, R., & López Falcón, A. (2021). Grandes pandemias y sus desafíos. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores, 8*(3). https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i3.2671

CDC. (2026, junio 3). *Enfermedad del Ébola: Situación actual*. Ebola. https://www.cdc.gov/ebola/es/situation-summary/ebola-situacion-actual.html

Chan, J. F.-W., Kok, K.-H., Zhu, Z., Chu, H., To, K. K.-W., Yuan, S., & Yuen, K.-Y. (2020). Genomic characterization of the 2019 novel human-pathogenic coronavirus isolated from a patient with atypical pneumonia after visiting Wuhan. *Emerging Microbes & Infections, 9*(1), 221-236. https://doi.org/10.1080/22221751.2020.1719902

Chen, J.-F., Tao, Y., Li, J., Deng, Z., Yan, Z., Xiao, X., & Wang, D.-Z. (2010). microRNA-1 and microRNA-206 regulate skeletal muscle satellite cell proliferation and differentiation by repressing Pax7. *The Journal of Cell Biology, 190*(5), 867-879. https://doi.org/10.1083/jcb.200911036

Chia, P. Y., Ong, S. W. X., Chiew, C. J., Ang, L. W., Chavatte, J.-M., Mak, T.-M., Cui, L., Kalimuddin, S., Chia, W. N., Tan, C. W., Chai, L. Y. A., Tan, S. Y., Zheng, S., Lin, R. T. P., Wang, L., Leo, Y.-S., Lee, V. J., Lye, D. C., & Young, B. E. (2022). Virological and serological kinetics of SARS-CoV-2 Delta variant vaccine breakthrough infections: A multicentre cohort study. *Clinical Microbiology and Infection, 28*(4), 612.e1-612.e7. https://doi.org/10.1016/j.cmi.2021.11.010

Cravioto, E. G., & García, I. G. (2007). La primera peste de los Antoninos (165-170). Una epidemia en la Roma Imperial. *Asclepio. Revista de Historia de la Medicina y de la Ciencia., 59*(1), 7-22. https://doi.org/10.3989/asclepio.2007.v59.i1.215

Crick, F. H. (1958). On protein synthesis. *Symposia of the Society for Experimental Biology, 12*, 138-163.

Crick, F. H., Barnett, L., Brenner, S., & Watts-Tobin, R. J. (1961). General nature of the genetic code for proteins. *Nature, 192*, 1227-1232. https://doi.org/10.1038/1921227a0

da Costa Martins, P. A., Bourajjaj, M., Gladka, M., Kortland, M., van Oort, R. J., Pinto, Y. M., Molkentin, J. D., & De Windt, L. J. (2008). Conditional dicer gene deletion in the postnatal myocardium provokes spontaneous cardiac remodeling. *Circulation, 118*(15), 1567-1576. https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.108.769984

de Araújo, T. V. B., Ximenes, R. A. de A., Miranda-Filho, D. de B., Souza, W. V., Montarroyos, U. R., de Melo, A. P. L., Valongueiro, S., de Albuquerque, M. de F. P. M., Braga, C., Filho, S. P. B., Cordeiro, M. T., Vazquez, E., Cruz, D. di C. S., Henriques, C. M. P., Bezerra, L. C. A., Castanha, P. M. da S., Dhalia, R., Marques-Júnior, E. T. A., Martelli, C. M. T., … State Health Department of Pernambuco. (2018). Association between microcephaly,

Zika virus infection, and other risk factors in Brazil: Final report of a case-control study. *The Lancet. Infectious Diseases, 18*(3), 328-336. https://doi.org/10.1016/S1473-3099(17)30727-2

Durante-Mangoni, E., Cafarella, I., Mercadante, S., Scarpulla, N., Emanuele, D.-M., Agnès, L. D. Y., Jose Manuel, R.-R., Fausto, R., Michael, S., & Miriam, S. (2026). Human infection with Andes hantavirus: An update for the general physician. *European Journal of Internal Medicine*, 106946. https://doi.org/10.1016/j.ejim.2026.106946

Gallo, R. C., Salahuddin, S. Z., Popovic, M., Shearer, G. M., Kaplan, M., Haynes, B. F., Palker, T. J., Redfield, R., Oleske, J., & Safai, B. (1984). Frequent detection and isolation of cytopathic retroviruses (HTLV-III) from patients with AIDS and at risk for AIDS. *Science, 224*(4648), 500-503. https://doi.org/10.1126/science.6200936

González-Alba, J. M., Martínez, Z. P., Rojo-Alba, S., Varela, C. O., Oña, J. G. de, Pérez, M. R., García, S. M., & Álvarez-Argüelles, M. E. (2025). New Circulating Variants of SARS-CoV-2 in Asturias During the Period (2022-2024). *Viruses, 17*(12), 1531. https://doi.org/10.3390/v17121531

Gonzalez-Alba, J. M., Rojo-Alba, S., Perez-Martinez, Z., Boga, J. A., Alvarez-Arguelles, M. E., Gomez, J., Herrero, P., Costales, I., Alba, L. M., Martin-Rodriguez, G., Campo, R., Castelló-Abietar, C., Sandoval, M., Abreu-Salinas, F., Coto, E., Rodriguez, M., Rubianes, P., Sanchez, M. L., Vazquez, F., … Melón García, S. (2023). Monitoring and tracking the spread of SARS-CoV-2 in Asturias, Spain. *Access Microbiology, 5*(9), 000573.v4. https://doi.org/10.1099/acmi.0.000573.v4

Hancock, K., Veguilla, V., Lu, X., Zhong, W., Butler, E. N., Sun, H., Liu, F., Dong, L., DeVos, J. R., Gargiullo, P. M., Brammer, T. L., Cox, N. J., Tumpey, T. M., & Katz, J. M. (2009). Cross-reactive antibody responses to the 2009 pandemic H1N1 influenza virus. *The New England Journal of Medicine, 361*(20), 1945-1952. https://doi.org/10.1056/NEJMoa0906453

Herfst, S., Schrauwen, E. J. A., Linster, M., Chutinimitkul, S., de Wit, E., Munster, V. J., Sorrell, E. M., Bestebroer, T. M., Burke, D. F., Smith, D. J., Rimmelzwaan, G. F., Osterhaus, A. D. M. E., & Fouchier, R. A. M. (2012). Airborne transmission of influenza A/H5N1 virus between ferrets. *Science*, 336(6088), 1534-1541. https://doi.org/10.1126/science.1213362

Herrero Zamorano, M. T. (2021, noviembre 29). COVID-19: ¿cómo serán los próximos meses?¿Tendremos que volver a vacunarnos? *Blogthinkbig.com*. https://blogthinkbig.com/vacuna-covid-19-proximos-meses

Herrero Zamorano, M. T. (2025). *Los algoritmos de la vida*. Guadalmazán. https://almuzaralibros.com/fichalibro.php?libro=10026&edi=5

Ismail, N. A. (04/062026). Andes Hantavirus Outbreak on a Cruise Ship, 2026. *New England Journal of Medicine, 0*(0). https://doi.org/10.1056/NEJMc2606496

Jackson, L. A., Anderson, E. J., Rouphael, N. G., Roberts, P. C., Makhene, M., Coler, R. N., McCullough, M. P., Chappell, J. D., Denison, M. R., Stevens, L. J., Pruijssers, A. J., McDermott, A., Flach, B., Doria-Rose, N. A., Corbett, K. S., Morabito, K. M., O'Dell, S., Schmidt, S. D., Swanson, P. A., … mRNA-1273 Study Group. (2020). An mRNA Vaccine against SARS-CoV-2—Preliminary Report. *The New England Journal of Medicine*, 383(20), 1920-1931. https://doi.org/10.1056/NEJMoa2022483

Kantor, I. N. (2025). Previous dengue infection, severity of a second infection and the possible role of DENV-2. *Medicina, 85*(1), 148-151.

Knipe, D. M., & Howley, P. (2020). *Fields Virology (Knipe, Fields Virology)* (7th ed., Vol. 2). LWW.

Koonin, E. V., Krupovic, M., & Agol, V. I. (2021). The Baltimore Classification of Viruses 50 Years Later: How Does It Stand in the Light of Virus Evolution? *Microbiology and Molecular Biology Reviews: MMBR, 85*(3), e0005321. https://doi.org/10.1128/MMBR.00053-21

Kousoulis, A. A., & Tsoucalas, G. (2017). Infection, contagion and causality in Colonial Britain: The 1889-90 influenza pandemic and the British Medical Journal. *Le Infezioni in Medicina, 25*(3), 285-291.

Lipsitch, M., Cohen, T., Cooper, B., Robins, J. M., Ma, S., James, L., Gopalakrishna, G., Chew, S. K., Tan, C. C., Samore, M. H., Fisman, D., & Murray, M. (2003). Transmission dynamics and control of severe acute respiratory syndrome. *Science, 300*(5627), 1966-1970. https://doi.org/10.1126/science.1086616

Lopez Bernal, J., Andrews, N., Gower, C., Gallagher, E., Simmons, R., Thelwall, S., Stowe, J., Tessier, E., Groves, N., Dabrera, G., Myers, R., Campbell, C. N. J., Amirthalingam, G., Edmunds, M., Zambon, M., Brown, K. E., Hopkins, S., Chand, M., & Ramsay, M. (2021). Effectiveness of Covid-19 Vaccines against the B.1.617.2 (Delta) Variant. *The New England Journal of Medicine, 385*(7), 585-594. https://doi.org/10.1056/NEJMoa2108891

López Piñero, J. M. (1987). *Epidemias de Hipócrates, comentadas por el doctor Andrés Piquer.* (Obra original publicada en Ministerio de Sanidad y Consumo)

López-Goñi, I. (2020). *Virus y Pandemias* (1.a ed.). Guadalmazán. https://www.amazon.es/Virus-y-Pandemias-Divulgaci%C3%B3n-Cient%C3%ADfica/dp/841754724X (Obra original publicada en 2020)

MMWR-CDC. (1981, junio 5). *Pneumocystis Pneumonia* [Oficial]. MMWR. Epidemiologic Notes and Reports. https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/june_5.htm

MMWR-CDC. (1982, septiembre 24). *Current Trends Update on Acquired Immune Deficiency Syndrome (AIDS)—United States* [Oficial]. MMWR. Epidemiologic Notes and Reports. https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/00001163.htm

Mordechai, L., Eisenberg, M., Newfield, T. P., Izdebski, A., Kay, J. E., & Poinar, H. (2019). The Justinianic Plague: An inconsequential pandemic? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 116*(51), 25546-25554. https://doi.org/10.1073/pnas.1903797116

Myhre, A. E., Meyer-Myklestad, M. H., Gullaksen, H. H., Søgaard, O. S., Tolstrup, M., Salgado, M., Martinez-Picado, J., Holberg-Petersen, M., Juhl, A. K., Schleimann, M. H., Gunst, J. D., Thomsen, A., Fisher, K., Bhamra, J. S., Kran, A.-M. B., Halvorsen, B., Dyrhol-Riise, A. M., Reikvam, D. H., Aukrust, P., … Trøseid, M. (2026). Long-term HIV-1 remission achieved through allogeneic haematopoietic stem cell transplant from a CCR5Δ32/Δ32 sibling donor. *Nature Microbiology*, 1-13. https://doi.org/10.1038/s41564-026-02304-8

Nature. (2005). The 1918 flu virus is resurrected. *Nature*, 437(7060), 794-795. https://doi.org/10.1038/437794a

Negredo, A., Palacios, G., Vázquez-Morón, S., González, F., Dopazo, H., Molero, F., Juste, J., Quetglas, J., Savji, N., de la Cruz Martínez, M., Herrera, J. E., Pizarro, M., Hutchison, S. K., Echevarría, J. E., Lipkin, W. I., & Tenorio, A. (2011). Discovery of an ebolavirus-like filovirus in europe. *PLoS Pathogens, 7*(10), e1002304. https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002304

NIH. (2025, julio 3). *Long-Acting HIV Medicine* [Oficial]. HIVinfo.NIH.Gov. https://hivinfo.nih.gov/understanding-hiv/fact-sheets/long-acting-hiv-medicine

Ortiz de Lejarazu, R. (2019). *Los virus de la gripe. Pandemias, epidemias y vacunas*. Amazing Books.

Panlin, D., & Armstrong, S. (2015). Global Challenges. *12 Risks tht threaten human civilisation* (p. 212). Oxford University. 2015-univ-of-oxford-12-risks-with-infinite-impact-full-report-1.pdf. https://www.sintef.no/globalassets/project/nexus/2015-univ-of-oxford-12-risks-with-infinite-impact-full-report-1.pdf

Pollán, M., Pérez-Gómez, B., Pastor-Barriuso, R., Oteo, J., Hernán, M. A., Pérez-Olmeda, M., Sanmartín, J. L., Fernández-García, A., Cruz, I., Fernández de Larrea, N., Molina, M., Rodríguez-Cabrera, F., Martín, M., Merino-Amador, P., León Paniagua, J., Muñoz-Montalvo, J. F., Blanco, F., Yotti, R., & ENE-COVID Study Group. (2020). Prevalence of SARS-CoV-2 in Spain (ENE-COVID): A nationwide, population-based seroepidemiological study. *Lancet, 396*(10250), 535-544. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31483-5

Potter, C. W., & Jennings, R. (2011). A definition for influenza pandemics based on historical records. *The Journal of Infection, 63*(4), 252-259. https://doi.org/10.1016/j.jinf.2011.04.013

Quezada, A. (2020). Los orígenes de la vacuna. *Revista Médica Clínica Las Condes, TEMA CENTRAL: Vacunas: Actualización, 31*(3), 367-373. https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2020.07.002

Ren, L.-L., Wang, Y.-M., Wu, Z.-Q., Xiang, Z.-C., Guo, L., Xu, T., Jiang, Y.-Z., Xiong, Y., Li, Y.-J., Li, X.-W., Li, H., Fan, G.-H., Gu, X.-Y., Xiao, Y., Gao, H., Xu, J.-Y., Yang, F., Wang, X.-M., Wu, C., … Wang, J.-W. (2020). Identification of a novel coronavirus causing severe pneumonia in human: A descriptive study. *Chinese Medical Journal, 133*(9), 1015-1024. https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000000722

Ridenhour, B., Kowalik, J. M., & Shay, D. K. (2018). El número reproductivo básico (R0): Consideraciones para su aplicación en la salud póblica. *American Journal of Public Health, 108*(Suppl 6), S455-S465. https://doi.org/10.2105/AJPH.2013.301704s

Riley, S., Fraser, C., Donnelly, C. A., Ghani, A. C., Abu-Raddad, L. J., Hedley, A. J., Leung, G. M., Ho, L.-M., Lam, T.-H., Thach, T. Q., Chau, P., Chan, K.-P., Lo, S.-V., Leung, P.-Y., Tsang, T., Ho, W., Lee, K.-H., Lau, E. M. C., Ferguson, N. M., & Anderson, R. M. (2003). Transmission dynamics of the etiological agent of SARS in Hong Kong: Impact of public health

interventions. *Science, 300*(5627), 1961-1966. https://doi.org/10.1126/science.1086478

Russell, C. A., Fonville, J. M., Brown, A. E. X., Burke, D. F., Smith, D. L., James, S. L., Herfst, S., van Boheemen, S., Linster, M., Schrauwen, E. J., Katzelnick, L., Mosterín, A., Kuiken, T., Maher, E., Neumann, G., Osterhaus, A. D. M. E., Kawaoka, Y., Fouchier, R. A. M., & Smith, D. J. (2012). The potential for respiratory droplet-transmissible A/H5N1 influenza virus to evolve in a mammalian host. *Science, 336*(6088), 1541-1547. https://doi.org/10.1126/science.1222526

Sandoval Torrientes, M., Castelló Abietar, C., Boga Riveiro, J., Álvarez-Argüelles, M. E., Rojo-Alba, S., Abreu Salinas, F., Costales González, I., Pérez Martínez, Z., Martín Rodríguez, G., Gómez de Oña, J., Coto García, E., & Melón García, S. (2021). A novel single nucleotide polymorphism assay for the detection of N501Y SARS-CoV-2 variants. *Journal of Virological Methods, 294*, 114143. https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2021.114143

Scott, Andrew. (1985). *Piratas de la celula*. Labor Sa. https://www.iberlibro.com/9788433550996/Piratas-celula-Scott-Andrew-8433550993/plp

Spinney, L. (2018). El jinete pálido: 1918: *La epidemia que cambió el mundo* (Y. F. Rueda, Trad.). Crítica.

Suzuki, A. (2011). Smallpox and the epidemiological heritage of modern Japan: Towards a total history. *Medical History, 55*(3), 313-318. https://doi.org/10.1017/s0025727300005329

Tuells, J., & Ramírez, S. (2003). *Balmis et variola* (1.a ed.). Generalitat Valenciana. Coselleria de Sanitat. https://doi.org/10.13140/2.1.2994.1129

Tumpey, T. M., Basler, C. F., Aguilar, P. V., Zeng, H., Solórzano, A., Swayne, D. E., Cox, N. J., Katz, J. M., Taubenberger, J. K., Palese, P., & García-Sastre, A. (2005). Characterization of the reconstructed 1918 Spanish influenza pandemic virus. *Science, 310*(5745), 77-80. https://doi.org/10.1126/science.1119392

UNAIDS. (2025). *Últimas estadísticas sobre el estado de la epidemia de sida Hoja informativa—UNAIDS*. https://www.unaids.org/es/resources/fact-sheet

WHO. (2023, noviembre 23). *Una sola salud* [Oficial]. Una sola salud. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/one-health

WHO-ARB. (2026). *WHO guidelines for clinical management of arboviral diseases: Dengue, chikungunya, Zika and yellow fever*. https://iris.who.int/items/095e80fc-c752-4801-b7fe-ba19a24b7659

WHO-CC. (2025). *Crimean-Congo haemorrhagic fever*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/crimean-congo-haemorrhagic-fever

WHO-COVID19. (2025, noviembre 25). *Enfermedad por coronavirus (COVID-19)*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/coronavirus-disease-(covid-19)

WHO-Dengue. (2024). *Dengue y dengue grave*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue

WHO-FLU. (2010, agosto 10). *La OMS declara el fin de la pandemia H1N1 e insta a una vigilancia continua de la gripe—OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud*. https://www.paho.org/es/noticias/10-8-2010-oms-declara-fin-pandemia-h1n1-e-insta-vigilancia-continua-gripe

WHO-Nipah. (2026). *Nipah virus disease—India*. https://www.who.int/emergencies/disease-outbreak-news/item/2026-DON593

WHO-PAN. (2020). *Alocución de apertura del Director General de la OMS en la rueda de prensa sobre la COVID-19 celebrada el 11 de marzo de 2020*. https://www.who.int/es/news-room/speeches/item/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020

WHO-Polio. (2026). *Poliomielitis*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/poliomyelitis

WHO-SPox. (2010). *Smallpox Eradication Programme—SEP (1966-1980)*. https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/the-smallpox-eradication-programme---sep-(1966-1980)

WHO-VHB. (2024). *Hepatitis B*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/hepatitis-b

WHO-WN. (2017). *Virus del Nilo Occidental*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/west-nile-virus

WHO-YF. (2025). *Fiebre amarilla*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/yellow-fever

WHO-Zika. (2025, noviembre 6). *Virus de Zika*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/zika-virus

Materias primas críticas y transición energética: Perspectivas globales, cadenas de valor, y el rol estratégico para España y Asturias

Juan María Menéndez Aguado
Universidad de Oviedo - Asturias Raw Materials Institute (AsRaM)

***Resumen*- Una de las consecuencias más evidentes en la transición hacia un modelo energético descarbonizado es la necesidad de un suministro intensivo de materias primas críticas y estratégicas. Este artículo expone una revisión detallada de las operaciones unitarias y las rutas de metalurgia extractiva —hidrometalúrgicas y pirometalúrgicas— para recursos en los que España juega un rol importante dentro de la Unión Europea (UE), como son la celestina (estroncio), magnesita, cobre, metales refractarios (wolframio y tantalio), tierras raras (REE), silicio metalúrgico y subproductos complejos (cadmio, arsénico, antimonio, germanio).**

I. INTRODUCCIÓN

Los productos de las industrias mineras y metalúrgicas han sido clave en el desarrollo de las civilizaciones pasadas, así como la base de la industrialización desde la primera revolución industrial.

En la actualidad, los sectores minero y metalúrgico siguen siendo proveedores de las materias primas requeridas en una multitud de cadenas productivas. Constituyen por ello un servicio ecosistémico básico y necesario para el desarrollo de cualquier sociedad y su relevancia ha ido incrementándose con el desarrollo tecnológico hasta el punto en que, actualmente, todos los elementos naturales de la tabla periódica tienen un interés tecnológico y, con ello, un mercado (Figura 1).

La transición global hacia un modelo energético descarbonizado —basado en la implantación masiva de energías renovables, la movilidad eléctrica, el almacenamiento energético y la digitalización— representa un cambio de paradigma industrial sin precedentes. Este proceso desplaza la dependencia geopolítica desde el control de los combustibles fósiles hacia el suministro seguro de materias primas críticas y estratégicas (JRC, 2023). Sin embargo, la definición y catalogación de estos recursos como "críticos" o "estratégicos" no es universal, pues depende directamente del tejido industrial de cada bloque económico, de sus vulnerabilidades específicas en el suministro y de sus necesidades de seguridad nacional (USGS, 2025; JRC, 2023).

Es importante señalar que, de acuerdo con el documento *The Raw Materials Initiative* (UE, 2008), se identifican como materias primas (raw materials) a aquellas que no pertenezcan a los sectores energético y alimentario; éstas serán en su gran mayoría materias primas minerales, aunque se analizan bajo el mismo marco otras materias primas no minerales que puedan tener relevancia para la industria europea, como podría ser la pulpa de papel, algunas maderas especiales, el corcho o el caucho.

Finalmente, tras un análisis de criticidad determinado, sobre el que daremos más detalles en párrafos posteriores, se clasificarán como "materias primas críticas" (critical raw

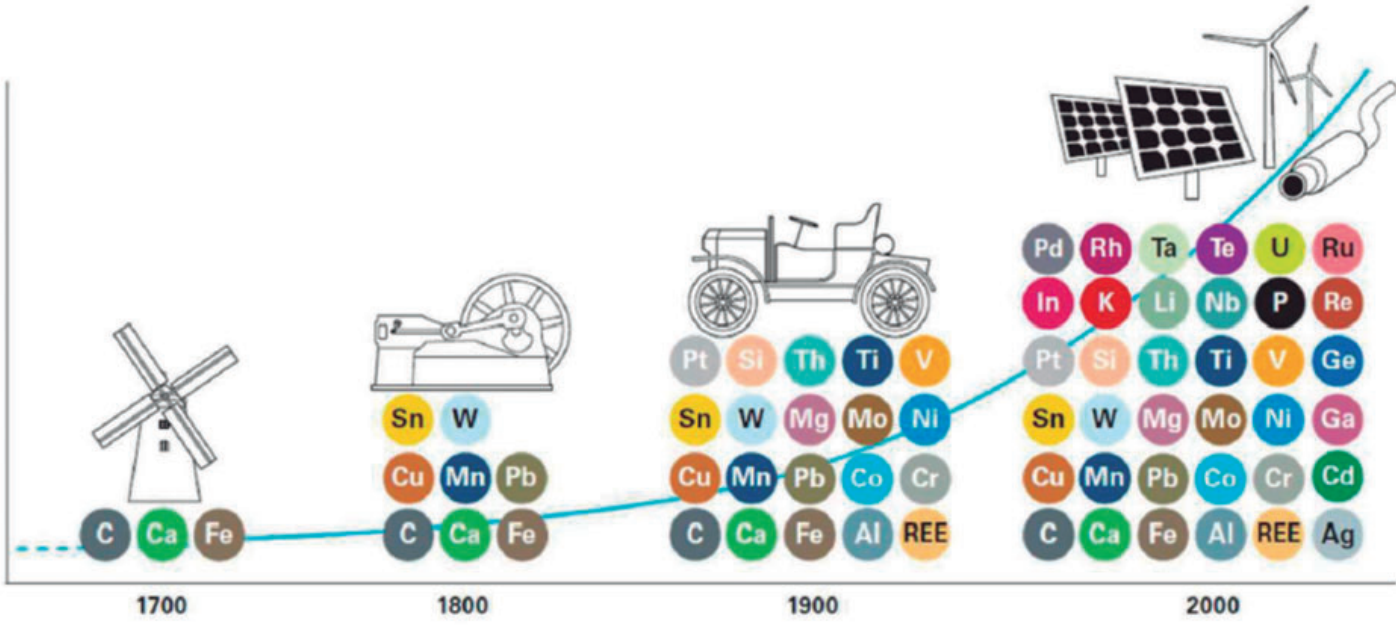


Figura 1. Principales materias primas minerales con la evolución tecnológica (Fuente: Achzet et al., 2011)

materials, CRM) aquellas que cumplan los criterios de criticidad establecidos en cada momento y en cada región. Con la versión más reciente del análisis (UE, 2024), se introduce el término de materias primas estratégicas para denominar aquellas que, aunque no son críticas, tienen una importancia especial en las transiciones energética y digital, como es el caso del cobre. En el caso de España, se decidió agrupar, bajo el término de materias primas fundamentales, tanto las críticas como las estratégicas.

I.1. EL CONCEPTO DE CADENA DE VALOR MINERAL Y SU RELEVANCIA EN LA UE

Para comprender la criticidad de un material, es indispensable analizar su cadena de valor completa. Como detalla el Raw Materials Information System (RMIS) de la Comisión Europea —cuya versión RMIS 3.0, lanzada en marzo de 2023, introdujo importantes mejoras en la monitorización de flujos—, las materias primas deben evaluarse considerando todo su ciclo de vida: desde la extracción, pasando por el procesamiento y refino, la fabricación de componentes intermedios, el uso final y, por último, el reciclaje y la economía circular (JRC, 2023). La vulnerabilidad de un bloque como la Unión Europea no suele radicar únicamente en la disponibilidad geológica del mineral en bruto (fase de extracción), sino en el cuello de botella que representa el procesamiento físico y el refinamiento metalúrgico, fases que en la actualidad están altamente monopolizadas por terceros países (JRC, 2023).

Desde la perspectiva de la gestión y la logística de estas cadenas de suministro, los flujos materiales ya no pueden concebirse de forma estrictamente lineal (desde el yacimiento hasta el vertedero). La legislación europea reciente —como la Directiva de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) 2012/19/UE— extiende la responsabilidad del productor hasta el final de la vida útil de los productos (Eynard et al., 2020). El objetivo es recuperar metales pesados y materias críticas (como cadmio, arsénico o tierras raras) para reintroducirlos en el ciclo productivo mediante los denominados Sistemas Colectivos de Responsabilidad Ampliada del Productor (SCRAP), evitando su dispersión y reduciendo la dependencia externa (Eynard et al., 2020). Este enfoque se alinea con los principios de la Industria 5.0, que pone el foco en la resiliencia de los sistemas industriales frente a crisis geopolíticas y en la implantación efectiva de la economía circular.

I.2. DIFERENTES LISTADOS DE MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS

La metodología para definir qué materiales son críticos varía ostensiblemente entre las distintas potencias económicas del planeta, reflejando sus prioridades estratégicas y perfiles de riesgo industrial.

I.2.A *La Unión Europea*

El marco comunitario, consolidado mediante la Ley de materias primas fundamentales (*Critical Raw Materials Act*) (UE, 2024), utiliza el RMIS del Joint Research Centre (JRC) como plataforma de soporte científico y de toma de decisiones (JRC, 2023). La metodología europea evalúa de manera bidimensional dos parámetros fundamentales: la Importancia Económica y el Riesgo de Suministro (JRC, 2017a; JRC, 2023). La importancia económica se calcula vinculando los consumos de cada materia prima con sectores industriales europeos clave (mapeados mediante códigos NACE de dos dígitos) y el valor añadido que generan dichos sectores. El riesgo de suministro pondera la concentración de la producción mundial, la gobernanza de los países proveedores, la tasa de reciclaje de fin de vida útil y la viabilidad técnica de sustitución (JRC, 2017a). En la TABLA I se muestra el listado europeo revisado en 2023, que a finales del 2026 se espera que sea actualizado.

TABLA I
LISTADO EUROPEO DE MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS, 2023

Aluminio/bauxita	Galio	Grupo del platino (PGM)	Vanadio
Antimonio	Germanio	Fosforita	Arsénico
Barita	Hafnio	Fósforo	Cobre
Berilio	Tierras raras pesadas	Escandio	Feldespato
Bismuto	Litio	Silicio	Helio
Boro/Boratos	Tierras raras ligeras	Estroncio	Manganeso
Cobalto	Magnesio	Tántalo	Níquel
Carbón coquizable	Grafito natural	Titanio metal	
Espatoflúor	Niobio	Wolframio	

A pesar de que los esfuerzos de los últimos años han sido importantes, especialmente tras la aprobación de la ya mencionada *Critical Raw Materials Act*, la evaluación en 2026 del Tribunal de Cuentas Europeo del cumplimiento de objetivos respecto a los marcados para el 2030 en dicha ley indica que los esfuerzos deben multiplicarse, especialmente en lo referente a las etapas más avanzadas de la cadena de valor (Figura 2). Adicionalmente al esfuerzo en la diversificación en los orígenes externos a la UE (estableciendo una referencia de <65% en un único tercer país), se incide en conseguir, al menos, la extracción del 10% de cada CRM en la UE, procesar al menos el 40% y reciclar al menos el 25%. Estos valores, no vinculantes, se establecen como referencia para ser conseguidos en 2030. La realidad de la situación, como veremos a continuación, obliga a entender estos valores como un estímulo y una referencia difícil de alcanzar en el plazo establecido inicialmente.

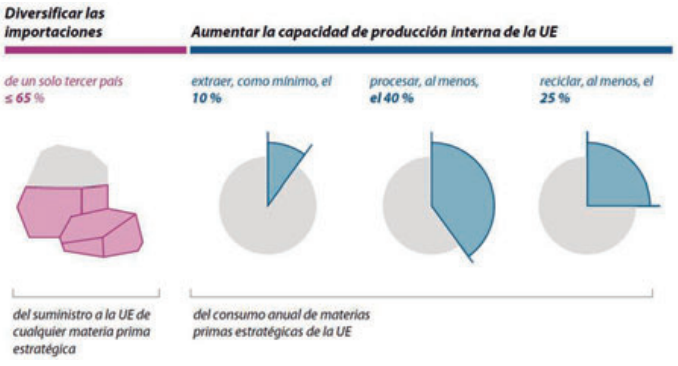


Figura 2. Objetivos de la UE sobre las CRM (no vinculantes), establecidos en la Ley de Materias Primas Fundamentales (Fuente: UE, 2024).

Basado en datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2025) en la Figura 3a se muestra el porcentaje del principal productor en los minerales de la transición energética., mientras que en la Figura 3b se representa lo mismo, pero del producto refinado. Es evidente la preponderancia de China en las etapas más avanzadas de las cadenas de valor, y es por ello que las políticas en esta materia deben reforzarse en los próximos años para tratar de conseguir los objetivos establecidos.

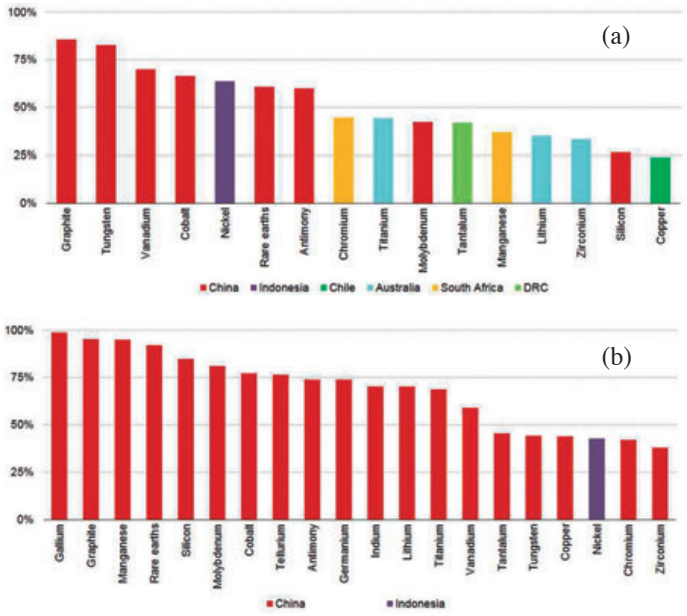


Figura 3. (a) Primer productor y su cuota de mercado de las diferentes materias primas. (b) Ídem del metal refinado (Fuente: IEA, 2025)

En la Figura 4 se muestra la capacidad media de producción de la UE y los avances en la consecución de los objetivos de 2030 (Tribunal de Cuentas Europeo, 2026). En esta figura, se entiende que la capacidad media de producción de la UE es la cantidad típica de una materia prima específica que la UE puede producir anualmente, por término medio, utilizando sus instalaciones y recursos industriales existentes.

Como se puede observar, en términos generales los valores promedio agregados no se alejan tanto de los objetivos fijados. Sin embargo, se puede observar a simple vista que en la gran mayoría de los valores para los CRM individuales, los indicadores están lejos de cumplir los valores objetivo.

Es importante resaltar que en los análisis de criticidad se incluye como un componente relevante la potencialidad de sustitución que puede tener cada CRM en cada una de sus múltiples aplicaciones. Una referencia recomendada para profundizar en este aspecto, referido a los 14 CRM que componían el listado de la UE en 2014, es el informe realizado por Tercero Espinosa (2015) fruto del proyecto CRM-INNONET, que fue utilizado como base de metodologías posteriores de análisis de criticidad.

I.2.B *Estados Unidos*

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) aplica una metodología basada en un modelo de efectos económicos y de probabilidad de escenarios para elaborar su listado de minerales críticos. Bajo las directrices de la Energy Act de 2020, se consideran críticos aquellos materiales esenciales para la seguridad nacional o económica, con cadenas de suministro vulnerables a perturbaciones y cuyas funciones en la manufactura tecnológica sean insustituibles (USGS, 2025). Para evaluar el impacto real, el USGS analiza más de 1200 escenarios de interrupción comercial y el comportamiento de más de 400 industrias asociadas (USGS, 2025). Cada mineral recibe una ponderación de riesgo multiplicando la probabilidad de interrupción por el impacto económico directo. En caso de que un material presente un riesgo cuantitativo limitado, pero dependa de un único productor nacional activo, se aplica el criterio de "punto único de fallo" en la cadena de suministro para proponer formalmente su inclusión en la lista oficial (USGS, 2025). En el último listado publicado, el número de materias primas críticas reconocido por Estados Unidos de América alcanza los 60.

I.2.B *Otras economías*

Países como Canadá (Figura 3b), Australia y Japón (este último mediante su agencia estatal JOGMEC) estructuran sus estrategias de manera diferenciada. Mientras Canadá y Australia enfocan sus listas hacia la valorización de su enorme potencial geológico primario para consolidarse como proveedores globales alternativos, Japón prioriza la seguridad de su industria tecnológica de alta precisión mediante políticas avanzadas de almacenamiento físico (JRC, 2023). En la TABLA II se muestra una comparativa entre los diferentes listados publicados, a fecha de 2026, en las diferentes regiones (Tribunal de Cuentas Europeo, 2026).

I.3. LAS TIERRAS RARAS EN LOS LISTADOS DE CRMS

Existe una extendida imprecisión en los medios de comunicación que tiende a solapar o confundir el concepto químico de "tierras raras" con el concepto estratégico-económico de "minerales críticos". Las tierras raras (REE, por sus siglas en inglés) constituyen un grupo químicamente homogéneo de 17 elementos de la tabla periódica definidos por la IUPAC: los 15 lantánidos junto con el ytrio (Y) y el escandio (Sc) (Eynard et al., 2020). Se denominan así por la dificultad histórica para aislarles de manera individual en estado puro, no por su escasez en la corteza terrestre (Wall, 2014). Comparten propiedades químicas tan estrechas que suelen coexistir en los mismos yacimientos minerales (principalmente en bastnäsita, monacita y xenotima), requiriendo complejos y costosos procesos de separación hidrometalúrgica secuencial para su obtención individual (Machacek y Kalvig, 2017).

Como se ha comentado anteriormente, un mineral crítico es una etiqueta económica y política asignada por un gobierno a cualquier elemento químico —pertenezca o no a las tierras raras— cuyo desabastecimiento suponga un riesgo sistémico para su economía (USGS, 2025). Así, el litio, el cobre, el silicio metal o el zinc son minerales críticos, pero no son tierras raras.

Las tierras raras aparecen invariablemente en todos los listados mundiales de materias críticas debido a que sus cadenas de valor presentan el mayor riesgo de monopolio del planeta. China controla casi el 60% de la minería primaria global de REE y ostenta cerca del 80% de la capacidad mundial de refino para la fabricación de imanes permanentes de neodimio-hierro-boro

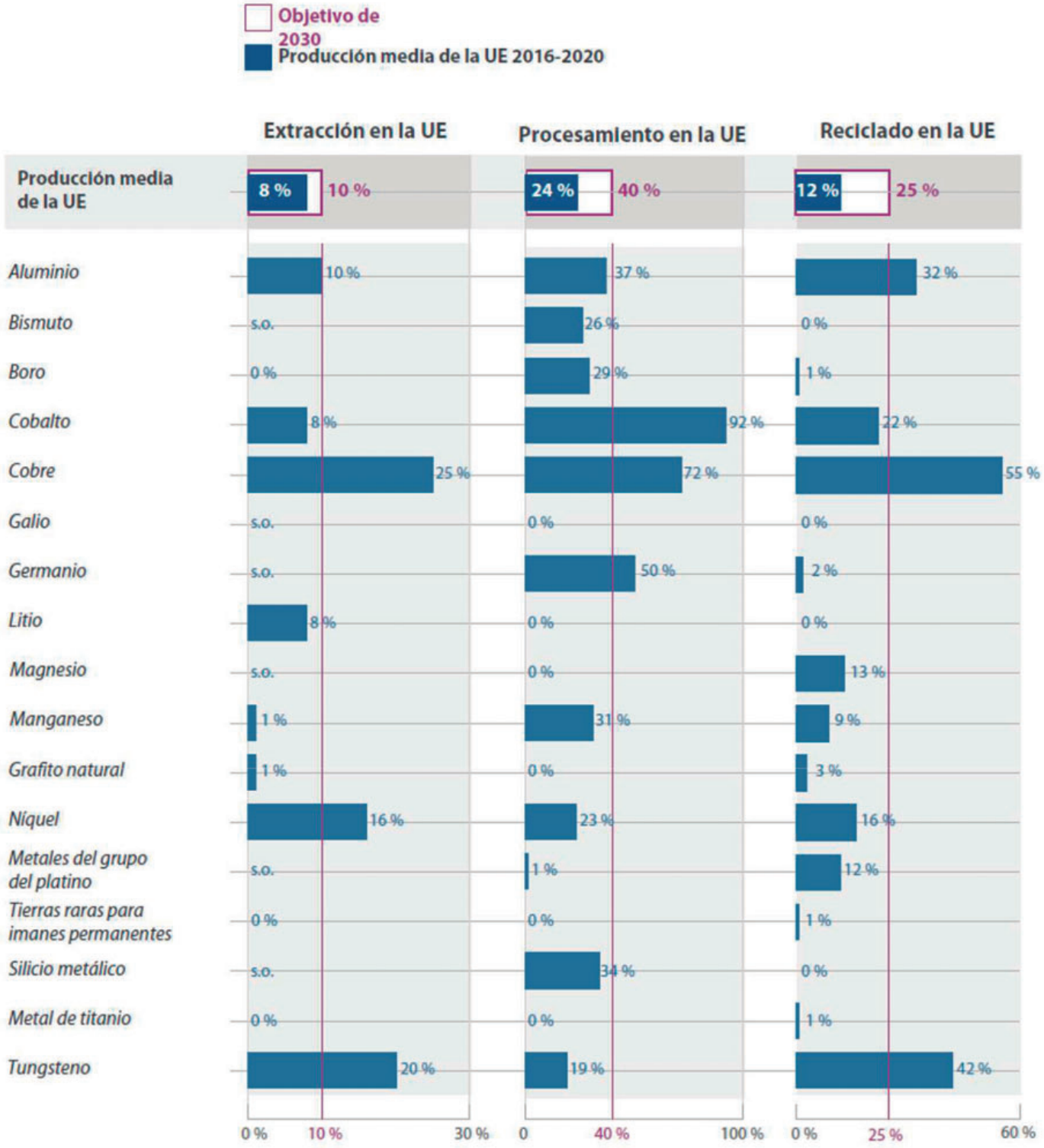


Figura 4. Capacidad media de producción de la UE y avances en la consecución de los objetivos de 2030 (Fuente: Tribunal de Cuentas Europeo, 2026)

(NdFeB) (IEA, 2026). La Unión Europea importa actualmente el 100% de sus necesidades de tierras raras (IEA, 2026). Aunque existen instalaciones metalúrgicas capaces de separar óxidos de tierras raras individuales (REO) en Estonia (Neo Performance Materials, Narva) y Francia (Solvay, La Rochelle), la UE carece por completo de minería activa de REE y de una masa crítica de transformación metálica y de fabricación de imanes (Solvay, 2022). Como consecuencia, la práctica totalidad del consumo europeo de estos elementos críticos ingresa en el mercado comunitario de manera indirecta, ya integrado en bienes manufacturados de alto valor añadido (como motores de vehículos eléctricos, aerogeneradores, discos duros o dispositivos móviles) importados de Asia (JRC, 2023).

I.4. EL ROL DEL RECICLAJE Y LA MINERÍA URBANA

Frente a la vulnerabilidad geológica y geopolítica de la extracción y refino primario, la economía circular y la

TABLA II
COMPARATIVA DE MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS INCLUIDAS EN DIFERENTES LISTADOS PUBLICADOS.
(Fuente: Tribunal de Cuentas Europeo, 2026)

Materias primas fundamentales	Lista de la UE	Lista de Australia	Lista de los Estados Unidos	Lista de la India	Lista de Japón	Lista de Corea del Sur	Lista del Reino Unido
Antimonio	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Arsénico	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No
Baritina/bario	Sí	No	Sí	No	Sí	No	No
Bauxita/aluminio	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	No
Boro	Sí	No	No	No	Sí	No	No
Cobalto	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Cobre	Sí	Sí	No	Sí	No	Sí	No
Flúor, fluorita	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	No
Galio	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Germanio	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
Grafito, grafito natural	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí
Litio	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Magnesio	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Manganeso	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No
Níquel	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Niobio	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Fósforo	Sí	Sí	No	Sí	No	No	No
Metales del grupo del platino	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Tierras raras (ligeras y pesadas)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Escandio	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No
Silicio	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Estroncio	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	No
Tántalo	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Tungsteno	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Vanadio	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

minería urbana se erigen como las estrategias acompañantes indispensables a largo plazo para asegurar la autonomía de la Unión Europea en términos de materias primas (JRC, 2023; IEA, 2024).

El concepto de minería urbana concibe todos los materiales manufacturados por el hombre —como residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), baterías de vehículos eléctricos descatalogadas, aerogeneradores obsoletos o catalizadores industriales— como ricos yacimientos artificiales de metales estratégicos de los cuales se puede extraer suministro secundario de alta calidad (IEA, 2024).

Asimismo, un volumen ingente de recursos se localiza en los residuos mineros (colas o tailings). A nivel global, las industrias extractivas generan aproximadamente 100000 millones de toneladas de colas cada año (IEA, 2024). Con el declive progresivo de las leyes de los yacimientos primarios mundiales, el reprocesamiento de estos estériles mineros resulta crecientemente atractivo desde el punto de vista tecnológico y económico (IEA, 2024). Por ejemplo, en Chile se proyecta que el cobre remanente en escombreras superará los 5,6 millones de toneladas en 2050, representando leyes de mineral superiores a muchas minas primarias activas (IEA, 2024).

En la Figura 5 se muestra la estimación del aumento anual en y estimación de almacenamiento en escombreras y presas de colas de diferentes CRM en la UE (JRC, 2017a).

El indicador clave para evaluar el nivel de circularidad es la Tasa de Entrada de Reciclaje al Final de la Vida Útil (End-of-Life Recycling Input Rate, EOL-RIR), que cuantifica la proporción de la demanda total de la industria que es cubierta mediante material secundario recuperado (JRC, 2017a). Sin embargo, la brecha de circularidad en el continente europeo es crítica. Mientras que materiales industriales tradicionales o bulk muestran tasas de reciclaje consolidadas —como el papel (53%), el aluminio (35%) o el acero (32%) (IEA, 2024)—, la

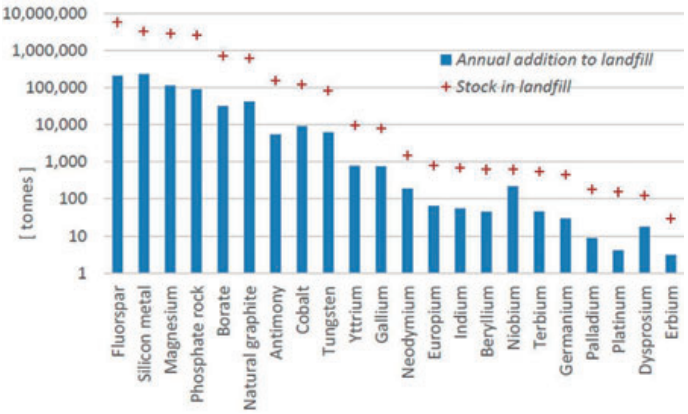


Figura 5. Adición anual en y estimación de almacenamiento en escombreras y presas de colas de diferentes CRM en la UE (Fuente: JRC, 2017b).

inmensa mayoría de las materias primas críticas y estratégicas registran tasas inferiores al 1% o nulas. De hecho, elementos indispensables para la digitalización y la transición como el litio, el silicio metal, el galio, el tántalo, el estroncio o el fósforo no se reciclan en absoluto (0%) a nivel comercial en la UE (Tribunal de Cuentas Europeo, 2026; Eynard et al., 2020). En la Figura 6, se muestran los valores EOL-RIR de la mayoría de los elementos de interés tecnológico, así como de otras materias primas candidatas a CRM en la UE (Eynard et al., 2020)

Este escenario de nulo aprovechamiento se asocia a graves cuellos de botella tecnológicos, regulatorios y de mercado (Tribunal de Cuentas Europeo, 2026; IEA, 2024).

En primer lugar, los recicladores europeos carecen de economías de escala y de la integración vertical que ostentan las instalaciones chinas, lo que dificulta competir en costes operativos (IEA, 2024).

En segundo lugar, las actuales normativas de la UE (como la Directiva RAEE) establecen objetivos agregados basados en masa total de residuos recogidos, lo que fomenta la recuperación de metales comunes masivos (como hierro o cobre) pero desincentiva la costosa separación de metales dispersos en concentraciones de partes por millón (como tierras raras en motores eléctricos o paladio en circuitos) (Tribunal de Cuentas Europeo, 2026).

Por último, persisten severas barreras regulatorias de traslado de residuos que entorpecen la logística transfronteriza dentro de la propia Unión (Tribunal de Cuentas Europeo, 2026; IEA, 2024).

Para redefinir este panorama, la Ley de Materias Primas Fundamentales de 2024 introdujo el hito no vinculante de que al menos el 25% del consumo anual de materias primas estratégicas de la UE debe provenir del reciclaje para el año 2030 (Tribunal de Cuentas Europeo, 2026). No obstante, la capacidad real de

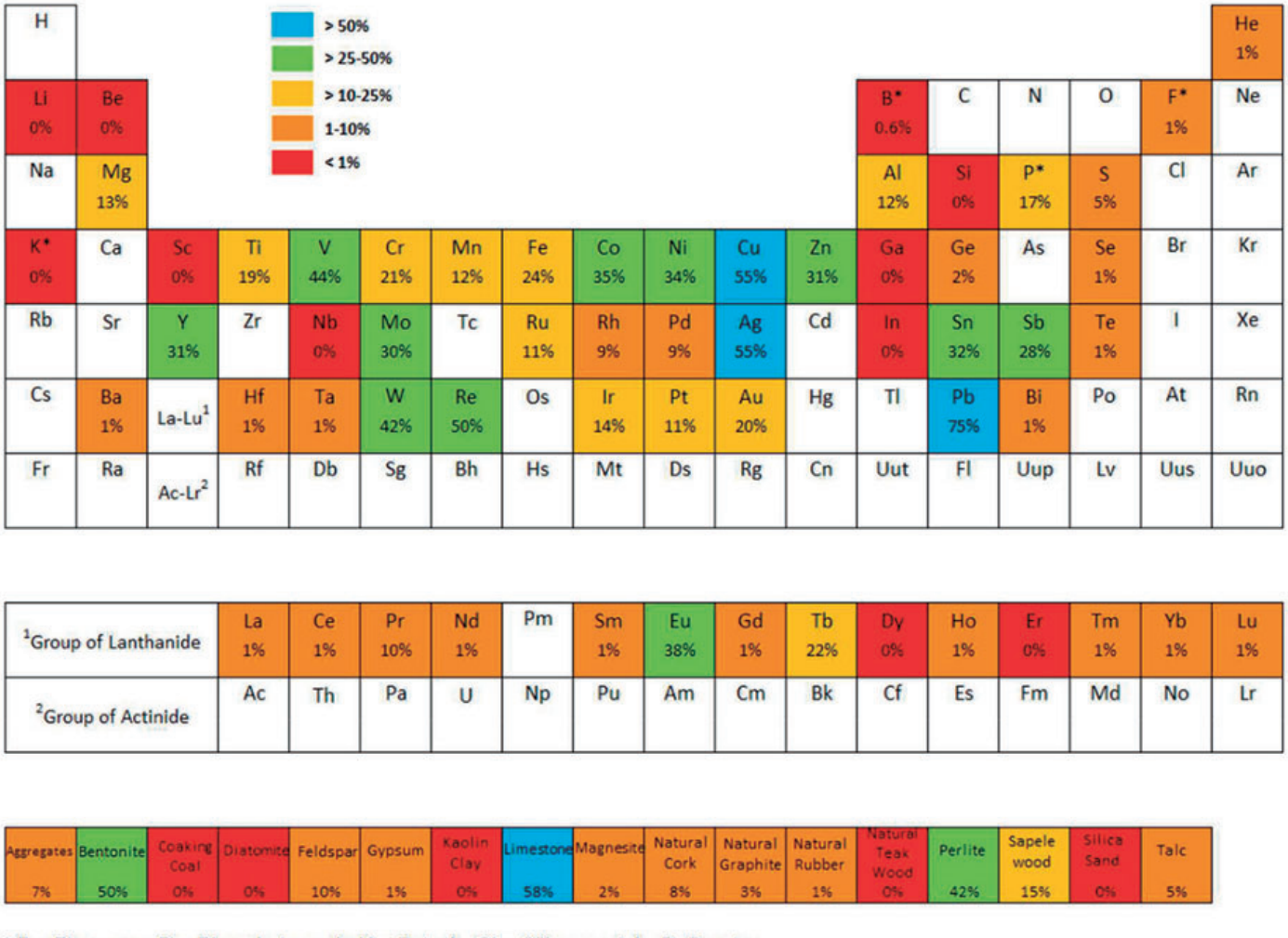


Figura 6. Tasa de reciclaje al final de su vida útil (EOL-RIR) de materias primas críticas y estratégicas en la UE (Fuente: Eynard et al., 2020).

reciclado se situaba en apenas el 12% cuando se fijó esta meta, lo que exige duplicar la infraestructura transformadora en un plazo de seis años (Tribunal de Cuentas Europeo, 2026).

Para estimular este crecimiento, la UE promueve la obligatoriedad del etiquetado de imanes en aerogeneradores para facilitar su desmontaje, exige declaraciones de huella ambiental y fomenta la eco-innovación ya desde la fase de diseño ecológico de los productos (Tribunal de Cuentas Europeo, 2026; JRC, 2023).

II. REVISIÓN DETALLADA DE MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS SELECCIONADAS

España, y de manera singular el noroeste peninsular y Asturias, alberga un subsuelo con un potencial metalogenético excepcional (Gibbons y Moreno, 2002). A continuación, se analiza en detalle la situación de una selección de materias primas críticas y estratégicas prioritarias, aportando datos rigurosos sobre su geología, geopolítica, aplicaciones y, fundamentalmente, sus rutas específicas de beneficio mineral y metalurgia de refinado basados en informes científicos europeos.

II.1. ESTRONCIO Y CELESTINA

El estroncio es un metal alcalinotérreo cuya fuente comercial principal a nivel mundial es la celestina (sulfato de estroncio, SrSO4) (Bollero et al., 2017; Eynard et al., 2020).

II.1.A. *Rol hegemónico de España en la UE*

El estroncio representa un caso único de total autonomía mineral para la Unión Europea. La producción minera de estroncio en la UE cubre de manera directa el 100% de la demanda comunitaria, reduciendo la tasa de dependencia de importaciones de la UE para este material al 0% (Eynard et al., 2020). España es el productor exclusivo de celestina en el territorio de la Unión Europea. Durante el periodo 2015-2019, la producción primaria media en el país se situó en el entorno de las 100 000 toneladas anuales de mineral (Eynard et al., 2020). El país cuenta con unas reservas probadas de celestina estimadas en unos 3,6 - 3,7 millones de toneladas de mineral (IGME, 2017).

II.1.B. *Geopolítica y mercado de importación*

A pesar de la autosuficiencia de la UE en extracción primaria gracias a la producción española, las importaciones de compuestos de estroncio procesados que ingresan a Europa para usos específicos provienen principalmente de China (45%), Japón (39%), México (6%) y Canadá (3%) (Eynard et al., 2020).

II.1.C. *Proceso de beneficio y metalúrgico de refinado*

La celestina extraída de las minas de Granada por las empresas Canteras Industriales y Kandelium Minerales (Figura 7) posee leyes variables; el mineral de descarte de escombreras históricas contiene leyes de entre 70% y 80% de $SrSO_4$, el cual se procesa y mezcla con mineral de ley inferior para obtener un concentrado final con más de 90% de $SrSO_4$ (Eynard et al., 2020). Para convertir este sulfato de estroncio en carbonato de estroncio ($SrCO_3$) —sustancia base del sector industrial—, se aplican dos vías metalúrgicas principales:



Figura 7: Mina de estroncio de Escúzar (Granada) (Fuente: Kandelium Minerales, 2026)

- Proceso Black Ash (Ceniza Negra): Consiste en una reducción carbotérmica del concentrado de $SrSO_4$ con coque en hornos rotatorios a temperaturas superiores a 950 °C para producir sulfuro de estroncio (SrS) soluble en agua. Posteriormente, el SrS se lixivia con agua caliente y se precipita selectivamente en forma de $SrCO_3$ añadiendo carbonato de sodio (N_a2CO_3) o inyectando CO_2 gas (Chen y Zhu, 2000; Obut et al., 2006).
- Proceso de Doble Descomposición (Conversión Directa): Consiste en la reacción directa de celestina finamente molida con una solución acuosa caliente de carbonato de sodio (>90 °C) para obtener directamente $SrCO_3$ sólido y una solución de sulfato de sodio (N_a2SO_4) como subproducto (Obut et al., 2006). Aunque la conversión directa es térmicamente más eficiente, el método Black Ash genera un carbonato de mayor pureza química (Chen y Zhu, 2000).

II.1.D. *Aplicaciones industriales estratégicas*

La mayor parte del consumo de compuestos de estroncio se concentra en la fabricación de imanes cerámicos permanentes de ferrita de estroncio (40% de la cuota de aplicación). El bario puede actuar como sustituto en estos imanes, pero a costa de reducir significativamente la temperatura máxima de operación del componente. Asimismo, el estroncio es crítico en pirotecnia y señalización (40% de cuota) para generar color rojo brillante, en la fabricación de vidrios especiales (12%), en aleaciones maestras de aluminio (5%) y en pigmentos (Bian et al., 2020; Eynard et al., 2020).

En la industria energética, el estroncio se emplea en fluidos de perforación, donde la celestina puede sustituir a la barita cuando los precios de esta última son elevados.

Adicionalmente, en la metalurgia del zinc, el estroncio es añadido durante la fase de electrólisis para precipitar y eliminar impurezas de plomo (Pb), mejorando la calidad final del zinc metálico refinado (Eynard et al., 2020).

II.2. MAGNESITA Y MAGNESIO

La magnesita (carbonato de magnesio, $MgCO_3$) es el mineral precursor para la obtención de óxido de magnesio (magnesia,

MgO), insumo crítico en la fabricación de refractarios industriales, fertilizantes y piensos agrícolas. Por su parte, el magnesio metálico es un elemento de aleación esencial para el sector de la automoción y el aluminio (Kramer, 2012).

II.2.A. *La posición de España en el mercado global*

España juega un papel estratégico crucial en el abastecimiento interno europeo de magnesita, aportando el 23% del suministro primario de la Unión Europea, solo por detrás de Eslovaquia (31%) y Austria (25%). La producción minera española de magnesita extrae y procesa mineral para generar anualmente unas 350000 toneladas de óxido de magnesio equivalente. De este volumen, la empresa Magnesitas Navarras (MAGNA) aporta aproximadamente 250000 toneladas, mientras que el volumen restante es producido por Magnesitas de Rubián en Galicia (Eynard et al., 2020).

II.2.B. *Estructura industrial y flujos comerciales*

El magnesio extraído en España sostiene una importante cadena de valor nacional y europea. El 20% de la magnesia producida se consume en el mercado doméstico, el 45% se exporta a otros países de la Unión Europea y el 35% restante se comercializa en mercados internacionales (Eynard et al., 2020). La producción de MAGNA se destina de manera prioritaria a la fabricación de productos refractarios para la industria siderúrgica (200000 toneladas), mientras que unas 100000 toneladas anuales se canalizan hacia aplicaciones de nutrición animal y agrícola (Eynard et al., 2020). MAGNA opera dos concesiones principales en España: la histórica explotación de Eugui en Navarra y la mina de Borobia en Soria, además de contar con centros de procesamiento industrial en Zubiri (Navarra) e Intrasa en Calanda (Teruel) (Eynard et al., 2020).



Figura 8: Mina de MAGNA en Borobia (Fuente: Terresis, 2026)

II.2.C. *Proceso de beneficio y metalúrgico de refinado*

La magnesita mineral en bruto se extrae de depósitos masivos mediante minería a cielo abierto o subterránea y se somete a cribado, trituración y molienda. Posteriormente, se transforma térmicamente en óxido de magnesio (magnesia, MgO) mediante procesos de calcinación en hornos rotatorios horizontales o de eje vertical calentados directamente con gas, fuel o petcoke (Euromines, 2025; Kramer, 2001). La temperatura y el tiempo aplicados controlan la reactividad química y cristalización de los tres grados comerciales dominantes:

- Magnesia Caústica Calcinada (CCM): Obtenida a temperaturas de hasta unos 1300 °C, donde la depuración térmica del carbonato libera CO_2 y deja un óxido poroso de alta reactividad química y pureza típica de 80-97% de MgO, idóneo para agricultura, química y papeleras (Euromines, 2025).
- Magnesia Sinterizada (Dead Burned Magnesia, DBM): Obtenida por encima de 1600 °C. Este tratamiento de sinterización severa reduce la reactividad casi a cero, consolidando una estructura cristalina de alta resistencia termofísica ideal para los refractarios básicos de las siderúrgicas (Kramer, 2001; Euromines, 2025).
- Magnesia Electrofundida (Fused Magnesia, FM): Se produce por fusión eléctrica por encima de 2800 °C en hornos de arco para aplicaciones refractarias y aislantes de máximo rendimiento (Kramer, 2001). Alternativamente, un 6% de la magnesia mundial se sintetiza químicamente a partir de agua de mar o salmueras naturales ricas en Mg2+ haciéndolas reaccionar con dolomía calcinada o cal, precipitando hidróxido de magnesio $Mg(OH)_2$, el cual es posteriormente calcinado (Zhang, 2023).

II.3. LITIO

El litio es el primer metal de la tabla periódica. Al ser un metal alcalino altamente reactivo, nunca se encuentra en estado puro en la naturaleza, presentándose en la corteza terrestre, con una abundancia promedio de unas 20 ppm, en forma de inertes compuestos minerales (silicatos, fosfatos) o como sales disueltas en salmueras y agua de mar (Toledo, 2025).

II.3.A. *Tipología geológica de los depósitos*

Los recursos mundiales identificados de litio se clasifican geológicamente en cinco tipologías principales, con distribuciones muy dispares de ley, tonelaje y complejidad extractiva.

Los salares de cuencas cerradas representan el 63% de los recursos mundiales, consistiendo en acumulaciones de agua subterránea hipersalina localizadas en cuencas de alta evaporación solar (Toledo, 2025).

Las pegmatitas graníticas de la familia LCT (Litio-Cesio-Tántalo) representan el 18%, donde el litio aparece principalmente en el espodumeno y la petalita (Toledo, 2025).

Las arcillas de litio (como hectorita en Thacker Pass y Sonora, o jadarita en Jadar) representan el 12% de los recursos, mientras que los granitos enriquecidos (con lepidolita o zinwaldita, como en Yichun y Cinovec) representan el 5% (Toledo, 2025).

Finalmente, las salmueras profundas de campos petrolíferos y geotermales constituyen el 2% restante de los recursos identificados (Toledo, 2025).

II.3.B. *Rutas tecnológicas de procesamiento y refino*

La metalurgia extractiva del litio difiere según la tipología del recurso. En el caso de las salmueras continentales, la vía tradicional consiste en la concentración evaporítica en pozas a cielo abierto durante periodos de 12 a 24 meses hasta alcanzar concentraciones de litio de hasta el 6% (Toledo, 2025). Posteriormente, se realiza el encalado (adición de cal) para precipitar el magnesio como $Mg(OH)_2$, se remueve el calcio y

los boratos por extracción por solventes, y se trata con carbonato de sodio para precipitar carbonato de litio de grado técnico o grado batería (Toledo, 2025). Para lograr pureza de grado batería (>99.5%), se realiza una purificación complementaria mediante carbonatación con CO_2 (Toledo, 2025).

Una vía emergente es la Extracción Directa de Litio (EDL), que emplea adsorbentes selectivos, membranas o celdas electroquímicas para separar el litio de la salmuera bruta, logrando recuperaciones superiores al 90% (frente al 15-40% del método evaporítico tradicional) y permitiendo reinyectar la salmuera estéril al acuífero para preservar el balance hídrico (Toledo, 2025; IEA, 2026).

En yacimientos de roca, el mineral convencional es la espodumena. Una vez concentrado mediante flotación por espumas (~6.0% Li_2O) se tuesta a más de 1100 °C para transformarlo en beta-espodumena reactivo, que se somete a una tostación con ácido sulfúrico para producir sulfato de litio soluble que se purifica y trata con carbonato de sodio o cal, y así conseguir finalmente carbonato o hidróxido de litio (Toledo, 2025; IEA, 2026).

En estudios recientes se presentan metodologías novedosas como el uso de *Deep Eutectic Solvents* (DES), que plantean rutas de tratamiento sobre minerals de litio no convencionales (Ghaedi et al., 2026).

II.3.C. *El potencial geológico de España*

España posee un potencial extraordinario en depósitos de litio. El depósito de San José (Cáceres, Extremadura), con unos recursos estimados en 111 millones de toneladas, con una ley media de 0.61% de Li_2O en micas de litio (lepidolita), es uno de los recursos de roca más significativos de Europa (Infinity Lithium, 2018; Eynard et al., 2020). Este proyecto se encuentra en fase avanzada de estudios de viabilidad para su explotación integrada y refinamiento químico local para deparar compuestos de grado batería (IEA, 2025).

La península ibérica constituye el cinturón granítico hercínico más rico en litio del sur de Europa, destacando Portugal como el principal productor minero de lepidolita y feldespatos litíferos (petalita) para la industria cerámica en la UE (Eynard et al., 2020), y registrando España extracciones históricas menores de unas 8,000 toneladas anuales de lepidolita (Eynard et al., 2020).

II.3.D. *Integración en la cadena de valor europea de baterías*

El refino y refinamiento del litio en territorio nacional es un pilar indispensable para reducir la dependencia exterior de la UE de las plantas de conversión asiáticas, que controlan más del 72% de la refinación mundial (JRC, 2023).

En mayo de 2023, la Comisión Europea aprobó un régimen de ayudas estatales en España por valor de 837 millones de euros destinados exclusivamente a incentivar la fabricación de baterías de vehículos eléctricos y sus componentes (Obaya, 2025), además de anunciar un conjunto de proyectos seleccionados como estratégicos, que se representan en la Figura 9. Entre dichos proyectos, en la Peninsula Ibérica se concentra el mayor número de proyectos mineros de Li.

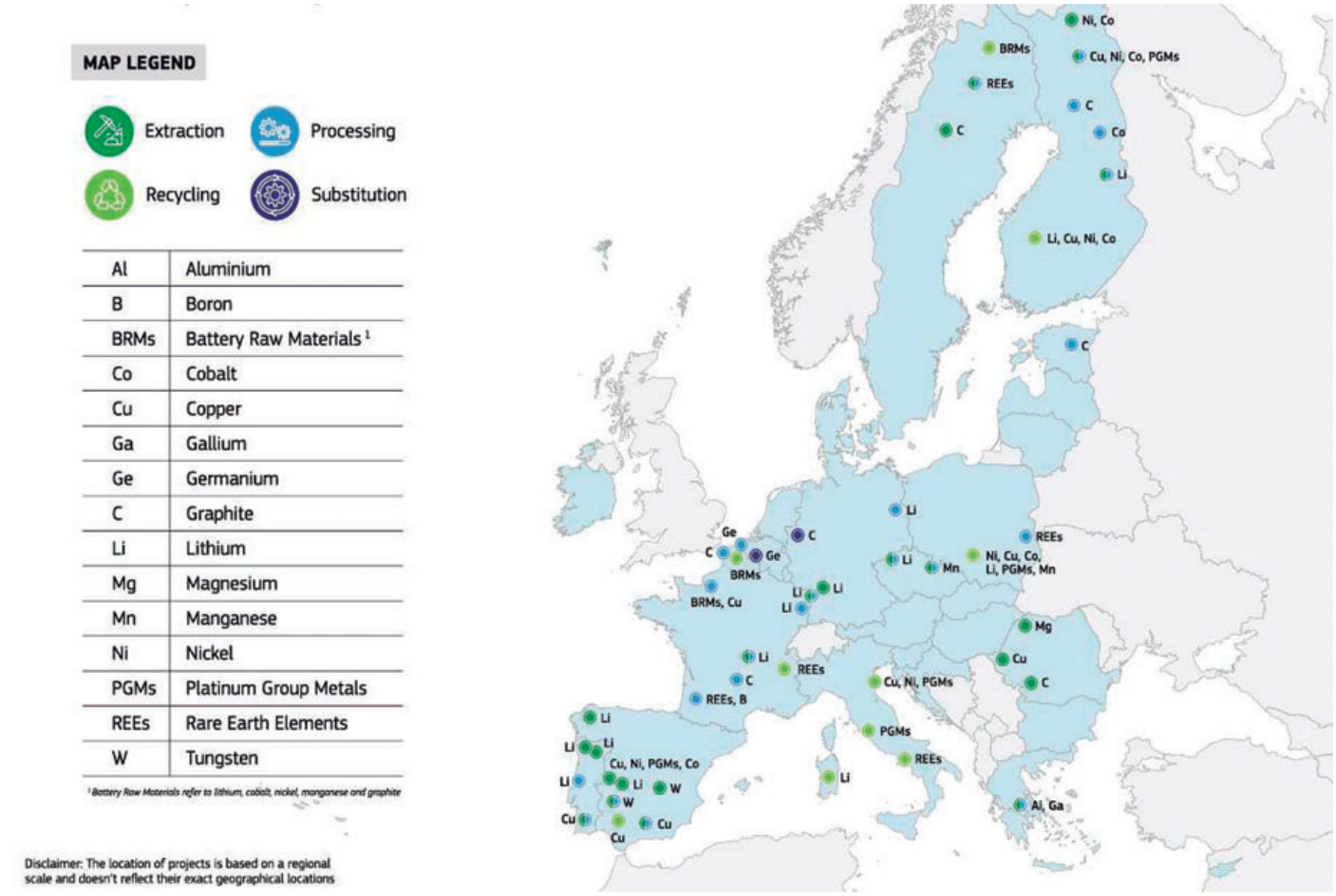


Figura 9. Proyectos estratégicos de CRM en la UE (Fuente: UE, 2025).

Estos proyectos son claves para cumplir con el hito estratégico de la Ley de Materias Primas Críticas (CRMA) de refinar el 40% del consumo de litio y el 15% mediante reciclaje dentro del territorio de la Unión para 2030.

II.4. COBRE

El cobre es un metal de alta conductividad eléctrica, considerado la piedra angular de la electrificación requerida por la descarbonización (Lossin, 2001). La Unión Europea lo ha categorizado formalmente como materia prima estratégica en su legislación de 2024 debido a su elevado volumen de consumo proyectado y el riesgo de brecha entre oferta y demanda (JRC, 2023).

II.4.A. *Relevancia de Asturias*

El yacimiento de cobre activo más importante del norte de España y de Asturias es el complejo minero subterráneo El Valle-Boinás, operado por la empresa Orovalle Minerals S.L. (filial de la corporación canadiense Orvana Minerals Corp) (Orvana, 2021). El Valle-Boinás es una explotación polimetálica subterránea de oro y cobre que extrae sulfuros complejos (Orvana, 2021). El informe de reservas y recursos de Orvana Minerals, actualizado bajo estándares internacionales, consolida a esta explotación asturiana como un centro productivo clave y regular de concentrados de cobre en el territorio nacional (Orvana, 2021). En la Figura 10 se muestra un detalle de las operaciones metalúrgicas realizadas en la planta de El Valle-Boinás.



Figura 10: Colada de producción en la planta de El Valle-Boinás

II.4.B. Dinámica de suministro e importación en la UE

A nivel continental, la Unión Europea es un productor minero relevante de cobre a través de grandes operaciones polimetálicas en Polonia, Suecia, Portugal y el suroeste de España (faja pirítica andaluza, con minas de primer orden como MATSA, Riotinto o Cobre Las Cruces) (Eynard et al., 2020). No obstante, la UE registra una tasa de dependencia de importaciones del 56% para concentrados de cobre (Eynard et al., 2020). Sus importaciones históricas de matas y cobre de cementación han procedido de proveedores consolidados como Brasil, Canadá, Japón, México, Noruega y Rusia (Eynard et al., 2020). El flujo de importación de cobre refinado en forma de cátodos ha estado dominado por Chile y Rusia (Eynard et al., 2020).

II.4.C. *Proceso de beneficio y metalúrgico de refinado*

La producción de cobre primario comienza con la extracción de menas que generalmente contienen entre 0,5% y 3% de Cu mediante minería a cielo abierto, subterránea o lixiviación (ICSG, 2025). Tras la extracción, el mineral se somete a trituración y molienda fina, seguido de una flotación selectiva por espuma para incrementar el contenido de cobre metálico en el concentrado comercial a un rango del 25% al 35% de Cu (ICSG, 2025). A partir de esta etapa, se procesa por dos vías metalúrgicas dominantes:

- Vía Pirometalúrgica (sulfuros de alta ley o concentrados): Los concentrados de flotación se funden en hornos para obtener una fase fundida llamada “mata” o “eje” que contiene entre un 50% y 70% de Cu. Esta mata se convierte en cobre blister mediante soplado con oxígeno en convertidores y, finalmente, se funde en ánodos para someterse a una refinación electrolítica en celdas de sulfato de cobre ácido, depositando cátodos de cobre puro (>99,99%) (ICSG, 2025).
- Vía Hidrometalúrgica (óxidos y sulfuros de baja ley): El mineral se somete a lixiviación en pilas (in-situ) mediante riego con ácido sulfúrico diluido para generar una solución cargada (PLS). Esta solución se somete a extracción por solventes (SX) usando reactivos orgánicos altamente selectivos para concentrar y purificar los iones cúpricos, procediendo luego a una fase de electro-obtención (EW) para depositar cátodos de cobre ultrapuro de grado comercial (ICSG, 2025).

II.4.D. *Cadenas de reciclaje y flujo material*

El cobre posee una excelente aptitud para la economía circular (Passarini et al., 2018). El análisis de flujo de materiales (MSA) de la UE indica que el flujo de reciclaje de chatarra y materiales secundarios introduce más de 305000 toneladas anuales de cobre al sector de procesamiento europeo (Eynard et al., 2020; Passarini et al., 2018). El reciclaje funcional al final de la vida útil de los productos recupera volúmenes masivos de metal, aunque la demanda creciente de la transición energética impide que el residuo secundario cubra por sí solo las necesidades de fabricación de bienes de equipo eléctrico (JRC, 2023).

II.5. WOLFRAMIO O TUNGSTENO

El wolframio es un metal refractario con una densidad extrema (19.3 g/cm^3) y el punto de fusión más elevado de todos los elementos químicos (3422 °C) (Eynard et al., 2020). Sus aplicaciones en herramientas de corte de carburo cementado de alta dureza, superaleaciones de aviación y aplicaciones de defensa nacional lo convierten en un material insustituible de extrema criticidad (Eynard et al., 2020).



Figura 11: Mina de Barruecopardo. (Fuente: Saloro, 2026)

II.5.A. *Monopolio global chino y posición europea*

La cadena de suministro mundial de wolframio está bajo un severo monopolio de facto por parte de China, que concentra el 83% de la extracción minera global y la inmensa mayoría de la capacidad de refino de paratungstato de amonio (APT).

La producción minera primaria de wolframio dentro de la Unión Europea es muy limitada y se restringe exclusivamente a tres países: Austria (que aporta el 44% del suministro interno europeo), Portugal (28%) y España (28%) (Eynard et al., 2020). En el caso de Portugal, la mina de Panasqueira destaca por llevar más de 130 años de operación (Figuras 12 y 13).



Figura 12: Sección de concentración gravimétrica en la mina de Panasqueira (Portugal)



Figura 13: Sección de concentración magnética en la mina de Panasqueira (Portugal)

II.5.B. *Operaciones y proyectos mineros en España*

España cuenta con recursos y reservas de wolframio de importancia estratégica para Europa (Eynard et al., 2020; Mateus et al., 2021). Se pueden destacar, entre otros, por su estado de desarrollo los siguientes:

- Mina de Barruecopardo (Salamanca): Yacimiento histórico de scheelita reactivado comercialmente en septiembre de 2019 tras obtener la autorización ambiental, aportando un flujo constante de concentrados de WO3 al mercado continental.
- Mina de Los Santos (Salamanca): Operación minera a cielo abierto que cesó la extracción de mineral primario en 2019 debido al agotamiento de reservas de tajo, pero que mantiene una producción residual mediante el retratamiento metalúrgico de sus balsas de lodos y colas históricas (*tailings*).
- Proyecto Valtreixal (Zamora): Depósito de wolframita y scheelita controlado por la firma Valtreixal Resources Spain S.L. (del grupo Almonty Industries), que ha superado fases clave de investigación y tramitación de su correspondiente Declaración de Impacto Ambiental para su explotación futura (Eynard et al., 2020).

II.5.C. *Proceso de beneficio y metalúrgico de refinado*

La extracción de menas de wolframita o scheelita (de leyes típicas de 0.4% a 0.6% WO3) se somete a trituración, molienda y beneficio físico mediante enriquecimiento gravimétrico (debido a la alta densidad de las menas) o flotación selectiva por espumas (especialmente para scheelita) para generar concentrados comerciales con leyes de entre 65% y 75% de WO3 (Eynard et al., 2020). Los nuevos proyectos incluyen estrío automático que permiten obtener preconcentrados minerales a tamaños gruesos, reduciendo los costes energéticos asociados a la etapa de molienda.

Posteriormente, el proceso metalúrgico comprende los siguientes pasos:

- Digestión: Los concentrados se digieren a temperaturas elevadas en autoclaves con soluciones concentradas de hidróxido de sodio (NaOH) o carbonato de sodio (Na_2CO_3) para solubilizar el wolframio en forma de wolframato de sodio (Na_2WO_4) (Chen et al., 2025).
- Purificación y Extracción por Solventes: La solución de Na2WO4 se purifica rigurosamente mediante adición de reactivos específicos para eliminar impurezas críticas como As, Si, P, V, F, Sn y Sb (Chen et al., 2025). Posteriormente, la solución se somete a una extracción por solventes orgánicos (SX) para deparar una solución de wolframato de amonio purificada.
- Cristalización de APT y Reducción: La solución pura se evapora para cristalizar el paratungstato de amonio o APT $[(NH_4)_{10}(H_2W_{12}O_{42})\cdot 4H_2O]$ sólido. El APT es el intermediario químico comercial de referencia global (Eynard et al., 2020). Finalmente, el APT se calcina para obtener trióxido de wolframio (WO_3), el cual se somete a una reducción pirometalúrgica térmica con corrientes de

hidrógeno gaseoso en hornos rotatorios a alta temperatura para obtener polvo metálico de wolframio de alta pureza (Chen et al., 2025).

II.5.D. *Cadenas de reciclaje y Reglamento 3TG*

El wolframio registra una notable tasa de reciclaje funcional en la UE, estimada en un 42% gracias a la recuperación sistemática de herramientas de carburo de wolframio desgastadas (Eynard et al., 2020; Zeiler, 2021). Existen dos grandes vías de reciclaje:

- Vía Directa (Zinc Process): Consiste en exponer la chatarra de carburos cementados a un baño de zinc líquido a temperaturas de entre 800 °C y 1050 °C bajo atmósfera inerte. El zinc reacciona con el cobalto aglomerante expandiéndose y desintegrando la estructura del material. Luego el zinc se destila al vacío, dejando un metal poroso (esponjoso) de carburo de wolframio-cobalto idéntico a la materia prima original que puede remolerse de forma directa (Zeiler, 2021).
- Vía Química Avanzada: Consiste en someter la chatarra compleja a una fusión alcalina oxidante con nitrato de sodio o carbonato de sodio a 550-800 °C, disolviendo el wolframio en forma de Na_2WO_4 purificable para re-sintetizar APT de máxima pureza (Zeiler, 2021).

En cualquiera de las vías, el wolframio está sujeto a estrictas normativas internacionales de trazabilidad. En enero de 2021 entró plenamente en vigor el Reglamento de Minerales de Conflicto de la Unión Europea, que obliga a los importadores de wolframio, junto con el estaño, tantalio y oro (el grupo de los 3TG – Tunsten, Tin, Tantalum, Gold) a aplicar procedimientos rigurosos de diligencia debida en sus cadenas de suministro conforme a las guías de la OCDE para certificar que el mineral procede de fuentes libres de conflicto armado (Eynard et al., 2020).

II.6. TANTALIO

El tantalio o tántalo es un metal de transición azul-grisáceo, altamente refractario, caracterizado por una resistencia química excepcional a la corrosión y por su capacidad para formar películas de óxido estables de alta constante dieléctrica, fundamentales en la microelectrónica (JRC, 2021).

II.6.A. *Pioneros en la UE: La Mina de Penouta*

Históricamente, el tantalio primario consumido en Europa procedía en un 99% de la importación desde zonas geográficas complejas de África central y Brasil (JRC, 2021). El tantalio, como ya se ha comentado, está sujeto a la Directiva europea de Minerales de Conflicto y a controles de trazabilidad de derechos humanos en la minería artesanal a pequeña escala (ASM), que representa el 20-25% de la extracción global de este metal (JRC, 2021). No obstante, la reapertura de la mina a cielo abierto de Penouta en Orense (Galicia), operada por Strategic Minerals Europe Corp, marcó un hito histórico al reactivar la producción primaria de concentrados de columbita-tantalita (coltan) en suelo europeo, convirtiendo a España en el único productor activo de tantalio de la Unión Europea. En sus primeros meses de operación en 2022, Penouta procesó un volumen inicial de unas 29,8 toneladas de concentrado con leyes de entre el 17% y el 19% de tantalita, y del 19% al 21,5% de columbita, deteniendo sus operaciones en 2024. Actualmente, la mina (Figura 14) se encuentra en reactivación tras ser adquirida recientemente por la empresa australiana Energy Transition Minerals (EMT) (EMT, 2026).



Figura 14: Vista aérea de la mina de Penouta. (Fuente: EMT, 2026)

II.6.B. *Proceso de beneficio mineral*

El procesamiento del mineral de Penouta se basa en una secuencia física multietapa (Bourgeois et al., 2017):

- Preparación mecánica del mineral: Trituración mediante trituradora de mandíbulas, cono o impacto para reducir el mineral por debajo de 15-20 mm, seguido de molienda de bolas o barras en circuito cerrado con cribas y ciclones para lograr un tamaño inferior a 1 mm (Bourgeois et al., 2017).
- Separación Gravimétrica: Uso de cajas pulsatorias (jigs), mesas de sacudidas, espirales concentradoras o equipos de concentración multigravimétrica (Knelson, Falcon, MGS) para segregar las partículas de columbita-tantalita (con densidades elevadas de entre 6.0 y 8.0 g/cm3) de la ganga de silicatos ligeros (Bourgeois et al., 2017).
- Flotación Inversa y Separación Magnética: Flotación selectiva para concentrar las fracciones ultrafinas residuales, seguido de separación magnética de baja y alta intensidad para remover impurezas ferrosas o de otros minerales magnéticos asociados (Bourgeois et al., 2017). El concentrado final se lixivia químicamente con HF/H_2SO_4 y se somete a extracción por solventes (SX) para separar selectivamente el tantalio de su elemento acompañante, el niobio (JRC, 2021).

Adicionalmente a la vía hidrometalúrgica, la empresa Neo Performance Materials (NPM) dispone en su planta de Narva (Estonia) de la posibilidad de producción de tántalo metal (hasta 5N) mediante un proceso pulvimetalúrgico a partir de concentrados de Ta2O5 de alta pureza y mezclando con chatarras de Ta. Las fases del mismo serían:

- Reducción térmica: El óxido purificado se somete a una reacción de reducción utilizando un metal activo como agente reductor (generalmente sodio líquido o magnesio) a altas temperaturas o mediante reducción térmica con carbono. Con ello Se rompen los enlaces de oxígeno, aislando el elemento y obteniendo Ta en estado de polvo metálico o esponja metálica debido a su altísimo punto de fusión (3017 ºC).
- Refino por Haz de Electrones (EB): Debido a que los polvos obtenidos todavía contienen trazas de gases (oxígeno, nitrógeno) u otros metales, NPM utiliza la fusión por haz de electrones (Electron Beam Melting) en hornos de alto vacío. El haz de electrones bombardea el tántalo, fundiéndolo y permitiendo que las impurezas volátiles se evaporen, logrando una pureza comercial ultra alta (Oh et al., 2013; Vutova et al., 2016).
- Pulvimetalurgia: El polvo purificado se prensa a presiones extremas (hasta 2000 bar) en moldes específicos y se introduce en hornos especiales a temperaturas cercanas a su punto de fusión. Así, Los átomos del metal se entrelazan para formar lingotes densos, barras (Figura 15) o láminas de tántalo metal listo para aplicaciones industriales de alta resistencia (Oh et al., 2013).



Figura 15. Lingotes de Ta producidos por Neo Performance Materials en la planta de Narva (Estonia).

II.6.C. *Proyectos europeos de investigación*

Debido al carácter estratégico del tantalio y el wolframio, la Comisión Europea ha financiado proyectos científicos de gran envergadura orientados a optimizar su procesamiento metalúrgico y reciclaje, tales como el Proyecto OptimOre (2018), centrado en el desarrollo de modelos de control avanzado y sensórica industrial mediante inteligencia artificial; el Proyecto ReFraM (2017), enfocado en valorizar recursos secundarios de metales refractarios; y el Proyecto SOLCRIMET (2021), enfocado en el desarrollo de procesos metalúrgicos de extracción por solventes iónicos líquidos para recuperar tantalio desde residuos electrónicos (JRC, 2021).

II.7. TIERRAS RARAS (REE)

Como se ha expuesto anteriormente, las tierras raras (REE) poseen una criticidad extrema debido a que son pilares de la transición energética y de la alta tecnología (imanes Nd-Fe-B en vehículos eléctricos y aerogeneradores) (Eynard et al., 2020; Machacek y Kalvig, 2017). Su viaje industrial es uno de los más complejos de la ingeniería metalúrgica:

II.7.A. *Extracción geológica y mineralógica*

Solo cuatro minerales se procesan con viabilidad industrial a nivel mundial: la bastnäsita, la monacita, la xenotima y las arcillas de adsorción iónica, siendo caracterizada la ley de los mismos por el contenido total en óxidos de tierras raras, REO (Machacek y Kalvig, 2017). La minería se realiza mayoritariamente a cielo abierto, mientras que las arcillas de adsorción iónica (en el sur de China y Myanmar) se explotan a pequeña escala mediante técnicas de lixiviación in-situ con soluciones de sulfato de amonio (Eynard et al., 2020; Machacek y Kalvig, 2017).

II.7.B. *Beneficio físico del mineral*

Los minerales alojados en yacimientos de roca deben ser molidos hasta conseguir la liberación mineral de las especies de interés y se concentran utilizando propiedades físicas distintivas. Por ejemplo, en el yacimiento de Bayan Obo (China), el proceso de beneficio comprende la trituración, molienda (90% < 74 micras), separación magnética de baja intensidad para retirar la magnetita y hematita de hierro, seguido de una flotación selectiva utilizando aditivos como carbonato de sodio, silicato de sodio y jabón de parafina para deparar un concentrado mixto de bastnäsita (45% - 68% REO) y monacita (36% REO) (Machacek y Kalvig, 2017).

II.7.C. *Metalurgia extractiva*

Para liberar las tierras raras, los concentrados comerciales se someten a digestión química húmeda (cracking). Los procesos más comunes emplean un tostado oxidativo con ácido sulfúrico concentrado (H2SO4) a temperaturas elevadas o una lixiviación ácida caliente con ácido clorhídrico (HCl) y posterior craqueo cáustico con sosa (NaOH), convirtiendo los compuestos insolubles en cloruros de tierras raras (RECl3) solubles en agua (Machacek y Kalvig, 2017).

II.7.D. *Separación y Refino de REO*

Dada la extraordinaria similitud de propiedades químicas de los lantánidos, la separación industrial en sus diferentes óxidos individuales (Figura 16) es sumamente compleja.

El método dominante en todo el mundo es la Extracción por Solventes (SX) líquido-líquido. En una planta convencional de SX, se hace pasar la solución acuosa de REE a través de mezcladores-decantadores en cascada inmiscibles que contienen agentes orgánicos específicos (como organofosforados). Conseguir cortes individuales con purezas de grado de imanes de neodimio (99.9%, 3N) o aplicaciones ópticas/semiconductoras (99.999%, 5N) requiere entre 30 y 100 etapas de mezcla

secuenciales, lo que exige costes de inversión (CAPEX) y operativos (OPEX) inmensos (Machacek y Kalvig, 2017).

II.7.E. *Tecnologías en desarrollo e innovación*

Con el objetivo de romper el monopolio chino en la separación por solventes, se están desarrollando varias alternativas ecológicas:

- Proceso RapidSX (Innovation Metals Corp): Un método de transferencia de masa acelerada que optimiza la cinética de separación por solventes y disminuye sustancialmente el número de etapas, el consumo de reactivos y el área de huella de la planta (Machacek y Kalvig, 2017).
- Tecnología de Reconocimiento Molecular (Molecular Recognition Technology, MRT): Desarrollada por Ucore y IBC Advanced Technologies, consiste en un proceso en columna libre de solventes orgánicos basado en ligandos altamente selectivos (éteres corona) para capturar y separar selectivamente elementos individuales a purezas superiores al 99,9% de manera limpia (Machacek y Kalvig, 2017).
- Separación por Nanopartículas Magnéticas (EURARE): Desarrollado en el marco del proyecto europeo EURARE (2017), emplea nanopartículas de magnetita recubiertas con una capa de sílice silanizada y ligandos complexonatos (derivados de aminoácidos biodegradables) que coordinan selectivamente iones Ln3+ específicos bajo rangos estrechos de pH, separando las fases de manera instantánea mediante el uso de campos magnéticos externos (Machacek y Kalvig, 2017).

II.7.F. *Preparación del metal puro (REM)*

Una vez separados los óxidos puros de tierras raras, estos se convierten en haluros (cloruros o fluoruros anhidros) para proceder a su reducción metalotérmica con calcio metálico o someterse a electrólisis de sales fundidas (molten salt electrolysis), obteniéndose metales individuales puros (como Nd metálico) o aleaciones comerciales complejas como el mischmetal (La-Ce) (Machacek y Kalvig, 2017).

La única planta en Europa con capacidad para realizar todas las etapas, como ya se ha mencionado, se encuentra en Narva (Estonia) y pertenece a la compañía Neo Performance Materials que ha complementado sus capacidades con una planta de fabricación de imanes permanentes a base de tierras raras (NPM, 2025).

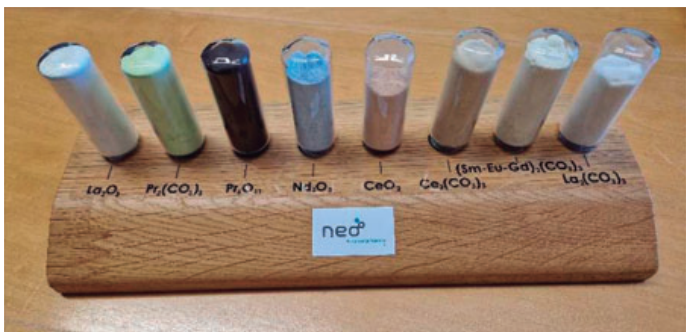


Figura 16. Compuestos refinados de REE producidos por NPM en Estonia

II.8. SILICIO METAL

El silicio metal, el segundo elemento más abundante de la corteza, se asocia geológicamente a yacimientos de cuarzo de alta pureza (Eynard et al., 2020).

II.8.A. *Capacidades en España y la UE*

Los yacimientos comerciales de alta pureza (>97% SiO_2) capaces de satisfacer las estrictas especificaciones metalúrgicas son escasos. En la UE, el cuarzo de alta pureza es extraído y procesado en silicio metal in-situ en Francia, Alemania y España. Durante el período 2016-2020, la producción media anual de la UE fue de 167000 toneladas, cubriendo una cuota del 5% del suministro mundial (Eynard et al., 2020). La tasa de dependencia de importaciones de la UE para el silicio metalúrgico es del 63%, importándose principalmente de Noruega y Rusia (Eynard et al., 2020).

II.8.B. *Proceso de beneficio y reducción carbotérmica*

La roca de cuarzo es extraída de vetas pegmatíticas mediante voladura, procediendo a su adecuada clasificación por tamaños para asegurar la granulometría de horno requerida. Para obtener el Si de grado metalúrgico (MG Si, ~98,5% Si), el mineral se reduce químicamente en hornos de arco sumergido (SAF) cargados con cuarzo y agentes de carbono (como coque, hulla, astillas de madera y carbón vegetal) (Eynard et al., 2020).

Se inyecta una inmensa cantidad de energía eléctrica mediante electrodos de grafito sumergidos en la carga, operando a temperaturas entre 800 °C y 1300 °C en la parte superior y superando los 2000 °C en el crisol de base donde se funde el silicio líquido. Este proceso es altamente intensivo en energía, consumiendo entre 11 y 14 MWh por tonelada de silicio metal producido (Eynard et al., 2020).

II.8.C. *Refino y ultra-purificación*

El silicio metalúrgico crudo de salida de horno se drena y se purifica insuflándole mezclas gaseosas de oxígeno e introduciendo fundentes (agentes escorificadores) para oxidar y decantar las escorias metálicas de hierro, aluminio y calcio, logrando leyes del 99% Si (Aasly et al., 2008; Eynard et al., 2020). Para fabricar obleas de silicio fotovoltaico (grado solar 6N-9N) o componentes de microelectrónica (grado semiconductor 9N-11N), es imprescindible conseguir una pureza extrema mediante tratamientos químicos avanzados, como son:

- Proceso Siemens: El silicio metalúrgico triturado se hace reaccionar con gas cloruro de hidrógeno (HCl) a 300 °C para producir gas triclorosilano (SiHCl3). El $SiHCl_3$ se somete a múltiples destilaciones fraccionadas para aislarlo de impurezas de boro, fósforo y metales de transición a nivel de partes por billón (ppb). Finalmente, el gas purificado se descompone con hidrógeno a más de 1000 °C en reactores de deposición química de vapor (CVD), depositando filamentos cristalinos puros de polisilicio de grado solar o electrónico (Eynard et al., 2020).
- Horno de Lecho Fluidizado (Fluidized Bed Reactor-FBR): Una vía alternativa energéticamente más barata donde se

inyecta silano (SiH_4) gas en reactores de lecho fluidizado para depositar silicio policristalino granular de alta pureza (Eynard et al., 2020).

II.9. OTROS METALES CRÍTICOS EN SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES

Muchas de las materias primas críticas declaradas por la UE no aparecen en depósitos primarios concentrados, sino que se recuperan exclusivamente como valiosos subproductos o coproductos durante la metalurgia extractiva de otros metales mayoritarios (como zinc, cobre o plomo), lo que acrecienta la complejidad técnica de su refinamiento y logística de suministro.

II.9.A *Fosfato Natural / Roca Fosfórica*

La Unión Europea registra una dependencia del exterior del 82% (JRC, 2021). España posee unas reservas probadas muy notables de 30,8 millones de toneladas con ley de 11,78% de P_2O_5 (IGME, 2017).

Proceso de beneficio y metalúrgico: La roca fosfórica se beneficia físicamente mediante trituración, molienda y flotación para separar el apatito de los carbonatos y silicatos asociados. Para producir fósforo elemental por vía térmica (thermal process), el fosfato tricálcico se mezcla con sílice y carbón coque en hornos de arco eléctrico de gran envergadura a más de 1400 °C. El fósforo elemental se volatiliza en forma de vapor y se condensa bajo agua para evitar su combustión espontánea (Eynard et al., 2020). No obstante, para reducir costes e impacto ambiental, la industria mundial ha migrado hacia la vía húmeda (wet process), donde la roca fosfórica se digiere con ácido sulfúrico concentrado para obtener ácido fosfórico crudo purificable químicamente mediante extracción por solventes (USGS, 2016).

II.9.B *Zinc*

España alberga el mayor complejo metalúrgico del zinc del sur de Europa en Asturias (Figura 17), perteneciente a Asturiana de Zinc (Glencore).



Figura 17: Planta de zinc electrolítico de San Juan de Nieva. (Fuente:AZSA, 2026)

Los minerales sulfurados (esfalerita, ZnS), en su mayor parte de minas subterráneas, se muelen y se concentran selectivamente por flotación por espumas. Estos concentrados son actualmente importados masivamente a la UE para poder abastecer las plantas metalúrgicas, las cuales siguen la ruta hidrometalúrgica clásica denominada RLE: Roasting, Leaching, Electrowinning (Habashi, 1997; Habashi, 2005).

- Tostación (Roasting): El concentrado de ZnS se tuesta oxidativamente en hornos de lecho fluidizado a 900-1000 °C para convertirlo en calcina (óxido de zinc, ZnO) y liberar gas dióxido de azufre (SO_2), recuperado in-situ para producir ácido sulfúrico comercial (Abkhoshk et al., 2014).
- Lixiviación y Purificación (Leaching): La calcina de ZnO se disuelve en ácido sulfúrico diluido (electrólito gastado) para obtener una solución acuosa de sulfato de zinc ($ZnSO_4$) cruda. Para deparar una electrólisis eficiente, la solución se purifica rigurosamente mediante la adición de polvo fino de zinc metálico; este reacciona por desplazamiento galvánico (cementación), precipitando de manera selectiva las impurezas metálicas de cobre (Cu), cadmio (Cd) y cobalto (Co) (Abkhoshk et al., 2014).
- Electroobtención (Electrowinning) y Fusión: La solución acuosa pura de $ZnSO_4$ se hace circular por celdas con ánodos de plomo y cátodos de aluminio, donde se aplica corriente continua de alta intensidad, depositando zinc ultrapuro en los cátodos. Los cátodos se pelan mecánicamente y se funden para verter el metal en lingotes comerciales (Abkhoshk et al., 2014).

II.9.C *Cadmio*

El cadmio no posee minas primarias propias y se obtiene exclusivamente como subproducto metalúrgico o del reciclaje de baterías NiCd.

Durante el refino hidrometalúrgico de zinc, el cemento de purificación rico en cadmio es filtrado, oxidado y redisuelto en ácido sulfúrico diluido. La solución pura resultante de sulfato de cadmio ($CdSO_4$) pasa a una celdas de electrólisis con ánodos de aluminio y cátodos de plomo, logrando cadmio metálico de gran pureza (Eynard et al., 2020).

Por la vía del reciclaje pirometalúrgico, la chatarra de baterías NiCd es desmantelada y triturada para someterse a una destilación al vacío en celdas rotatorias a temperaturas de entre 850 °C y 900 °C. Esta es la base de procesos industriales como INMETCO, SAB-NIFE o SNAM-SAVAN (Eynard et al., 2020).

Debido al bajo punto de ebullición del cadmio, este se volatiliza de forma selectiva y se condensa en un baño cerrado con purezas superiores al 99.95%, dejando estables las aleaciones de níquel y cobalto en el residuo de horno (Eynard et al., 2020).

II.9.D *Arsénico*

Esencial en forma de arseniuro de galio (GaAs) para dispositivos optoelectrónicos rápidos y celdas solares espaciales, el arsénico es un elemento altamente tóxico controlado estrictamente por normativas laborales (en la UE se aplican límites de exposición muy garantistas).

El arsénico se obtiene como subproducto del tostado oxidativo de concentrados polimetálicos de cobre o de arsenopirita de oro (FeAsS) (Eynard et al., 2020).

Para obtener el metal comercial crudo, el trióxido de arsénico gaseoso ($As2O_3$) es arrastrado de las chimeneas de los hornos, condensado y posteriormente reducido térmicamente mezclándolo con coque o polvo de hierro en autoclaves cilíndricos horizontales calentados a más de 700 °C en ausencia de aire. El

arsénico metálico sublima y se condensa sobre colectores fríos. Para obtener el grado ultrapuro semiconductor (>99.99999%, 7N), se sintetiza tricloruro de arsénico (AsCl3), el cual se somete a múltiples destilaciones fraccionadas de precisión química y luego se reduce en corriente purificada de hidrógeno gaseoso (Eynard et al., 2020).

II.9.E *Antimonio*

El antimonio es un componente crítico en aleaciones de plomo para baterías y retardantes de llama en plásticos (Eynard et al., 2020).

La mena de estibina (sulfuro de antimonio, Sb2S3) se beneficia físicamente mediante molienda y flotación por espumas utilizando colectores típicos para sulfuros, como el butil xantato potásico (Segura-Salazar y Brito-Parada, 2021). El concentrado de estibina se somete a tostación oxidante en hornos rotatorios a 1100-1200 °C para convertir el Sb2S3 en óxido de antimonio gaseoso (Sb2O3) condensable (Moosavi-Khoonsari et al., 2022).

Si la estibina posee leyes significativas de oro (Au), el mineral se funde en hornos altos con adición de coque y caliza, donde más del 90% del antimonio se volatiliza en forma de Sb_2O_3 y el residuo de fundición metálico de Sb líquido actúa como colector galvánico del oro. Posteriormente, la aleación Au-Sb resultante se somete a oxidación por soplado y tratamientos de lixiviación ácida con cloro gaseoso para separar de forma nítida ambos metales (Moosavi-Khoonsari et al., 2022).

II.9.F *Germanio*

Este elemento es fundamental para fibra óptica, paneles solares espaciales y lentes de visión nocturna por infrarrojos (Eynard et al., 2020). No aparece de forma libre y se recupera a bajas concentraciones como subproducto del procesamiento de esfalerita de zinc o de las cenizas volantes de calderas de carbón lignito (Curtolo et al., 2017).

El concentrado final crudo obtenido (ley de entre 0.5% y 6% Ge) se somete a una cloración ácida en reactores cerrados para obtener tetracloruro de germanio ($GeCl_4$), un líquido volátil con punto de ebullición de 84 °C. El $GeCl_4$ se purifica rigurosamente mediante destilaciones fraccionadas de alta precisión química, se hidroliza con agua pura para obtener dióxido de germanio sólido (GeO_2) y finalmente se reduce con hidrógeno gas en corriente controlada para obtener lingotes de germanio metálico puro, refinados finalmente mediante fusión por zonas (*zone refining*) para aplicaciones semiconductoras de alta frecuencia (Curtolo et al., 2017).

III. CONCLUSIONES

La descarbonización de la economía global y el desarrollo tecnológico no son procesos desmaterializados; por el contrario, exigen una movilización de recursos minerales sin precedentes históricos (JRC, 2023). Sin duda, este fuerte crecimiento de la demanda va a fomentar en la UE en general, y en España en particular, la exploración y la explotación de recursos endógenos, que deberá hacerse asegurando el empleo de las mejores técnicas disponibles.

Sin embargo, esta aparente nueva era minera no puede quedar solo en eso, ya que se alumbra bajo el compromiso del apalancamiento de las cadenas de valor. El éxito estratégico de la UE frente a los retos de la transición energética y de la seguridad de suministro depende de su capacidad para monitorizar y optimizar de forma integral sus cadenas de valor; para ello, se precisa del adecuado acompañamiento, mediante la definición de políticas de desarrollo industrial aguas abajo, que permita la consecución paulatina de un mayor grado de soberanía productiva, tanto a nivel de la UE como a nivel de cada estado.

Todo lo anterior debe integrar el paradigma de la economía circular, mediante el fomento del reciclaje funcional de residuos tecnológicos y el desarrollo de tecnologías metalúrgicas eficientes, como pilares indispensables para reducir la extrema dependencia externa que sufre el continente.

En este complejo marco geopolítico, España se erige como un actor clave y de relevancia estratégica para la autonomía de la Unión Europea, pudiendo destacarse los siguientes aspectos:

- Autosuficiencia en estroncio: España garantiza de manera exclusiva la autosuficiencia total de estroncio y celestina en la UE (cubriendo el 100% de la demanda interna).
- Magnesita: El país aporta más del 23% de la magnesita primaria europea, sosteniendo aplicaciones críticas para la siderurgia y la agricultura.
- La reactivación de proyectos y explotaciones de metales refractarios como el wolframio en Barruecopardo y el tantalio en Penouta sitúan a la península como pionera en el desarrollo minero moderno bajo los estrictos estándares ambientales y de trazabilidad de la UE.
- Aportación de Asturias: Asturias aporta de forma directa a esta soberanía mineral con las operaciones mineras que producen fluorita (MINERSA) y cobre (El Valle-Boinás), así como con activos industriales metalúrgicos de referencia global como el procesamiento de zinc en San Juan de Nieva.

Para consolidar esta posición estratégica, resulta imperativo coordinar políticas ágiles de tramitación administrativa y ambiental que, fundamentadas en el rigor científico de los análisis de compatibilidad de los territorios, permitan desbloquear el potencial geológico del país de manera justa, sostenible y socialmente aceptada.

REFERENCIAS

Aasly, K. (2008). Properties and characterization of quartz for silicon metal production. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology. Disponible en: https://www.nb.no/maken/item/URN:NBN:no-nb_digibok_2020110407647

Abkhoshk, E., Jorjani, E., Al-Harahsheh, M.S., Rashchi, F., Naazeri, M. (2014). Review of the hydrometallurgical processing of non-sulfide zinc ores, Hydrometallurgy 149, 153-167. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.08.001

Achzet, B., Reller, A., Zepf, V., Rennie, C., Ashfield, M., & Simmons, J. (2011). Materials critical to the energy industry. An introduction. BP p.l.c., London.

AZSA (2026) Centro de Producción de San Juan de Nieva. Disponible en https://www.azsa.es

Bian, R., Su, T., Chen, Y., Qu, Z., Zhu, S., Tian, X., Huo, Y. (2020). Recycling of High-Purity Strontianite and Hematite from Strontium-Bearing Sludge. ACS Omega, 5(23), 14078−14085. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01539.

Bollero, A., Rial, J., Villanueva, M., Golasinski, K.M., Seoane, A., Almunia, J. y Altimira, R. (2017). Recycling of Strontium Ferrite Waste in a Permanent

Magnet Manufacturing Plant. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 5(4), 3243–3249. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b03053.

Bourgeois, F., Andreiadis, E., Lambert, J. (2017). Tantalum and Niobium Production State of the Art. SCRREEN2 Project Report, European Commission. Disponible en: https://cordis.europa.eu/project/id/958211

Chen, W., Zhu, Y. (2000). Preparation of strontium carbonate from celestite. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section C, 109(1), 1-5. https://doi.org/10.1179/mpm.2000.109.1.1

Chen, Y., Huo, G., Guo, X., Chen, J. (2025). A review of flowsheets for tungsten recovery from scheelite, wolframite and secondary resources and challenges for sustainable production, Hydrometallurgy 234, 106455. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2025.106455

Curtolo, S. et al. (2017). Simplified flowsheet of ultra-pure metallic germanium production. H2020 Project SCRREEN Factsheets.

EMT (2026) Energy Transition Minerals, Proyecto Penouta. Disponible en: https://etransmin.com/projects/penouta-tin-tantalum-niobium/

EURARE (2017), FP7 Project. Disponible en https://cordis.europa.eu/project/id/309373/reporting/es

Euromines. (2025). *Magnesia Industry Study*. Disponible en: https://euromines.org/wp-content/uploads/2025/10/Euromines-Magnesia-Industry-Study.pdf

Eynard, U. et al. (2020). *Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020)*: Factsheets on Critical Raw Materials. European Commission. Disponible en: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c0d5292a-ee54-11ea-991b-01aa75ed71a1/language-en

Ghaedi, H., Serrano Araya, C., Kalhor, P., Dawson-Jones, C., Ferrari, E., Munshi, T., Scowen, I., Ghorbani, Y. (2026). Selective lithium extraction from clay minerals using a super acidic urea–methanesulfonic acid deep eutectic solvent, Separation and Purification Technology 391, 137148. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2026.137148.

Gibbons, W, Moreno T. (2002). The Geology of Spain. Geological Society of London.

Habashi, F. (1997). Zinc. En F. Habashi (Ed.), Handbook of Extractive Metallurgy (Vol. 2, pp. 641-682). Wiley-VCH

Habashi, F. (2005) A short history of hydrometallurgy. Hydrometallurgy, 79 (1–2), 15-22. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.05.002

ICSG (2025) *The World Copper Factbook 2025*. Disponible en: https://icsg.org/copper-factbook/

IEA (2024). *Recycling of Critical Minerals*, disponible en https://www.iea.org/reports/recycling-of-critical-minerals

IEA (2025) *Global Critical Minerals Outlook 2025*, disponible en https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025

IEA (2026) *Global Critical Minerals Outlook 2026*, disponible en https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2026

IGME (2017). *Panorama Minero 2017*. Disponible en: https://web.igme.es/PanoramaMinero/Historico/2017/PANORAMA_MINERO_2017(BU24)(BR).pdf

Infinity Lithium (2018). *San Jose lithium deposit feasibility study. Cáceres, España*. Disponible en https://www.infinitymet.com/project/

JRC (2017a). *Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials*. Disponible en: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC106997/kjna28654enn.pdf

JRC (2017b). *Critical raw materials and the circular economy*. Disponible en https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC108710.

JRC (2021). *Material System Analysis of Nine Raw Materials: Barytes, Bismuth, Hafnium, Helium, Natural Rubber, Phosphorus, Scandium, Tantalum and Vanadium*. Disponible en https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125101.

JRC (2023). *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study*. Disponible en: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC132889

Kandelium Minerales (2026) disponible en https://www.kandelium.com/es/

Kramer, D. A., (2001) *Magnesium, its alloys and compounds*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2001-341, 29 p., https://doi.org/10.3133/ofr01341.

Kramer, D. A., (2012), Magnesium compounds: Mining Engineering, v. 64 (6), p. 73-74.

Lossin, A. (2001). Copper. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, (Ed.). https://doi.org/10.1002/14356007.a07_471

Machacek, E., Kalvig, P. (Eds.). (2017). *EURARE H2020 project: Development of a Sustainable Exploitation Scheme for Europe's Rare Earth Ore Deposits*. European REE market survey. Disponible en: https://www.eurare.org/docs/T1.1.2_Report-final-280217.pdf

Mateus, A., Lopes, C., Martins, L. y Gonçalves, M-A. (2021). Current and Foreseen Tungsten Production in Portugal, and the Need of Safeguarding the Access to Relevant Known Resources. Resources, 10: 64. https://doi.org/10.3390/resources10060064

Moosavi-Khoonsari, E. et al. (2022). A Review on Pyrometallurgical Extraction of Antimony from Primary Resources: Current Practices and Evolving Processes. Processes 10 (8), 1590. https://doi.org/10.3390/pr10081590

NPM (2025). Neo Performance Materials, Press release. Disponible en: https://www.neomaterials.com/

Obaya, M. (2025). El litio y las redes globales de producción: estructura, flujos y actores. En Chauvet et al. (Coords.), Litio, un recurso estratégico. CEPAL. Disponible en https://www.cepal.org/es/publicaciones/82939-litio-redes-globales-produccion-estructura-flujos-actores

Obut, A., Balaz, P. y Girgin, I. (2006). Direct mechanochemical conversion of celestite to SrCO3. Minerals Engineering, 19: 1185–1190. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.11.001.

Oh, J.-M.; Lee, B.-K.; Choi, G.-S.; Kim, H.-S.; Lim, J.-W. (2013). Preparation of ultrahigh purity cylindrical tantalum ingot by electron beam drip melting without sintering process. Mater. Sci. Technol., 29, 542–546, https://doi.org/10.1179/1743284712Y.0000000178

Orvana (2021). *Mineral Resources and Reserves Statement for El Valle Mine, Asturias, Spain. Canadian National Instrument NI 43-101* Technical Report. Disponible en https://www.orvana.com/English/operations/el-valle-boinscarls/reserves-resources/default.aspx

Optimore (2018), H2020 Project, información disponible en https://cordis.europa.eu/project/id/642201/results/es

Passarini, F., Ciacci L., Nuss P. y Manfredi S. (2018). *Material Flow Analysis of Aluminium, Copper, and Iron in the EU-28*. Publications Office of the European Union. Disponible en: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC111643

ReFraM (2017) H2020 Project. Más información en https://cordis.europa.eu/project/id/688993/results

Saloro (2026), disponible en https://www.saloro.com/barruecopardo/datos-clave/

Segura-Salazar, J., Brito-Parada, P.R., (2021) Stibnite froth flotation: A critical review. Minerals Engineering 163, 106713. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106713

SOLCRIMET (2021) H2020 project. Más información en: https://cordis.europa.eu/project/id/694078/reporting/es

Solvay. (2022). *Solvay to develop major hub for rare earth magnets in Europe*. Press Release. Disponible en https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-develop-major-hub-rare-earth-magnets-europe

Tercero Espinosa, L. (2015). *Critical Raw Materials Substitution Profiles*. Disponible en https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/466c61db-c2c1-4735-88e8-28af136ddea6

Terresis (2026) Terresis MAGNA, disponible en https://www.terresis.com/es/experiencia-minera/

Toledo, Á. E. (2025). Introducción a la minería del litio: desarrollo de proyectos y procesos productivos. En Chauvet et al. (Coords.), Litio, un recurso estratégico. CEPAL. Disponible en: https://www.cepal.org/es/publicaciones/82937-introduccion-la-mineria-litio-desarrollo-proyectos-procesos-productivos

Tribunal de Cuentas Europeo. (2026). *Special Report 2026-04: Critical Raw Materials for the Energy Transition*. Disponible online en https://www.eca.europa.eu/en/publications/SR-2026-04

UE (2008). *The raw materials initiative,* disponible en https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52008DC0699

UE (2024). *The Critical Raw Materials Act*. Disponible en http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj

UE (2025) Press Release, disponible en https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_25_864

USGS (2016) *Phosphate Rock*. Disponible en https://www.usgs.gov/media/files/phosphate-rock-2016-pdf

USGS (2025). About the 2025 List of Critical Minerals. Disponible en https://www.usgs.gov/programs/mineral-resources-program/science/about-2025-list-critical-minerals.

Vutova, K., Vassileva, V., Koleva, E., Munirathnam, N., Amalnerkar, D. P., & Tanaka, T. (2016). Investigation of Tantalum Recycling by Electron Beam Melting. Metals, 6(11), 287. https://doi.org/10.3390/met6110287

Wall, F. (2014). Rare Earth Elements. In G. Gunn (Ed.), Critical Metals Handbook. John Wiley & Sons.

Zhang, D., Li, Y., Cao, J. (2023). Efficient magnesium recovery from seawater desalination brine via CO2 mineralization to synthesize hydromagnesite for uranium extraction, Desalination 559,116629. https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116629

Zeiler, B. (2021). Recycling of tungsten: Current share, economic limitations, technologies and future potential. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 98, 105546. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105546.

La Geología como clave para entender el paisaje: el caso de Asturias

Montserrat Jiménez-Sánchez, Catedrática de Universidad
Departamento de Geología, Área de Geodinámica Externa de la Universidad de Oviedo,
c/Arias de Velasco, s/n, 33005 Oviedo

Resumen- **Asturias muestra un paisaje diverso, variado y espectacular, tanto de S a N (con un gradiente de altitudes que oscila entre 2.648 m, en el pico Torrecerredo, y el nivel del mar a menos de 30 km de la costa), como de E a O, donde la altitud de las montañas disminuye notablemente. ¿Qué es lo que explica esta gran diversidad? ¿La Geología tiene respuestas? En caso afirmativo, ¿La Geología puede ser una clave para entender el paisaje? Para contestar a esta cuestión, en este artículo se examina el papel de la Geología como respuesta a la configuración del paisaje. Para ello: 1) recordaremos brevemente la dinámica de la Tierra, a la luz de la Tectónica de Placas, en que los procesos geológicos internos crean el relieve y los procesos geológicos externos, más próximos al ser humano, lo van tallando y modelando; 2) examinaremos el caso de Asturias, lo que supone: a) acudir a la historia geológica más antigua de la región y remontarse a más de 300 millones de años, con formación de una gran variedad de rocas y de una cordillera antigua (cordillera varisca), cuyas huellas quedan aún patentes en el paisaje, b) recorrer otra historia más reciente, en que esas rocas, junto con otras más modernas, formaron parte del gran acontecimiento que dio lugar al relieve actual (orogenia alpina), definiendo las líneas maestras del paisaje asturiano y c) entender que posteriormente y en la actualidad, este relieve ha sido modelado y continúa siéndolo, por un variado conjunto de procesos, incluyendo fundamentalmente la acción de los ríos (acción fluvial), glaciares, la gravedad (distintos argayos), litorales (acción del mar) y kársticos, en distintas etapas, tanto pasadas, como presentes. En conclusión, la diversidad paisajística de Asturias puede explicarse por una gran variedad litológica, una historia geológica compleja, y un conjunto de procesos geológicos externos activos que, a su vez, son los que más interfieren con el ser humano en esta región. Y este "paisaje geológico" ha condicionado el devenir del pueblo asturiano y contribuye a explicar sin duda alguna por qué Asturias es así y no de otra manera.**

I. INTRODUCCIÓN

Para saber el papel de la Geología como clave para entender el paisaje, tenemos que acudir primeramente al paisaje terrestre a gran escala, para después llegar a Asturias y plantearnos algunos interrogantes. A lo largo de este artículo, iremos resolviéndolos.

I.1. DEL PAISAJE DE LA TIERRA AL PAISAJE DE ASTURIAS

Si contemplamos las imágenes tomadas de nuestro planeta Tierra desde el espacio, como la icónica canica azul o Blue Marble, tomada por la tripulación del Apolo 17 en 1972 (Figura 1), nos encontramos con el rostro de nuestro planeta, formado por los continentes (en este caso, África), los mares, la atmósfera con sus nubes y el hielo, especialmente patente en el continente antártico (NASA, 2020). A grandes rasgos, así percibimos el paisaje terrestre a gran escala, el paisaje del planeta que habitamos, que tiene una superficie de unos 510 millones de kilómetros cuadrados, de los cuales el 29% corresponde a las tierras emergidas (los continentes) y el 71% a los océanos. Y en el que, además, encontramos grandes diferencias en el relieve. Así, si pudiéramos alcanzar la máxima altitud del planeta, llegaríamos al Everest (cordillera de los Himalayas), con 8.848 m de altitud y si pudiéramos descender al punto más profundo del océano, llegaríamos al fondo de la fosa de las Marianas, a más de 11.000 m de profundidad.



Figura 1. Imagen de la Tierra (The Blue Marble) captada por la tripulación del Apolo 17. Créditos: NASA.

Sin embargo, el rostro de la Tierra, esto es, el paisaje terrestre que se divisa desde el espacio (y que ahora acostumbramos también a visualizar desde aplicaciones como Google Earth, https://earth.google.es/) es también un documento geológico: la posición actual de los continentes y de los mares resulta de una larga historia geológica que, desde hace casi 4600 millones de años, ha supuesto la formación de rocas, auténticos registros de

acontecimientos del pasado, la continua migración de las tierras emergidas y la apertura y cierre de los océanos, siempre a la luz de la Tectónica de Placas, en procesos que duran millones de años. Cuando dos placas tectónicas colisionan, se genera un proceso conocido como "orogenia", que conduce a la formación de cordilleras tan imponentes como los Himalayas, mientras que los procesos vinculados a la subducción de una placa con respecto a otra dan lugar a profundas fosas oceánicas a las que se pueden asociar arcos de islas, como las Marianas, explicando así las grandes diferencias en el relieve anteriormente mencionadas.

La Tierra puede ser contemplada como un gran registro de cambios globales, en continua transformación. Los procesos geológicos internos, basados en la energía del interior de la Tierra, se convierten en procesos generadores de relieve, destacando especialmente la creación de cordilleras y volcanes (y sin olvidar la importancia de los terremotos), mientras que los procesos geológicos externos, fundamentados en tres agentes básicos (agua, viento y gravedad), contribuyen a tallar y modelar el relieve generado por los procesos internos en un ciclo continuo de transferencia de material de unas zonas a otras de la superficie terrestre a lo largo de millones de años, teniendo como contexto global la Tectónica de Placas. Y esto sucede desde hace millones de años, a medida que los continentes han ido migrando de unos puntos a otros del planeta y transformándose.

Los procesos geológicos externos son estudiados dentro de la Geomorfología. Los procesos geomorfológicos vinculados a la acción de estos agentes en el ámbito continental son variados, destacando entre ellos los procesos fluviales, asociados a los ríos, principales escultores del relieve, aunque cabe señalar también la acción de los procesos de meteorización, gravitacionales, eólicos, nivales, glaciares y periglaciares, y en la línea de costa, los procesos litorales. El tipo de procesos que actúan en cada momento de la historia geológica y su eficacia van a depender de diferentes factores, incluyendo el tipo de rocas del sustrato (factor litológico), el grado de deformación de las mismas (factor tectónico y estructural), el tipo de clima (factor climático y paleoclimático) y el tiempo transcurrido (factor cronológico). En suma, la existencia de agua en nuestro planeta, la presencia de una atmósfera y la acción de la gravedad, el tipo de sustrato geológico, junto con el paso del tiempo a distintas escalas, condicionan la efectividad de los procesos geológicos externos que tallan el relieve creado por los procesos internos. A todo ello, tal vez haya que añadir, por su poder generador de cambios, un cuarto agente: el ser humano. Así, a medida que transcurre el tiempo, va evolucionando el relieve de la Tierra, y con ello, la diversidad de paisajes que podemos encontrar en su superficie. Estos paisajes constituyen elementos vivos que se van modificando de tal modo que los cambios que experimentan pueden ser percibidos no sólo a escala de millones de años o milenios, sino también de días, pues la Geología funciona a distintas velocidades.

Un ejemplo de región ideal para ilustrar la relación entre la Geología y el paisaje es Asturias. Asturias destaca por presentar una de las orografías más abruptas de la Península Ibérica, con un relieve cuya altitud desciende súbitamente desde las montañas del sur hasta el mar Cantábrico y con una gran variedad de rocas y una historia geológica singular, marcada por la combinación de procesos geológicos internos y externos, que han contribuido a la creación de un relieve con una gran diversidad paisajística, plagado de entornos que destacan por su belleza y singularidad.

En este trabajo describiremos cómo la Geología puede ser una clave para entender el paisaje. Para ello, primero veremos cómo es el relieve de Asturias y cuáles son los interrogantes que nos plantea su origen. Para encontrar las respuestas, tendremos que viajar hacia tiempos geológicos lejanos, retrocediendo millones de años atrás, lo que nos permitirá conocer el sustrato geológico de Asturias y cómo los procesos geológicos internos dieron lugar al relieve de la región. Posteriormente, iremos regresando al presente (pasando por el "casi presente", al menos en términos geológicos) para conocer cómo los procesos geológicos externos han modelado (y continúan modelando) el relieve actual. Finalmente, plantearemos algunas conclusiones que incluirán las respuestas a nuestros interrogantes y nos permitirán comprender que la Geología es una clave fundamental para entender el paisaje de Asturias, y con ello, por qué Asturias es así y no de otra manera.

I.2. EL RELIEVE DE ASTURIAS Y SUS INTERROGANTES: ¿LA GEOLOGÍA TIENE RESPUESTAS?

Dejando a un lado los paisajes de las zonas urbanas e industriales y contemplando el paisaje natural en su conjunto, usualmente lo percibimos como un elemento vivo, basándonos en su flora y en la fauna, o incluso en el agua de los lagos o de ríos y cascadas e incluso el mar. Sin embargo, en el paisaje de Asturias, nos llama también la atención la presencia de las rocas, testigos mudos del paisaje, que es lo que más asociamos a la Geología. Así, podemos encontrarnos con rocas carbonatadas, como las que apreciamos en los paisajes del oriente asturiano, o paisajes con rocas silíceas, o tal vez ver relieves de pendientes suaves, recubiertas de pradería, como sucede en la Cuenca Carbonífera Central y en zonas próximas (Figura 2).

Rocas, agua y flora y vegetación forman parte de los paisajes naturales de Asturias. Pero imaginemos que eliminamos todos estos elementos y nos quedamos solamente con el relieve, esa armazón que constituye "la arquitectura" del territorio y que a veces asimilamos al término "orografía". En realidad, el relieve es la esencia del paisaje y será en su configuración en la que nos centraremos para entender la relación entre Geología y Paisaje.

Y ahora, si mientras leemos este texto podemos hacer un zoom con la aplicación Google Earth, y nos aproximamos a observar las grandes montañas de Europa y Asia, yendo de Oeste a Este, observaremos una sucesión de cadenas montañosas que van desde el Himalaya a los Alpes y los Pirineos hasta llegar a la cordillera Cantábrica.

La cordillera Cantábrica es una cadena montañosa de 400 km de longitud que se extiende a lo largo del borde norte de la Península Ibérica desde los Pirineos hasta Galicia. Y es precisamente en el corazón de la cordillera Cantábrica donde se encuentra Asturias, con el relieve más accidentado de toda la cadena, constituyendo el Macizo asturiano (Figura 3). De este relieve tan singular se pueden destacar algunas cuestiones, que nos plantean interrogantes que podemos resolver desde la Geología. Para ello, tal vez debamos realizar observaciones extendiendo nuestra mirada hacia las vecinas comunidades autónomas, ya que el relieve no entiende de límites administrativos.



Figura 2. Paisajes de Asturias con diferentes sustratos geológicos que dan respuestas diferentes en el paisaje. A) Picos de Europa, con rocas carbonatadas (Créditos: D. Ballesteros Posada); B) Concejo de Caso (Casu) con sucesiones de lutitas y areniscas en primer plano como rocas predominantes (Créditos: J. M. Valderrábano); C) Rasa occidental de Asturias en el sector de Luarca y Cabo Busto, con cuarcitas como elemento principal.

Si miramos un mapa topográfico de Asturias o nuevamente realizamos un viaje virtual con Google Earth tanto de Este a Oeste, como de Sur a Norte, o bien miramos un modelo digital del terreno (Figura 4), veremos que Asturias presenta una orografía abrupta con grandes contrastes. En un territorio de unos 10.600 km^2 de superficie, se desarrolla un marcado gradiente altitudinal norte-sur, desde el litoral cantábrico hasta las divisorias montañosas meridionales que separan la región de la Meseta, lo que servirá de base para el planteamiento de nuestras observaciones e interrogantes.

En primer lugar, es en la zona sur de Asturias donde se alcanzan las mayores altitudes de la cordillera Cantábrica (Macizo asturiano), con una extensa área que supera los 1700 m de altitud y cumbres por encima de 2000 m, como por ejemplo el pico Cornón, con 2.188 m, Peña Ubiña, con 2.417 m, el Urriellu, con 2.519 m, pero es en el pico Torrecerredo donde se alcanza la mayor altitud: 2.648 m. Y también llama la atención la cercanía al mar de este conjunto de cumbres: menos de 30 km de distancia en línea recta separan el pico Torrecerredo del mar Cantábrico, lo que ilustra el fuerte gradiente de altitudes que existe en Asturias de sur a norte. Es también al sur de Asturias, y en su prolongación hacia Castilla y León y Cantabria, donde se encuentra la divisoria que separa los ríos cantábricos de los que vierten a la cuenca del Duero. Aquí cabría plantearse varios interrogantes: ¿Por qué está



Figura 3. Situación del Macizo asturiano en el ámbito general de la Cordillera Cantábrica.

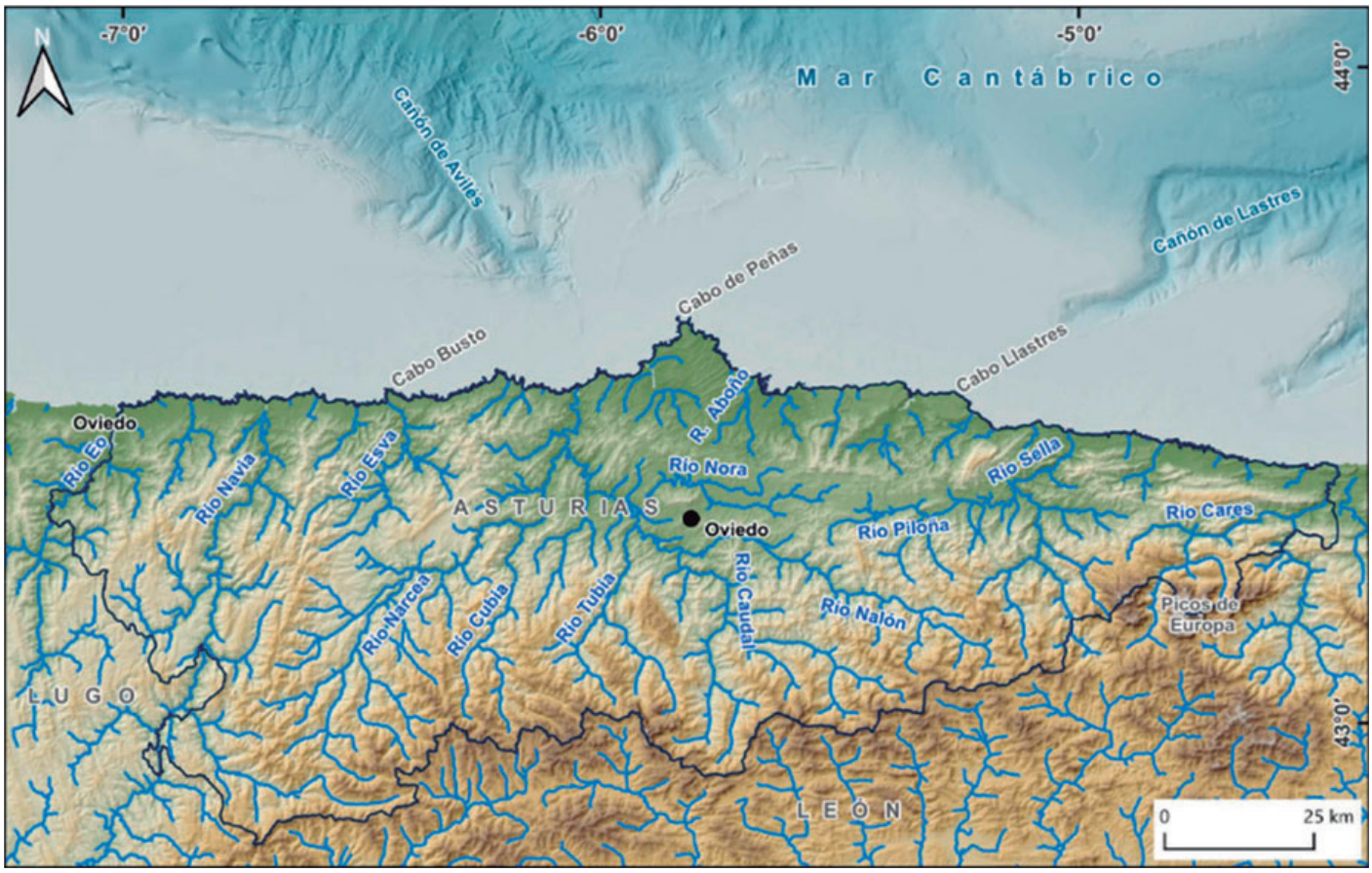


Figura 4. Modelo Digital del Terreno incorporando mapa batimétrico, mostrando los principales rasgos del relieve asturiano en tierra y bajo el mar Cantábrico.

en Asturias el relieve más alto de la cordillera Cantábrica y con ello buena parte de la divisoria principal de los ríos cantábricos? ¿Por qué existe este fuerte gradiente de altitudes? ¿Cuál es el origen de estas montañas? ¿Qué otras singularidades presenta el relieve de estas zonas altas?

En segundo lugar, y de modo general, los ríos asturianos, antes de alcanzar el mar Cantábrico, muestran una notable diversidad de orientaciones y sentidos de drenaje. Resulta curioso que no hayan seguido el camino más corto desde los elevados relieves que se localizan al sur, que es lo que cabría esperar de su trazado para partir de la Cordillera hacia el mar Cantábrico. ¿Cómo se puede explicar esta diversidad en el trazado fluvial? ¿Por qué los valles tienen estas orientaciones? ¿Cómo funcionan los ríos? ¿Y las laderas?

En tercer lugar, en el sector centro oriental de Asturias, resulta llamativa la existencia de un conjunto de sierras de orientación E-O, visibles fundamentalmente en el oriente de Asturias: son los relieves del Cuera y otras alineaciones montañosas que incluyen El Sueve y las sierras prelitorales localizadas al sureste del concejo de Gijón y al sur del de Villaviciosa (Alto de la Collada, Alto de la Campa entre otras). En contraste, al sur de estas existe una zona de relieve relativamente suave, que corresponde a la zona de Oviedo-Llanera-Infiesto, en la que destacan algunos relieves elevados como sucede con el Monte Naranco. Si los relieves principales están al sur, ¿a qué se debe la presencia de estas sierras en este sector nororiental de Asturias? ¿Y por qué existe una depresión de suave relieve al sur de ellas?

En cuarto lugar, resulta llamativa la existencia de un conjunto de zonas planas y elevadas que se disponen paralelamente a la costa del mar Cantábrico, pudiendo distinguirse diferentes niveles, unos separados de otros por laderas de alta pendiente: son las rasas cantábricas. De ellas, la superficie más cercana al mar se encuentra separada de este por acantilados, que a su vez definen una línea de costa recortada, en cuyos entrantes se sitúan playas, frecuentemente próximas a estuarios. ¿Cuál es el origen de estas rasas? ¿Por qué aparecen playas y acantilados? ¿Cómo funcionan? ¿Pero… y qué ocurre más al norte bajo el mar?

En quinto lugar, hay más rasgos del relieve de Asturias que pueden sorprendernos cuando nos acercamos a observar el paisaje a una escala más detallada… ¿Qué otras singularidades podemos encontrar? Pues existe un conjunto de rocas que, por sus especiales características, generan paisajes especiales. Se trata de las calizas, rocas capaces de disolverse bajo la acción del agua y de crear con ello, relieves peculiares (el karst), en los que el paisaje superficial es tan importante como el subterráneo, con lo que escapan a los estándares impuestos por el resto de las rocas existentes en Asturias y a su vez le confieren parte de su belleza y espectacularidad… ¿Cuál es la influencia del karst en el paisaje de Asturias?

Si resolvemos estos interrogantes, podremos entender el paisaje de Asturias, pues parte de las respuestas está en el propio paisaje, tratándolo como un documento geológico que iremos descifrando. Pero antes es necesario abordar dos cuestiones clave: 1) ¿Cómo se generó el relieve de Asturias en relación con los procesos geológicos internos? Y 2) ¿Cuál es la influencia de los procesos geológicos externos en el relieve de Asturias? Para contestarlas, es preciso realizar primero un viaje al pasado

geológico de nuestro territorio, para después reconducir nuestra historia hacia tiempos progresivamente más recientes y llegar a la actualidad. Y eso es lo que haremos en los siguientes apartados.

II. EL ORIGEN DEL RELIEVE DE ASTURIAS: UN VIAJE HACIA EL PLANETA TIERRA DE MILLONES DE AÑOS ATRÁS

El origen del relieve actual de Asturias debe ser buscado inicialmente en la historia geológica de la región. Esta historia va a determinar las peculiaridades del relieve actual de Asturias, aunque en principio, esto nos parezca imposible. Para conocer esta historia, debemos conocer primero el sustrato geológico, incluyendo la naturaleza de las rocas y su estructura. Luego conoceremos la historia de su deformación, resultante de la actuación de procesos geológicos internos, que, como veremos, guarda una profunda relación con el relieve.

II.1. EL SUSTRATO GEOLÓGICO DE ASTURIAS: UNA BASE PARA ENTENDER EL RELIEVE

De los casi 4600 millones de años del planeta Tierra, en Asturias se conserva un registro de aproximadamente 600 millones de años de antigüedad. Este registro está constituido por las rocas que forman el sustrato geológico de Asturias, rocas de variada naturaleza (incluyendo rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, siendo estas últimas las predominantes en la región), que tienen edades comprendidas entre el Precámbrico (Pérez-Estaún y Martínez, 1978; Rubio-Ordoñez *et al.,* 2015) y al menos el Paleógeno (Quintana *et al*. 2021), aunque también se han descrito formaciones arcillosas con mamíferos de edad pliocena (Llopis Lladó y Martínez Álvarez,1959). Sobre ellas se asientan otro tipo de materiales geológicos: las formaciones superficiales de edad cuaternaria, que resultan bien de la alteración de las rocas del sustrato in situ (mantos de meteorización y suelos), o bien de la erosión de las mismas y su sedimentación posterior por distintos procesos geológicos externos (ver por ejemplo Rodríguez-Rodríguez *et al*. 2018). Además, a lo largo de la historia geológica de Asturias, estas rocas han experimentado distintos episodios de deformación tectónicos, que son claves para entender el paisaje. Clásicamente, y en función de su historia geológica, el sustrato geológico de Asturias ha sido dividido en diferentes unidades (Figura 5 A).

Una mirada a los distintos mapas geológicos de Asturias (Figura 5 B) nos permite observar la distribución espacial de las distintas rocas asturianas y a las unidades geológicas en que se agrupan. Sin embargo, de acuerdo con su edad e historia geológica, y siguiendo a Bastida y Aller (1995), estas rocas pueden ser agrupadas en dos conjuntos: las rocas más antiguas de la región ("Asturias Varisca") y las rocas más modernas ("Asturias Alpina"). La denominación de estos dos conjuntos de rocas corresponde precisamente a las dos orogenias reconocidas en Asturias.

II.1.A. *Las rocas más antiguas de Asturias ("Asturias Varisca")*

El conjunto de rocas más antiguas de Asturias tiene edades que oscilan entre el Precámbrico y el Paleozoico pre-pérmico (aproximadamente entre 600 Ma y 290 Ma). Los afloramientos de estas rocas presentan trazados sinuosos, y se encuentran afectadas por pliegues y fallas. Esta secuencia de rocas se formó en medios sedimentarios marinos localizados a diversas profundidades. Su naturaleza es muy variada, y clásicamente, en

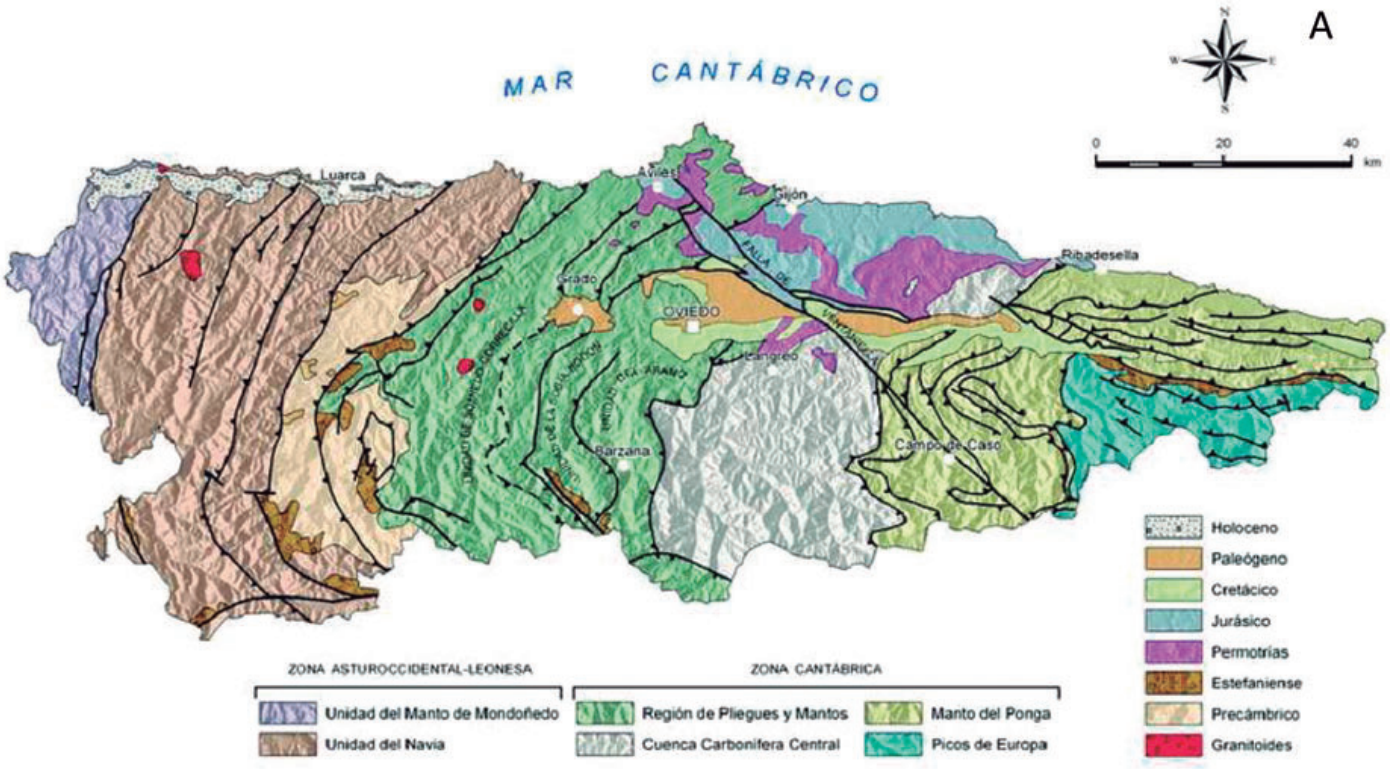


Figura 5A. Mapas que muestran la distribución espacial de los rasgos geológicos de Asturias: Zonificación geológica de Asturias basada en trabajos clásicos y actualizada por Gutiérrez-Claverol y García-Ramos (2016).

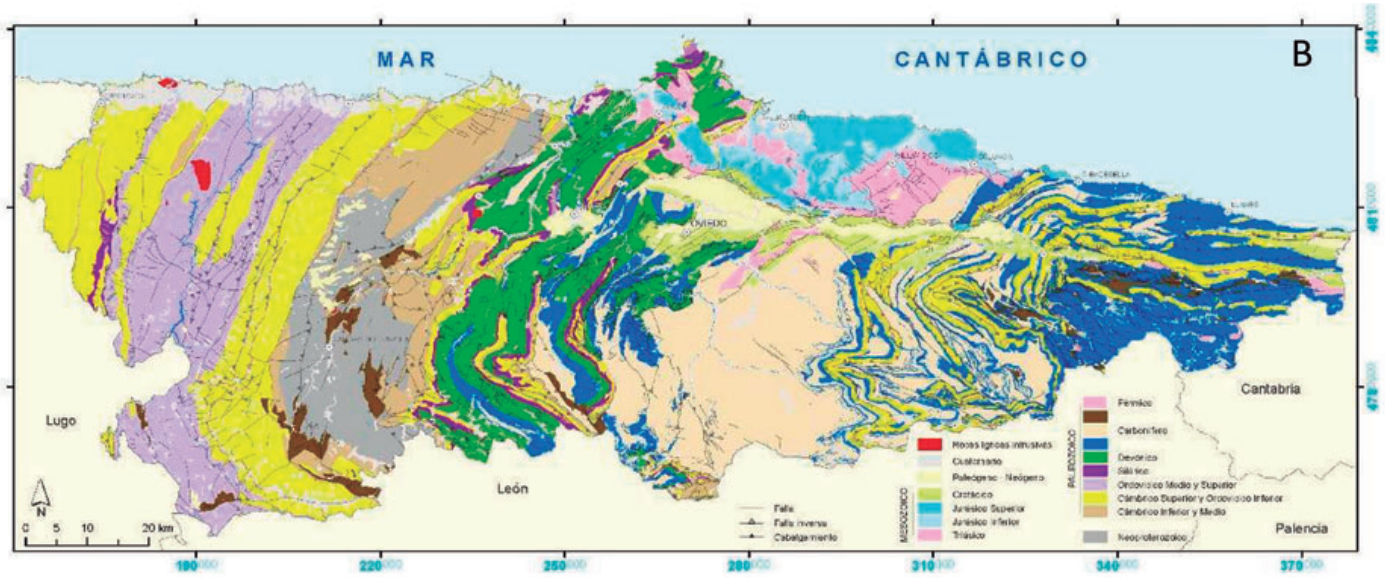


Figura 5B. Mapa geológico de Asturias (basado en GEODE, IGME-CSIC).

función de su historia geológica y otros criterios, se han agrupado en dos grandes zonas: la Zona Asturoccidental- Leonesa, al oeste y la Zona Cantábrica, al este. El límite entre estas dos zonas está marcado por el Antiforme del Narcea, una franja de rocas precámbricas de origen volcánico (las más antiguas de Asturias) cuyo extremo norte se sitúa en la localidad de Cudillero, para extenderse hacia el sur, pasando por los concejos de Tineo y Cangas del Narcea: se trata de las rocas más antiguas de Asturias y es en Navelgas y en Allande donde se encuentran las localidades de referencia para su datación (Rubio Ordóñez *et al*. 2015).

La Zona Asturoccidental-Leonesa, por encima del Precámbrico, presenta un sustrato geológico formado por rocas siliciclásticas, con presencia de areniscas, limolitas, pizarras y cuarcitas (aunque existen también algunos niveles de calizas), con edades que oscilan entre el Cámbrico y el Silúrico. Estas rocas están afectadas por abundantes pliegues, algunos de gran amplitud, así como por cabalgamientos. Además, en esta zona, las rocas están afectadas por un metamorfismo de bajo grado, existiendo también algunos granitoides y rocas subvolcánicas que se emplazan con posterioridad a la edad de las rocas sedimentarias (Suárez, 1995).

La Zona Cantábrica se encuentra formada por diferentes unidades, que han ido recibiendo diferentes nombres, aunque aquí se utilizará la denominación adoptada por Bastida y Aller (1995): de oeste a este, se pueden distinguir la Región de Pliegues y Mantos, la Cuenca Carbonífera Central, la Región de Mantos (o del Manto del Ponga) y la Unidad de los Picos de Europa, estando, además, fuera de los límites de Asturias, la Unidad del Pisuerga-Carrión. De modo general, las rocas que componen la Zona Cantábrica están constituidas por una alternancia de formaciones carbonatadas y siliciclásticas, pudiendo encontrarse areniscas, calizas, dolomías, cuarcitas y pizarras cuyas edades abarcan desde el Precámbrico hasta el Carbonífero, con distintas lagunas estratigráficas. Las rocas no aparecen de modo uniforme en las distintas unidades. Así, por ejemplo, en la Región de Pliegues y Mantos y en la Región del Ponga el sustrato es mixto, con representación de todos los tipos de rocas citados, mientras que en la Cuenca Carbonífera Central predominan las pizarras y areniscas, a la par que, en el oriente, la Unidad de los Picos de Europa está constituida fundamentalmente por calizas.

Todo este conjunto de rocas se vio involucrado en la colisión continental entre placas tectónicas que dio origen a la orogenia Varisca (entre unos 360 y 300 millones de años atrás), aunque todos los eventos tectónicos posteriores también les afectarían.

II.1.B. *Las rocas más modernas de Asturias ("Asturias Alpina")*

Las rocas más modernas de Asturias tienen edades pérmicas, mesozoicas y cenozoicas (aproximadamente entre 290 y 20 Ma), y aparecen en la parte norte de la zona central de Asturias, en un área que abarca el sector de Grado, Oviedo, Avilés, Gijón, Ribadesella y Piloña, volviendo a aflorar al este, ya en el límite con Cantabria. Si miramos un mapa geológico de Asturias, podremos observar que los afloramientos de estas rocas se presentan a modo de parches irregulares. Los estudios desarrollados sobre ellas muestran que su grado de deformación es menor que el de las rocas anteriormente citadas, aunque aparecen afectadas por distintas fallas que afectan a ambos conjuntos.

Este grupo de rocas está formado por lutitas y evaporitas de edad permotriásica, una sucesión jurásica con una parte inferior carbonatada y otra superior predominantemente siliciclástica, con sucesiones de pizarras y areniscas, y una secuencia de rocas cretácicas con una parte inferior siliciclástica y otra superior carbonatada. Estas rocas se habrían originado en diferentes ambientes, incluyendo medios marinos de diferentes profundidades (incluso medios costeros) y ambientes continentales (incluyendo medios fluviales y lacustres de diferente tipología). A ellas se superpone un conjunto de rocas siliciclásticas y carbonatadas de edad cenozoica, formadas predominantemente en cuencas lacustres.

II.1.C. *¿Cómo influyen las rocas en el paisaje?*

Como vemos, esta gran variedad de rocas se distribuye de modo desigual en el territorio, lo que obedece a su desigual historia geológica y la complejidad de la misma. Pero, siguiendo el criterio de otros autores (Farias y Marquínez, 1995), podemos

simplificar mucho la realidad y agrupar a grandes rasgos, las rocas, de acuerdo con su distribución geográfica (que realmente obedece a su historia geológica, al menos parcialmente). Así tendríamos tres conjuntos de rocas en tres zonas diferentes: 1) el occidente, donde predominan las rocas silíceas, principalmente pizarras y cuarcitas, afectadas por metamorfismo de bajo grado (Suárez, 1995); 2) la zona central, con un sustrato mixto compuesto por un variado conjunto de rocas sedimentarias (calizas, margas, areniscas, cuarcitas, lutitas, conglomerados, entre otras) y 3) la zona oriental, con un sustrato en el que predominan las calizas (Figura 2, Figura 5).

El comportamiento diferencial de las rocas de Asturias frente a la erosión es uno de los aspectos más importantes a considerar cuando explicamos la relación entre Geología y Paisaje. A fin de explicar de modo sencillo la influencia que tienen las rocas en el paisaje, podemos agruparlas según su respuesta frente a la erosión por los distintos procesos geológicos externos en tres grandes conjuntos litológicos: calizas, cuarcitas y conglomerados consolidados y lutitas, areniscas y pizarras.

Las calizas son rocas resistentes a la erosión, por lo que son capaces de generar laderas con altas pendientes, prácticamente verticales, pero tienen una peculiaridad: son rocas solubles, con lo que pueden erosionarse mediante procesos químicos, dando lugar a la generación de paisajes kársticos.

Las cuarcitas y conglomerados consolidados son rocas resistentes a la erosión, capaces de generar también escarpes, pero se erosionan principalmente por procesos mecánicos. Es frecuente ver en el paisaje de Asturias crestones formados por estas rocas.

Los conjuntos de lutitas, areniscas y pizarras agrupan a las rocas menos resistentes a la erosión, por lo cual se asocian a las pendientes más bajas del territorio y suelen aparecer en las zonas más bajas de los valles.

La efectividad de la actuación de los procesos geológicos externos sobre estas rocas va a estar controlada también por su grado de fracturación, que depende de su historia geológica: a mayor grado de fracturación tectónica, mayor será la efectividad de los procesos de erosión.

II.2. ¿CÓMO CREARON EL RELIEVE DE ASTURIAS LOS PROCESOS GEOLÓGICOS INTERNOS?

Las rocas tienen una historia larga y compleja, que varía para cada unidad geológica que consideremos. Inicialmente, los estratos de estas rocas tendrían una disposición aproximadamente horizontal. Pero luego, a medida que la posición de los continentes y de los mares fue variando a lo largo del tiempo geológico, estas rocas fueron deformadas, por lo que, en la mayor parte de ellas, los estratos no aparecen horizontales: la deformación de las rocas implica la formación de fallas y pliegues que modifican esta disposición original.

Realmente, esta parte de la historia es muy importante para entender el paisaje actual de Asturias, aunque hablemos de millones de años atrás. Y, al igual que las obras de teatro se dividen en distintos actos, aquí tendríamos al menos dos actos importantes para explicar la deformación de las rocas: dos orogenias, la orogenia Varisca y la orogenia Alpina, que habrían sucedido durante el largo viaje y transformación de los continentes terrestres conforme a las leyes de la deriva continental y la Tectónica de Placas (Figura 6).

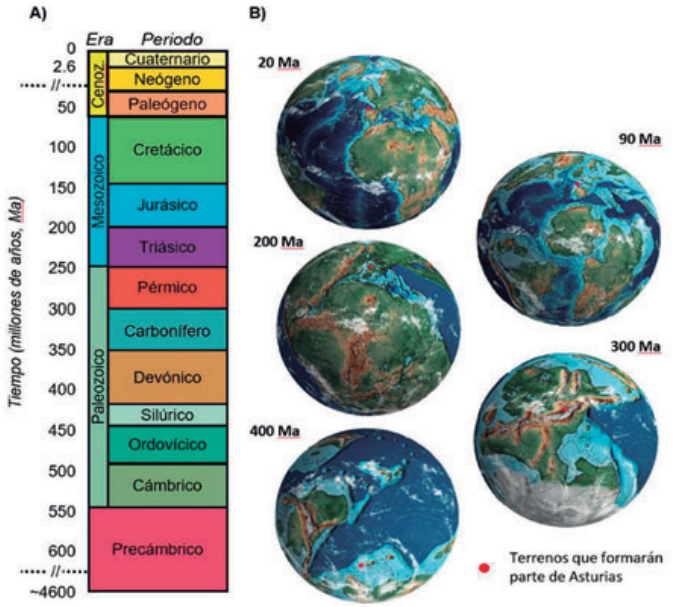


Figura 6. (A) Escala de tiempo geológico. (B) Reconstrucciones paleogeográficas mostrando la deriva de los continentes en distintos lapsos de tiempo, incluyendo las orogenias varisca (300 Ma) y alpina (20 Ma). Paleogeografías creadas por Ian Webster a partir del proyecto PALEOMAP de C.R. Scotese.

II.2.A. *La etapa más Antigua: la orogenia Varisca y su repercusión en el relieve (acto 1)*

La orogenia varisca fue un acontecimiento geológico de gran relevancia: hace unos 300 millones de años (Período Carbonífero), durante el largo viaje de los continentes en la historia de la Tierra, dos grandes masas continentales colisionaron dando lugar al supercontinente Pangea. En las zonas de contacto entre dichas masas continentales tuvo lugar una intensa deformación de las rocas y con ello, la formación de una gran cordillera, la cordillera varisca, de aproximadamente 8000 km de longitud y 1000 km de anchura (Matte, 2001), que habría alcanzado una altura de hasta 5000 m (Hillenbrand y Wiliams, 2022). Aunque decenas de millones de años después, esta cordillera quedó completamente arrasada por procesos de erosión, Asturias todavía cuenta con parte de sus vestigios en forma de estructuras geológicas (como pliegues y fallas) que los equipos geológicos, fundamentalmente de la Universidad de Oviedo han estudiado durante mucho tiempo.

Por qué la orogenia varisca es importante para explicar el paisaje de Asturias? Hay una cuestión trascendental: este evento condicionó la distribución geográfica de las rocas más antiguas de la región (Alonso et *al.*, 2007) que, como hemos visto brevemente, tienen diferentes respuestas frente a la erosión. Por ello, la gran multitud de sierras con trazado sinuoso que vemos en el relieve de Asturias obedece a pliegues que se formaron durante el transcurso de la orogenia varisca. De este modo, las rocas más resistentes aparecen en las zonas más elevadas, constituyendo las líneas de cresta de las principales alineaciones montañosas de Asturias, mientras que las rocas menos resistentes constituyen las zonas donde la erosión cobra mayor importancia y por ello aparecen por lo general en zonas más bajas. Un ejemplo

de pliegue visible actualmente en el paisaje es el sinclinal de la Barca, que afecta a la cuarcita de Barrios y está declarado como Lugar de Interés Geológico (Figura 7). Realmente es impresionante que acontecimientos tan antiguos en el tiempo dejen todavía su huella en el paisaje actual.



Figura 7. El sinclinal de la Barca es una estructura geológica de la orogenia varisca visible en el paisaje actual. Se aprecian las rocas de la Formación Cuarcita de Barrios "dobladas" por un pliegue en el que se instaló un río Narcea, hoy represado por el embalse de la Barca. Créditos: Luis Quintana Rodríguez. Es uno de los lugares de interés geológico de Asturias (LIG GA013, Sinclinal varisco de la Barca, https://info.igme.es/ielig/LIGInfo.aspx?codigo=CA013).

II.2.B. *La orogenia alpina: creación del relieve actual (acto 2)*

Pero la orogenia alpina, el gran evento geológico ocasionado por el choque de las placas Africana e Índica con la Eurasiática, fue el principal acontecimiento generador del relieve actual (Alonso *et al*. 1996, 2007). Se habría desarrollado principalmente entre el Cretácico superior y el Mioceno (hace entre 80-70 y 20-10 millones de años). Y aquí nos referimos al relieve de gran parte de las actuales montañas de la Tierra, en concreto, las que van desde Europa hasta el Himalaya y más allá. La cuestión que nos interesa especialmente para explicar el relieve de Asturias es que hubo una etapa de la historia de nuestro planeta, hace unos 70-80 millones de años, en que la superficie terrestre no sólo estaba dividida en grandes continentes, sino también en microcontinentes que funcionarían como microplacas tectónicas. Y una de esas microplacas era nada más y nada menos que la placa ibérica, la precursora de nuestra actual península ibérica. ¿Qué sucedió entonces? Pues que la microplaca ibérica, a modo de gran isla viajera, empujada por la placa africana, viajaría de sur a norte, para llegar a colisionar con la placa Eurasiática. Así, en la zona de impacto, y como consecuencia de un fenómeno de compresión S-N, las rocas se deformarían para dar lugar primero a la cordillera de los Pirineos, en la zona de colisión entre Iberia y Eurasia, y más tarde a las Béticas, en el límite meridional de Iberia, en colisión con África. La deformación en el límite norte, donde se elevaron los Pirineos, se transmitió hacia el oeste dando lugar a la cordillera Cantábrica (a modo de hermana de los Pirineos). Esto habría acontecido entre el Paleoceno tardío y el Mioceno medio-superior (~55 a 10–15 Ma), con un episodio de deformación principal durante el Eoceno–Oligoceno (Alonso *et al*., 1996).

Como consecuencia para el relieve de Asturias, se crearían diversos "edificios geológicos": un gran edificio de orientación E-O localizado en el sur de la región y otros edificios menores, localizados más al norte, que, a su vez, estarían separados por otras zonas de relieve más suave, entre las que destaca la cuenca de Oviedo-Llanera. ¿Por qué la orogenia alpina es importante para explicar el paisaje de Asturias? Algunas de las respuestas se detallan a continuación… aunque requieren contestar a nuevas preguntas.

El edificio geológico principal resultante de esta colisión está localizado al sur de Asturias. Su origen está en la elevación de las rocas preexistentes sobre la Meseta por una gran falla de dirección E-O, inclinada hacia el norte (cabalgamiento frontal), que habría generado un relieve montañoso hoy parcialmente erosionado y cuya estructura se representa en el corte geológico elaborado por Alonso *et al*. (1996, 2007) (Figura 8). La existencia de este bloque elevado es fundamental para explicar varias circunstancias peculiares del relieve asturiano. Lo más inmediato es que explica la línea maestra principal del relieve de Asturias: el gran relieve del sur y sus cumbres, y con ello, el gran contraste del relieve entre la Meseta y la cordillera Cantábrica. De hecho, es en este bloque elevado donde se encuentra la divisoria de aguas que separa los ríos que vierten al mar Cantábrico de los ríos que vierten hacia la cuenca del Duero. Por otra parte, la propia configuración de este bloque montañoso, con altitudes de hasta 2648 m (pico Torrecerredo), explica el gran desnivel que existe entre la costa y la línea de cumbres a distancias relativamente cortas (recordemos que el pico Torrecerredo se encuentra a menos de 30 km de la costa). Esta circunstancia, con un gran desnivel y una cercanía importante entre la cabecera de los ríos y el mar, ha propiciado que muchos de los cursos fluviales asturianos circulen preferentemente de sur a norte, y no siempre aprovechando la existencia de niveles de roca poco resistentes, aunque hay excepciones.

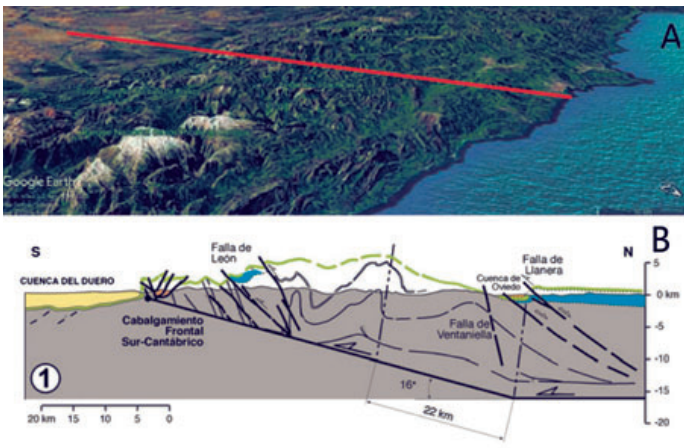


Figura 8. Corte geológico que explica la formación de las líneas maestras de la Cordillera Cantábrica, especialmente las montañas del sur de Asturias, hoy elevadas sobre la Meseta. A) Situación aproximada del corte en Google Earth (línea roja); B) Corte geológico de Alonso et al. (1996, 2007), mostrando la posición del cabalgamiento frontal sur-cantábrico, que elevó el bloque norte de la Cordillera Cantábrica sobre la Meseta.

¿Y qué sucedió con los demás "edificios geológicos" menores localizados hacia el norte? Al igual que se creó el gran cabalgamiento frontal localizado al sur, que separa Asturias

de la Meseta, hacia el norte de Asturias se crearon una serie de fallas inversas de orientación E-O, inclinadas hacia el N, lo que dio lugar a sierras de orientación E-O a modo de bloques discontinuos. Estas fracturas asociadas a la orogenia Alpina, nos explican la mayor parte de los relieves de las sierras prelitorales que existen en la región: sierra de Tineo, Monte Naranco, pico Fario-La Collá, Peña Careses, Alto de la Campa, sierras del Sueve y Cuera. Y también explican otra cuestión más: la aparición de un área deprimida al sur de este conjunto de bloques, en las que se acumularon sedimentos para dar lugar a una zona de suave relieve que va desde Grado hasta Infiesto-Cangas de Onís a través de Oviedo y Llanera: la depresión media o cuenca de Oviedo-Llanera. Un ejemplo de estas sierras elevadas por fallas es la Sierra del Monte Naranco (Figura 9).



Figura 9. Perspectiva de la sierra del Naranco, al Norte de Oviedo, un ejemplo de relieve elevado por fallas.

¿Y cuál es el impacto climático de los relieves alpinos en Asturias? Por una parte, la existencia del bloque elevado en la zona sur ha condicionado la disponibilidad de relieves con altitudes localizadas por encima de 1500 m, favorables a la acumulación del hielo, lo que ha posibilitado que, según los cambios climáticos naturales del planeta Tierra, en la zona se hayan podido implantar glaciares durante el Cuaternario. Asimismo, es esta elevación la que condiciona el clima imperante en Asturias. Asturias presenta un clima templado oceánico, con rasgos de transición hacia el interior. Está condicionado por la influencia termorreguladora del mar Cantábrico, las masas de aire húmedas y el efecto orográfico de la cordillera Cantábrica (Gobierno del Principado de Asturias, 2022; Chazarra Bernabé et al., 2024). La serie regional 1940–2017 muestra una temperatura media anual de 11,37 °C y una precipitación de 1.276,10 mm/año. La amplitud térmica ronda los 10 °C, con inviernos suaves y veranos frescos. Las medias anuales superan los 14 °C en localidades costeras, pero pueden ser casi 10 °C inferiores en la alta montaña. Las lluvias se reparten durante todo el año, aunque disminuyen en verano sin formar, en general, una estación seca. El relieve genera contrastes en la distribución de la precipitación: unos 1.000 mm/año en la costa y cotas bajas, entre 950 y 1.150 mm/año en las cuencas centrales, más de 1.450 mm/año en las zonas occidental y suroriental, y hasta 1.600 mm/año en sectores elevados del suroccidente (Gobierno del Principado de Asturias, 2022). Por lo tanto, el relieve provoca la retención de masas nubosas procedentes del norte y favorece el desarrollo de fenómenos de precipitación orográfica cuando las masas de aire húmedo se elevan. Un papel similar, aunque de menor envergadura, puede ser asignado a las distintas sierras elevadas que aparecen al norte de Asturias, que explican la gran nubosidad en áreas como el Cuera o el Sueve.

Y… ¿cuál es el impacto de la orogenia alpina en el relieve submarino del mar Cantábrico? En relación con la orogenia alpina, se generaron (o se reactivaron) fallas de orientación E-O, NO-SE y NE-SO. Una falla alpina de gran relevancia es la Falla de Ventaniella, que cruza la región con una orientación NO-SE. Su desplazamiento con ligera elevación del bloque norte permite explicar la topografía algo más elevada de su bloque nororiental y el trazado del río Nalón en su zona de cabecera (López-Fernández *et al*. 2020, Alonso *et al*. 2007, Jiménez-Sánchez, 1999). Pero, además, esta falla se continúa bajo el mar Cantábrico, lo que nos conduce a pensar que, como ya ha sido constatado por diversos autores, las consecuencias de la orogenia alpina no sólo son visibles en la zona continental emergida de Asturias, sino también en la prolongación de su costa hacia el N, bajo el mar Cantábrico. Esta no es una cuestión menor: aunque en nuestro paisaje terrestre superficial podemos visualizar y reconocer procesos y de formas de erosión que se instalan sobre el relieve montañoso creado durante la orogenia alpina, esta ha contribuido, además, a crear un paisaje submarino singular más allá de nuestro límite costero hacia el N (Figura 4). Así, bajo el mar, existe una zona plana, la plataforma continental, que, mar adentro, se continúa mediante una zona pendiente (talud) inclinada hacia el mar Cantábrico en el Golfo de Vizcaya, y aparece cortada por una importante depresión, a modo de gran valle submarino: es el Cañón de Avilés, en cuyas proximidades, hacia el oeste, continua la Falla de Ventaniella (López Fernández *et al*., 2018). Para entender el origen de este relieve submarino, tenemos que pensar que cuando se produjo el desplazamiento de la placa ibérica hacia el N, el microcontinente Iberia no sólo convergió con la placa Eurasiática en la zona continental, dando lugar a los Pirineos, sino también bajo el mar. Esto hizo que se formara una fosa oceánica al norte de lo que ahora es el fondo marino de la costa asturiana, obedeciendo aun proceso de subducción (Fernández-Viejo *et al*., 2000). En realidad, este es el momento en que Asturias se ha situado más próxima al límite de una placa tectónica en toda su historia (Pérez Estaún, 1995). Si bien este relieve no es visible en la superficie continental, sus huellas quedan bajo el mar…y al mismo tiempo, los efectos de su dinámica han tenido y tendrán repercusiones en el relieve de Asturias, ya que van a explicar, junto con otros fenómenos, la evolución de las rasas costeras, otro interrogante abierto, pese a las distintas respuestas que se han ido proporcionando desde la Ciencia y que se tratarán más tarde.

Una vez configurado este relieve tanto terrestre como submarino, el siguiente paso es continuar con lo que sucede en el paisaje que vemos, que es el que involucra al sector asturiano del margen continental de la cordillera Cantábrica.

III. PAISAJE Y GEOLOGÍA RECIENTE: VIAJANDO A LA ACTUALIDAD EN LA HISTORIA DEL PLANETA TIERRA

Una vez originados, por la acción de los procesos internos, los relieves montañosos derivados de la orogenia alpina, se habría instalado en la vertiente norte de la cordillera Cantábrica un conjunto de ríos que se irían estructurando en una red hidrográfica que condicionaría toda la configuración del relieve, erosionando materiales y transportándolos hacia el mar Cantábrico. Pero, además, este relieve habría ido experimentando diferentes cambios climáticos naturales, y como ya hemos

citado, tendría circunstancias adecuadas para la instalación de sistemas glaciares a altitudes favorables. Todavía no disponemos de secuencias completas de datos para ilustrar esta transición entre los tiempos marcados por la orogenia alpina y el período más reciente de la historia geológica: el Cuaternario (desde hace unos 2,58 Ma hasta ahora), marcado por una alternancia de 103 estadios isotópicos fríos y cálidos (Gibbard *et al*., 2010, Silva *et al*. 2017), pero sí disponemos de secuencias de datos apoyadas en evidencias geomorfológicas y geocronológicas que corresponden a este último período de la historia terrestre y que iremos viendo en posteriores apartados.

La red hidrográfica, en sus comienzos, estaría formada por cauces que circularían preferentemente de S a N, en función de la existencia de un relieve elevado al S de Asturias, pero estos cauces, en función de la heterogeneidad litológica del sustrato geológico y de la existencia de otras elevaciones montañosas localizadas al N, irían adaptándose al sustrato geológico de la región.

Llegando a este punto, hemos de considerar los principales procesos modeladores del relieve en los últimos tiempos (aunque no son los únicos). En este grupo se incluyen los procesos fluviales, de gravedad, kársticos, litorales y glaciares. A partir de estos procesos se genera un conjunto de formas en el paisaje, que son las que analizaremos en los siguientes apartados. Los factores que condicionan la efectividad de la actuación de estos procesos incluyen el clima (incluyendo el clima del pasado), el tipo de rocas del sustrato (comportamiento frente a la erosión), la estructura (que va a determinar la presencia de zonas de debilidad), la tectónica (que va a determinar las líneas maestras del relieve) y el tiempo transcurrido.

El hilo conductor que seguiremos serán los valles, con la acción de los ríos… y la fuerza de la gravedad en las laderas. Remontando los cursos fluviales aguas arriba, veremos que aún queda la huella de los antiguos glaciares en el paisaje. Y continuando el curso de los ríos hacia el mar, llegaremos a la costa asturiana, con todas sus peculiaridades que la diferencian de otras áreas. A todo ello escapan, como una especie de "verso suelto", las peculiaridades paisajísticas de las zonas donde existen calizas, rocas solubles que, independientemente de su situación, generan paisajes singulares, que tienen también su diversidad desde el norte hacia el sur de la cordillera Cantábrica en Asturias.

III.1. LA ACCIÓN DE LOS RÍOS Y SU HISTORIA

Un río es una corriente natural de agua encauzada que circula de modo continuo a lo largo del año realizando un importante conjunto de acciones de erosión, transporte y sedimentación. El predominio relativo de unas u otras acciones depende del grado de ajuste entre distintas variables, siendo las más importantes la pendiente del canal, el caudal y la carga que transporta el río. Asimismo, es preciso tener en cuenta la posición del nivel de base, esto es, el punto más bajo del curso fluvial, que, en el caso de los ríos asturianos, se localiza en el mar Cantábrico. A lo largo del tiempo, los ríos se van organizando en redes hidrográficas, y cada curso fluvial va a presentar distintas morfologías en su trazado, al igual que se van a ir originando distintas formas de erosión y de depósito.

III.1.A. *La red hidrográfica de Asturias: la herencia del trazado alpino*

Empecemos con los ríos, cuyo trazado está marcado por la orogenia alpina, que condiciona la circulación de los ríos de la Cordillera al Mar (Figura 4, Figura 10). Ineludiblemente, los ríos van esculpiendo el relieve… y con ello el paisaje. Todo lo demás depende de las rocas y su resistencia. Para entender la historia y la dinámica de los cursos fluviales, hemos de examinar, por una parte, las características de la red hidrográfica, que marca inevitablemente la posición de los valles, y, por otra parte, la evolución de estos, su dinámica y sus formas. Teóricamente, tras la elevación de la cordillera Cantábrica alpina, los ríos asturianos se encajarían con cierta rapidez, a finales del Paleógeno, y lo harían tratando de seguir el camino más corto, para llegar al mar Cantábrico hacia el norte, transformando la energía potencial de las aguas en energía cinética. Sin embargo, los ríos asturianos presentan orientaciones muy diversas, marcadas por el relieve de Asturias (Farias y Marquínez, 1995).

Si observamos la red hidrográfica de Asturias, como conjunto vertebrador del relieve, podremos distinguir cuatro grupos de cauces que guardan una relación fundamental con la geología y el relieve, que se sintetiza a continuación:

El primer grupo, incluye los ríos del occidente asturiano y astur-galaico, como el Eo, Porcía, Navia, Negro y Esva, que presentan orientaciones generales S-N aunque con variaciones locales, especialmente en cabeceras y tramos altos, como sucede en la cabecera del Navia, que adquiere un trazado O-E. Estos cursos fluviales aprovecharían la disposición de las rocas y las estructuras variscas, lo que explica el trazado de los cursos fluviales del Eo y del Navia (ambos con su nacimiento fuera de los límites del territorio asturiano) e incluso los cursos fluviales más cortos, como el Esva o el Negro, que no nacen en el eje de la cordillera.

El segundo grupo de ríos incluye la mayor parte de los ríos que nacen en el eje de la cordillera (principalmente cuenca del Nalón-Narcea) y fluyen hacia el mar Cantábrico con orientaciones variables S-N, SO-NE y SE-NO e incluso E-O. Son cauces que se encuentran con distintos obstáculos orográficos para llegar rápidamente al norte y desembocar en el mar Cantábrico. Así, por ejemplo, sierras como la de Tineo propiciaría que el río Narcea se desviara hacia el este para desembocar en el río Nalón. El río Nalón, en su cabecera, tampoco circularía de sur a norte, debido a existencia del bloque elevado por la falla de Ventaniella, sino que lo haría de SE a NO. Y la existencia de las sierras prelitorales y de la depresión media, territorio de suave relieve que va desde Grado hasta Piloña, favorecería que el río Nora se adaptara a una dirección de drenaje O-E, rodeando el Naranco por el norte, antes de desembocar en el río Nalón. Los tributarios del río Nalón, como el Caudal, tendrían su camino hacia el norte más sencillo, dado que aprovecharían la existencia de sustratos rocosos (principalmente alternancias de pizarras y areniscas) menos resistentes a la erosión. Todo esto no impide que, en determinadas zonas, los cursos fluviales tengan el poder erosivo suficiente para desarrollar foces y desfiladeros transversales a la disposición de los niveles geológicos resistentes marcada por la orogenia varisca.

El tercer grupo de ríos forman la cuenca del Sella y la del Cares-Deva, cuyas cabeceras están en parte en León, y en el

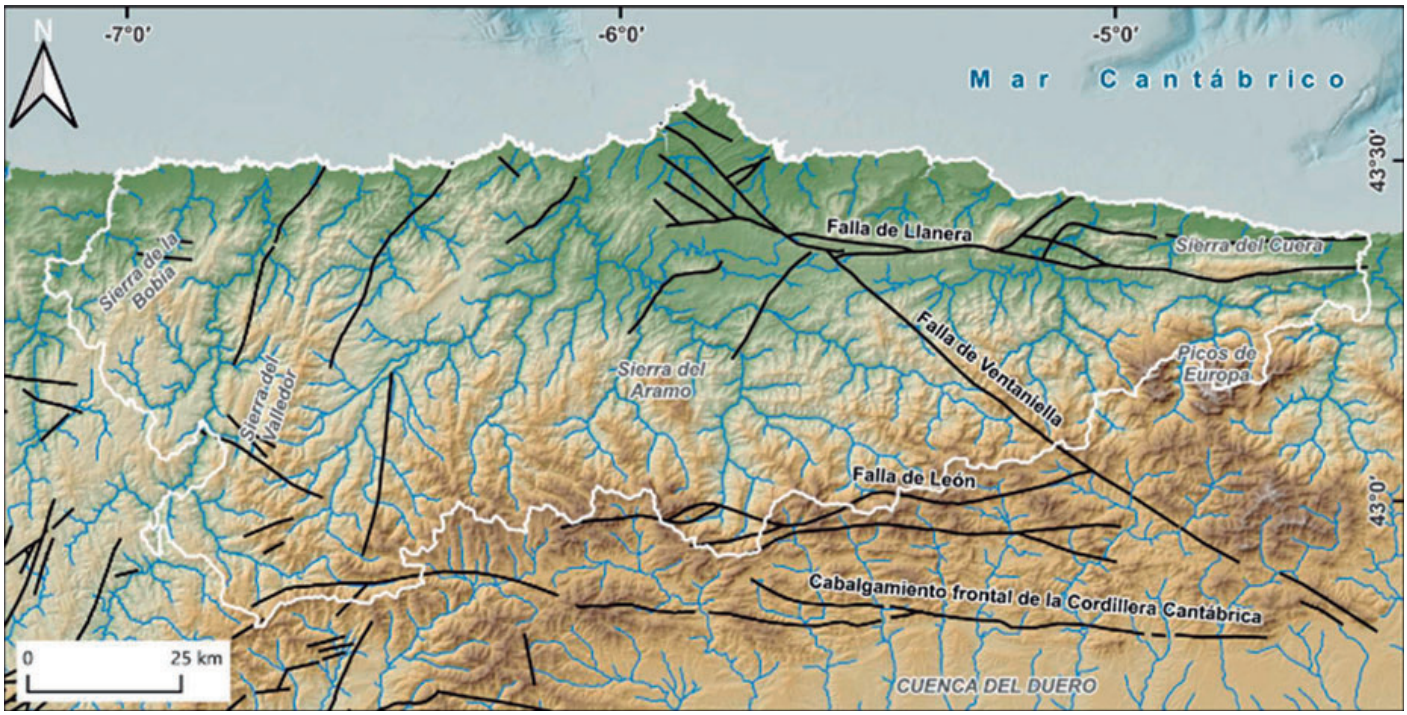


Figura 10. Relación entre el relieve de Asturias, la red hidrográfica y las principales fallas alpinas (líneas negras).

caso del Deva, en Cantabria. Aquí cabe señalar la alta capacidad erosiva de los cursos fluviales, propiciada por el gran desnivel de los Picos de Europa y su relativa cercanía a la costa. Por este motivo, ambos ríos circulan de S a N en cabecera, cortando transversalmente las estructuras variscas, pero luego modifican su trazado, pues el río Sella recibe a los ríos Piloña y Güeña cuyo trazado está condicionado por la existencia de la depresión media prelitoral de Asturias y las formaciones geológicas más recientes que la constituyen, para luego dirigirse hacia su desembocadura en la ría de Ribadesella con orientación final casi S-N. Respecto al río Cares, se destaca el cambio de circulación de S –N a O-E. La presencia de la Sierra del Cuera, constituida por calizas carboníferas muy resistentes, y con orientación E-O, conjuntamente con la existencia de una falla, impide que el río Cares siga circulando de S a N, por lo que finaliza su recorrido desembocando en el río Deva, que define el límite oriental de los Picos de Europa.

El cuarto grupo de ríos está constituido por cauces "litorales", que tienen su nacimiento muy cerca de la costa y cuyas cuencas apenas tienen tributarios y discurren de S a N. El origen de una parte de estos cauces está en las sierras prelitorales localizadas al suroeste de Gijón (La Collada, La Campa), el Sueve, las sierras del N de Cangas de Onís, asociadas a fallas (Alonso et al. 2007) y en la sierra del Cuera, pero existen otros cauces que se encajan en el borde litoral sin tener tributarios. Tal vez sean cauces asociados a zonas en las que el relieve costero continúa elevándose… y que, al mismo tiempo, compiten con la acción del mar Cantábrico, puesto que buena parte de ellos está asociada a zonas acantiladas en la costa.

III.1.B. *El funcionamiento de los ríos y las formas del paisaje fluvial*

Los cursos fluviales van ejerciendo una acción de erosión y sedimentación a lo largo de su historia. Puede ser que se encajen (o ralenticen su actividad) en el terreno siguiendo ritmos marcados por la geología del sustrato, el clima (con disponibilidad de agua y por tanto de caudal) y su nivel de base (marcado por variables diversas que lo van modificando a lo largo del tiempo).

En términos generales, la acción de los cursos fluviales está condicionada por la configuración del relieve. Recordemos la escasa distancia entre las cabeceras montañosas y el mar Cantábrico, donde los fuertes desniveles y la cercanía a la costa Cantábrica favorecen (salvo excepciones ya mencionadas), el desarrollo de cursos fluviales relativamente cortos, de elevada pendiente y notable capacidad erosiva. Como resultado, se generan los valles, a los que acompañan llanuras aluviales y terrazas. Todo esto va a condicionar la capacidad de los cursos fluviales para realizar una labor de incisión, con la creación de valles estrechos, con hoces (o foces, en bable), gargantas y desfiladeros, fundamentalmente en las áreas de cabecera fluvial, que se asocian a la circulación de los ríos a través de las rocas más resistentes (cuarcitas y calizas). En estos casos, los cauces fluviales suelen presentar un trazado recto o poco sinuoso (Figura 11).

Hay que señalar que los ríos no profundizan en su cauce de manera uniforme, sino que alternan fases de encajamiento, estabilidad y acumulación de sedimentos. Así, en las zonas más bajas de los valles, podemos observar como testigos geológicos llanuras aluviales (zonas de vega), zonas planas que evidencian el trabajo de los ríos y que se han formado a medida que abandonan los sedimentos que transportaban, debido a la disminución de la energía de la corriente fluvial. Habitualmente, las llanuras aluviales van aumentando su anchura hacia las zonas bajas de los cursos fluviales, como sucede por ejemplo con los ríos Nalón y Narcea, siendo aquí donde tienen un trazado meandriforme (Figura 12). Cuando observamos estas evidencias en las zonas más elevadas de los cursos fluviales, estas llanuras se forman por la existencia de obstáculos, cuya presencia puede retardar el camino del curso fluvial hacia el mar. Dichos obstáculos están



Figura 11. Ejemplos de distintos valles en Asturias. A) Foz en el río Caleao, en rocas calizas, con su llanura aluvial en primer plano; B) Desfiladero del río Alba, atravesando cuarcitas; C) Marmitas de gigante (pozas), río Alba. (Parque Natural de Redes)



Figura 12. Confluencia de los ríos Nalón y Narcea, mostrando sus llanuras aluviales (zonas de vega). Fotografía tomada en 2004 desde avión.



Figura 13. Terraza aluvial en el río Narcea, en las proximidades del monasterio de Cornellana, colgada a unos 40 m por encima de la llanura aluvial actual (marcada con una flecha). Sobre la terraza está la población de Sobrerriba (Suburriba). Fotografía previa a la construcción de la autovía A-63. Fotografía: Luis Quintana Rodríguez.

en relación con la presencia de movimientos en masa desde las laderas, que impiden el drenaje por parte del curso fluvial, o con la presencia de niveles de rocas resistentes, que requieren un trabajo más exigente del río antes de proseguir su camino hacia el mar Cantábrico. Es el caso de las llanuras aluviales desarrolladas en los cursos fluviales en las zonas de media-alta montaña.

Si seguimos viajando por los cursos fluviales y reconociendo la huella de su paso en el relieve, también encontraremos terrazas, antiguas llanuras aluviales, hoy colgadas sobre el fondo del valle actual debido al encajamiento de los ríos. Su origen está en la existencia de etapas de incisión fluvial: debido a un descenso relativo en el nivel de base (el mar Cantábrico), el río se encaja, dejando abandonada su antigua llanura alluvial (Figura 13). Esto es muy importante para reconstruir la evolución temporal de los ríos, ya que las terrazas fluviales pueden ser datadas por distintos métodos y a partir de estos resultados podemos saber cuál es la velocidad a la que se encajan los ríos en el relieve. De hecho, las terrazas fluviales descritas en Asturias se sitúan a diferentes alturas sobre los cauces actuales y constituyen uno de los principales registros de la incisión cuaternaria de los ríos. Más allá de su distribución espacial, se han reconocido terrazas situadas entre al menos 3 y 90 m sobre los cauces actuales (Jiménez-Sánchez, 1999; Ruiz-Fernández y Poblete Piedrabuena, 2011; Fernández *et al*., 2025). Las edades obtenidas mediante dataciones con carbono 14 (Ruiz Fernández y Poblete Piedrabuena, 2011) y OSL (Fernández *et al*. 2025) proporcionan edades que ocupan un rango de entre aproximadamente 9.000 y 135.000 años de antigüedad para estos depósitos. La mayor parte de estos datos, permiten estimar que cada mil años, un cauce fluvial es capaz de encajarse en su cauce entre 0,17 y 0,65 m. Esta estimación debe entenderse como un orden de magnitud, no como una velocidad constante de excavación, pues, como hemos visto, los ríos alterrnan etapas de erosion y sedimentación, pero nos ayuda a comprender que la historia de la formación de un valle puede llevar mucho tiempo: para que un río profundice 100 m en su cauce harían falta respectivamente entre 600.000 y 150.000 años.

III.1.C. *La dinámica actual de los ríos de Asturias*

Por lo general, los ríos asturianos presentan una dinámica propia de las cuencas cantábricas, caracterizada por recorridos relativamente cortos, fuertes pendientes y una rápida respuesta hidrológica ante episodios de lluvia. La cuenca más extensa es la del sistema Nalón-Narcea, con más de 4.900 km^2 de superficie, lo que

la convierte en la principal unidad hidrográfica de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental (CHC. , s. f.a.).

El régimen dominante es pluvial oceánico, lo que significa que el caudal es mayor en otoño-invierno y primavera, y menor durante el verano, época de estiaje. No obstante, en las cabeceras de montaña (como las del Nalón, Narcea, Sella, Cares-Deva o algunos afluentes de Somiedo y Picos de Europa) aparece una influencia pluvio-nival. En estos casos, la fusión de la nieve puede incrementar los caudales primaverales o agravar las avenidas cuando el deshielo coincide con precipitaciones intensas.

Los caudales medios anuales varían notablemente entre unos cursos y otros. En el Bajo Nalón, tras la confluencia con el Narcea, se alcanzan valores próximos a 119 m^3/s, aunque durante la avenida de junio de 2010 se estimaron unos 3.100 m^3/s en Pravia (CampoMORFOS, 2025). Otros ríos importantes son el Navia, con 62,85 m^3/s, el Sella, con 18,07 m^3/s, el Eo, con unos 19 m^3/s, el Esva, con unos 10,4 m^3/s, y el sistema Deva-Cares, con valores próximos a 29 m^3/s (MITECO, s. f.).

Considerando las abundantes lluvias y la alta pendiente de los ríos, las avenidas son frecuentes. Cuando se supera la capacidad del curso fluvial, se producen inundaciones, que se concentran especialmente en vegas, confluencias de ríos, y tramos bajos del curso fluvial, como sucede con el Bajo Nalón, Sella-Piloña, Nora-Noreña, Esva, Eo y Deva-Cares. En Asturias se identifican 76 Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación, lo que confirma que se trata de un proceso natural recurrente, agravado por la ocupación humana de las llanuras aluviales (MITECO, 2024). Esto nos da una idea de la gran importancia de la interacción entre el ser humano y los cursos fluviales en Asturias.

III.2. LA HUELLA GLACIAR EN EL PAISAJE DE ASTURIAS

Como hemos visto, tras su elevación, la cordillera Cantábrica comenzó a ser desmantelada por diversos agentes erosivos, existiendo una parte de su historia que no conocemos. Así, al relieve alpino se superpone una red de drenaje de trazado predominantemente S-N, a NO-SE, en consonancia con la pendiente regional y las líneas de debilidad del sustrato. En las cabeceras de estos cursos fluviales, se conservan evidencias del paso de glaciares durante la parte final de la historia del Pleistoceno, que en conjunto llegaron a ocupar 3150 km2, constituyendo un conjunto de casquetes glaciares de montaña, cuyas lenguas vertían hacia el N y hacia el S (Figura 14) mostrando un desarrollo asimétrico (Rodríguez-Rodríguez et al., 2015). Así, en algún momento de su historia, el paisaje de Asturias guardaría similitudes con paisajes como el de los Alpes.

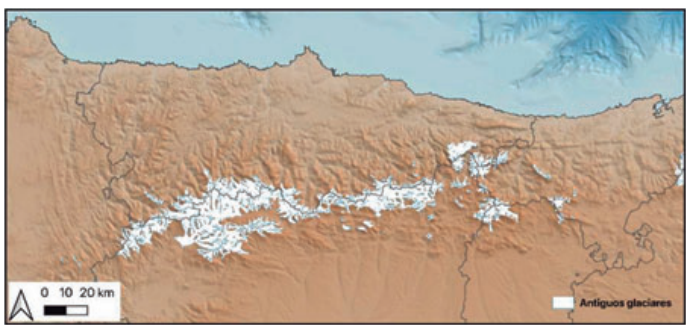


Figura 14. Reconstrucción de la máxima extensión alcanzada por los glaciares en las zonas altas de la cordillera Cantábrica (basado en Rodríguez-Rodríguez et al., 2015).

Parte de estos glaciares de montaña recubrieron las elevaciones montañosas del Sur de Asturias, que han sido estudiados en numerosos trabajos sintetizados en revisiones como las de Jiménez Sánchez *et al*. (2013) y Rodríguez-Rodríguez *et al*. (2015). Existen magníficos ejemplos de sus evidencias, destacando espacios protegidos que ostentan la categoría de Reservas de la Biosfera, como son los parques naturales de Somiedo, Las Ubiñas-La Mesa, Redes y el Parque Nacional de los Picos de Europa (Menéndez y Marquínez, 1996, Ruiz-Fernández *et al*., 2022a, 2022b, Jiménez-Sánchez *et al*. 2022). Estas dos últimas zonas poseen registros geomorfológicos y geocronológicos singulares (Jiménez-Sánchez, 2021), conocidos a nivel nacional e internacional desde el punto de vista científico, que han permitido documentar cómo fue el paso del hielo en Asturias, por lo que se hablará de ellas con posterioridad.

III.2. A. *¿Qué huellas deja el hielo glaciar en el paisaje?*

El hielo glaciar es un importante agente modelador del relieve de la zona en la que se encuentra, dando lugar a un variado conjunto de formas que pueden ser utilizadas para reconstruir el paso de los antiguos glaciares por las montañas. Los estudios geomorfológicos tienen en cuenta la respuesta del sustrato geológico a la acción del hielo, que se traduce en la generación de distintas formas en el paisaje, tanto de erosión como de depósito. Asociadas a ellas, existen otras formas, derivadas de la acción del agua proveniente de la fusión del hielo glaciar. A continuación, comentaremos algunas que nos pueden resultar útiles para comprender la huella que el paso de los glaciares dejó en el paisaje de Asturias.

Entre las formas de erosión, destacan los circos glaciares, depresiones excavadas por el hielo, que proporcionan la geometría de las áreas de alimentación de los glaciares; los valles con secciones en forma parabólica o en U son otros indicadores de la acción erosiva del hielo, siendo importantes para definir la geometría y extensión del hielo glaciar (Figura 15). En las zonas donde se intensifica la acción erosiva del hielo, se pueden formar cubetas de sobreexcavación glaciar, a menudo ocupadas por lagos en la actualidad. Entre las formas de depósito destacan las morrenas, acumulaciones de depósitos abandonados por el hielo, que tienen una morfología en cresta. Las secuencias de morrenas laterales, junto con los valles glaciares, definirán los límites del hielo glaciar, su espesor y su dirección y sentido de flujo, mientras que las distintas morrenas frontales proporcionarán las fases de estabilización de los frentes glaciares (Figura 16). Si existe una secuencia de morrenas frontales conservadas a distintas altitudes en el mismo valle, su análisis conjunto permitirá definir la historia del glaciar desde su máximo avance (morrena terminal) y su posterior retroceso glaciar. Los depósitos glaciolacustres, frecuentemente depositados en cubetas de sobreexcavación glaciar, pueden contener importantes secuencias sedimentarias y cronológicas sobre la historia del retroceso glaciar, al igual que los depósitos de obturación marginal, que se originan por el bloqueo que el glaciar y sus sedimentos ejercían sobre las cuencas fluviotorrenciales laterales.



Figura 15. Valle glaciar (a la derecha), mostrando una sección en U y cubeta de sobreexcavación (en primer término, a la izquierda, ocupada por el Lago del Valle), en el Valle del Lago (Somiedo). Fotografía: Luis Quintana Rodríguez.



Figura 16. Ejemplo de morrenas frontales. El lago Ubales (Parque Natural de Redes) está represado por depósitos glaciares (morrenas), que indican que hubo un glaciar estabilizado en el lugar que hoy ocupa el lago. Fotografía: Esperanza Martín Hernández.

En las cabeceras de los cursos fluviales asturianos, se conservan numerosas evidencias del pasado glaciar de la cordillera Cantábrica. Entre ellas destacan, por sus dimensiones, aristas, circos glaciares, valles glaciares, cubetas de sobreexcavación glaciar y morrenas que, con mayor o menor representación, aparecen en las zonas más elevadas, por encima de los 900 m de altitud por término medio (Rodríguez-Rodríguez *et al*., 2015), aunque se han reconocido incluso a unos 600 m de altitud (Ruiz Fernández *et al*., 2016). Asociados a estas formas, pueden aparecer además glaciares rocosos, acumulaciones de fragmentos de roca que han experimentado procesos de flujo en una matriz de hielo y que se superponen a los restos glaciares, siendo también importantes indicadores de ambientes periglaciares implantados con posterioridad.

III.2.B. *El caso del Parque Natural de Redes: del avance del hielo a los glaciares rocosos*

El Parque Natural de Redes se localiza en el sector suroriental del Principado de Asturias. La mayor parte de su territorio (378 km^2) está incluido en la cabecera del río Nalón.

El registro glaciar que puede ser reconocido en el paisaje incluye 62 circos glaciares (1500 – >2000 m altitud), acumulaciones de till y morrenas (930 –1700 m de altitud), y otras formas asociadas como glaciares rocosos, morrenas de nivación y depósitos de glacio-lacustres. En la década de los noventa se estableció un modelo de tres fases para la evolución del glaciarismo en la zona. Este modelo comprendería una primera fase de extensión de los hielos o máximo glaciar, en la que los glaciares descendieron hasta alcanzar cotas de 1300–950 m, con desarrollo de glaciares alpinos de hasta 5 km de longitud, y dos fases posteriores de retroceso y estabilización de los frentes glaciares, a cotas respectivas de 1300–1500 m y de 1500-1700 m, con formación de glaciares de circo en esta última. Posteriormente, en la zona se implantaría un ambiente periglaciar, con desarrollo de glaciares rocosos. (Jiménez-Sánchez y Farias, 2002, 2005). Durante el máximo avance glaciar local, existieron 22 glaciares, que habrían ocupado una

superficie total de aproximadamente 41 km^2 y formarían parte de un casquete glaciar de montaña que se extendería hacia el S, hacia las montañas leonesas (Jiménez-Sánchez, 2021, Jiménez-Sánchez *et al*., 2022).

La historia del retroceso de los hielos ha podido ser establecida con precisión en el valle del Río Monasterio (Figura 17), que muestra distintas evidencias glaciares localizadas entre 985 y 1800 m de altitud (Rodríguez-Rodríguez *et al*., 2017). La cabecera del valle presenta cinco circos glaciares, que alimentarían el antiguo glaciar alpino que hubo en la zona, cuyo momento de máxima extensión estaría marcado por el complejo de morrenas laterales que represa el depósito de obturación marginal de la Vega de Brañagallones. Este depósito, localizado a 1200–1250 m de altitud tendría su origen en el bloqueo del drenaje de una pequeña cuenca fluvio-torrencial por parte de las morrenas, en el momento en que el glaciar alcanzaba 4,7 km de longitud, 870 m de anchura y su frente se situaba a 985 m de altitud. La edad mínima del represamiento se pudo conocer gracias a la realización de un sondeo mecánico que permitió recuperar 36,7 m de relleno sedimentario, cuya base fue datada en 33,5 ± 0.4 ka cal BP. Esta sería, por tanto, la edad mínima para el momento de máxima extensión del hielo (Jiménez-Sánchez y Farias, 2002).

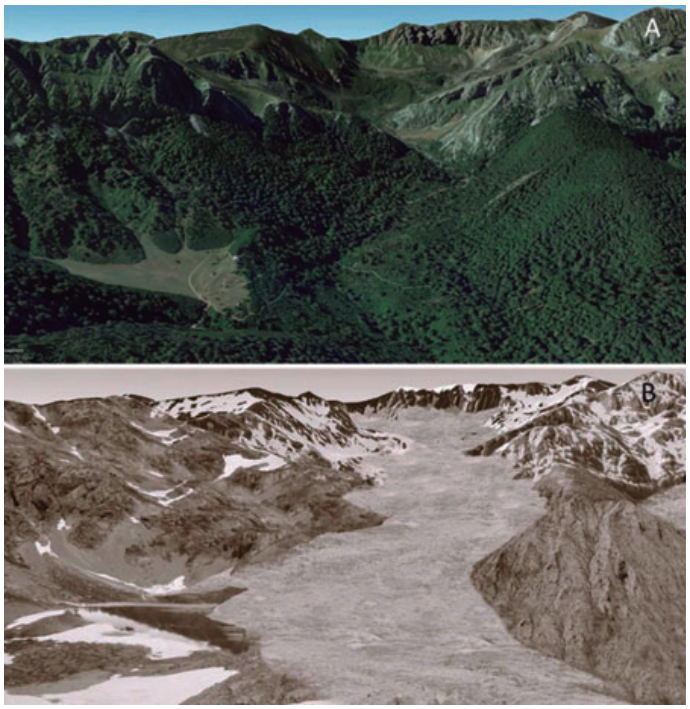


Figura 17. A) Valle del río Monasterio, con la vega de Brañagallones, limitada por morrenas glaciares (Parque Natural de Redes). Basado en Google Earth. B) Idealización de la extensión alcanzada por el hielo glaciar hace más de 33.000 años. Créditos: Esperanza Martín Hernández.

Dentro del límite alcanzado por el glaciar de Monasterio durante la fase de máximo glaciar local, se identificaron un conjunto de morrenas que indican un progresivo retroceso del glaciar hasta dar paso gradualmente a una dinámica periglaciar, con formación de glaciares rocosos en el circo de Valdevezón. La datación de tres de estas morrenas mediante el nucleido cosmogénico 10Be (Rodríguez-Rodríguez *et al*., 2017) permite conocer pormenorizadamente la historia glaciar del valle. Así, la morrena más antigua, conservada a 1150 m de altitud, fue abandonada hace 18,1 ± 0.3 ka, cuando el glaciar tenía 3,4 km de longitud; valle arriba, la morrena lateral de la Majada de Valdevezón marcaría una retirada del hielo posterior, hace 16,7 ± 0,4 ka, cuando el glaciar medía 3,3 km de longitud y tenía su frente aproximadamente a 1170 m de altura; finalmente, la morrena de circo conservada a 1540 m de altitud marcaría el retroceso del hielo glaciar hasta formar un glaciar de circo de 900 m de longitud, con una edad mínima de 14,0 ± 0,3 ka. Dentro de los límites de esta morrena de circo se conserva un glaciar rocoso relicto, datado en 13,0 ± 0,2 ka, que marcaría finalmente el tránsito de la dinámica glaciar a la periglaciar, con la desaparición definitiva del hielo glaciar en la zona.

III.2. C. *Glaciares que originaron lagos: el caso de los lagos de Covadonga*

Los Picos de Europa constituyen un macizo montañoso fundamentalmente calcáreo que alcanza una altitud máxima de 2.648 m (pico Torrecerredo) a tan sólo 30 km de la línea de costa. Se localiza entre las provincias de Cantabria, Asturias y León, siendo actualmente en su mayor parte un Parque Nacional de casi 675 km2 de superficie. En esta zona se han realizado numerosos estudios de glaciarismo, ya desde los inicios del siglo XX (Rodríguez-Rodríguez *et al*., 2015). Los glaciares cubrieron amplias superficies de Picos de Europa —hasta unos 180-195 km^2 en fases pleistocenas— y descendieron a cotas de 600-900 m (Ballesteros *et al*., 2019b, 2020, Ruiz-Fernández *et al*., 2022a), conservándose un helero en el Jou Negro (Adrados *et al*., 2012).

En el caso concreto del Macizo Occidental, la mayoría de los trabajos publicados atribuyen las evidencias a una glaciación cuya fase de máximo avance estaría caracterizada por un casquete glaciar de montaña que habría cubierto las zonas más altas y que estaría drenado por glaciares de descarga de acuerdo con un patrón radial, alcanzando cotas mínimas de entre 550 y 1480 m, a las que sucederían otras tres fases de retroceso y estabilización del hielo (Ruiz Fernández, 2016). Las evidencias glaciares reconocidas en la zona incluyen circos glaciares, valles glaciares, depresiones glaciokársticas, cubetas de sobreexcavación glaciar y morrenas, a las que se asocian además depósitos lacustres y glaciolacustres.

Una de las localidades más relevantes para conocer el momento en que hubo glaciares en los Picos de Europa se ubica en los lagos de Covadonga y su entorno. En esta zona se preservan diversas evidencias geomorfológicas de origen glaciar, que incluyen un conjunto de morrenas frontolaterales que delimitan el lago Ercina, separado del Lago Enol por la más occidental, diversas acumulaciones de till que rodean el Lago Enol (que a su vez ocupa una cubeta de sobreexcavación glaciar) y, por último, el valle glaciar del mismo nombre, situado al sur del lago. A una distancia de 700 m al Norte del lago Enol, se sitúa el semipoljé de Comeya, una cuenca cerrada de 1,2 km^2 de superficie, en la que desemboca el torrente que recoge las aguas de drenaje del propio lago. Esta depresión ha funcionado como una pequeña cuenca sedimentaria, cuya historia geológica ha podido ser interpretada a través de los testigos extraídos de dos sondeos de 42,5 y 56,7 m de profundidad realizados en los

años noventa, que proporcionaron una edad basada en datación mediante radiocarbono de 44,1 ka cal BP a 35,5 m de profundidad (Jiménez-Sánchez *et al*., 2013). Los sondeos realizados en el Lago Enol por un equipo del CSIC en el año 2004 permitieron obtener un registro sedimentario de hasta 6 m de espesor con una edad basal estimada en ~38 ka cal BP mediante radiocarbono AMS (Moreno *et al*., 2010).

La combinación de todos estos datos permite reconstruir una parte de la historia de la evolución glaciar. Durante el máximo glaciar local, una de las lenguas de hielo provenientes del casquete de montaña definido en la zona (Ruiz Fernández, 2016), habría avanzado hacia el Norte por el valle de Enol, erosionando el sustrato y dando lugar a la cubeta de sobreexcavación del lago. El glaciar se habría estabilizado a 1030 m de altitud, según marcan las morrenas terminales de Enol-Ercina y las aguas procedentes de su fusión habrían alimentado un lago cuyos depósitos rellenarían la depresión de Comeya. La edad obtenida a partir de los sondeos indicaría que el lago estaba activo hace a 44,1 ka cal BP, coetáneamente con el máximo glaciar local marcado por las morrenas terminales de Enol-Ercina. Posteriormente el frente del glaciar retrocedió hacia el Sur siguiendo el trazado del valle de Enol (Figura 18). Las edades obtenidas en el relleno sedimentario del lago Enol indican que la sedimentación lacustre se inició hace aproximadamente 38 ka cal BP, tras la retirada del hielo, y la interpretación del sondeo permite decir que el ambiente proglaciar se prolongó hasta hace 25,6 ka cal BP, fecha en el que el glaciar, probablemente, fuera capturado por otro que fluía hacia el Oeste, dejando abandonado el valle de Enol. Así el Lago Enol iría recibiendo progresivamente menos aguas de fusión, lo que favorecería la implantación de actividad biológica lacustre y el incremento de materia orgánica a partir de aproximadamente 11 ka cal BP (Moreno *et al*., 2010).

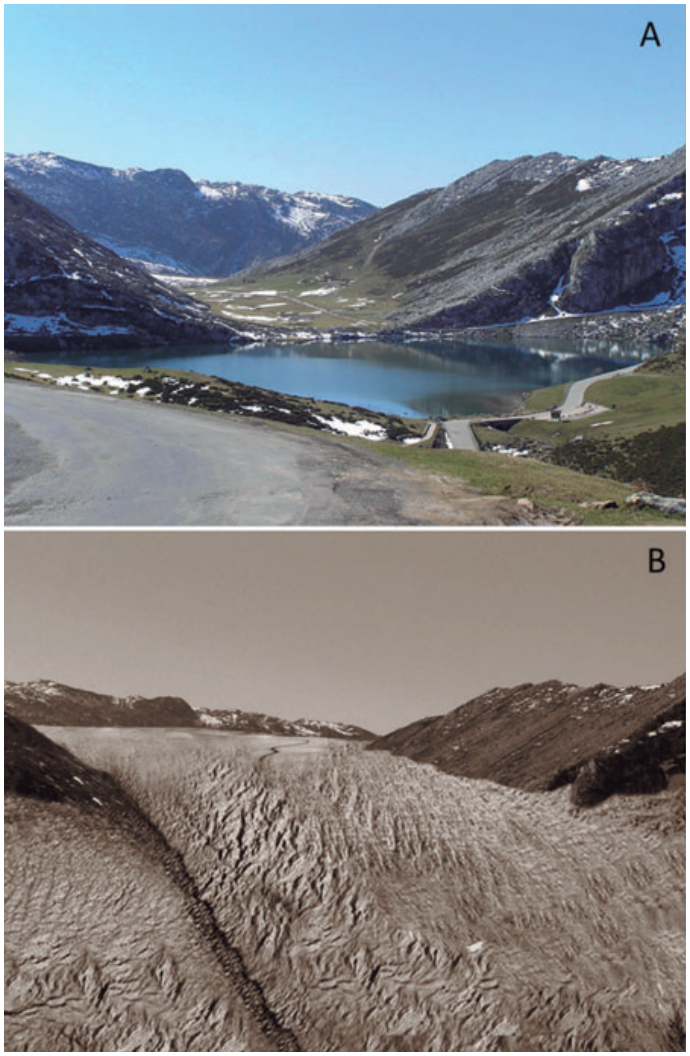


Figura 18. A) Valle glaciar de Enol, con una sección en U que indica el paso de un glaciar, y cubeta de sobreexcavación hoy ocupada por el Lago Enol B) recreación idealizada del aspecto del valle de Enol hace más de 40.000 años (modificada de Diego Álvarez-Laó).

III.2. D. U*na síntesis del significado de dos registros glaciares de relevancia in*ternacional

Sintetizando los datos obtenidos en estos dos espacios naturales emblemáticos, tenemos que el máximo avance glaciar habría tenido lugar hace por lo menos 44.000 años cal BP, en los Picos de Europa y hace más de 33.500 años cal BP en el Parque Natural de Redes. En esta segunda zona, interpretamos que los hielos habrían vuelto a avanzar hace unos 24.000 años atrás, coetáneamente con el Último Máximo Glaciar o Last Glacial Maximum (LGM) global para luego retroceder, paulatinamente, entre 18.100 y 14.000 años, implantándose después un ambiente periglaciar marcado por la presencia de glaciares rocosos hace unos 13.000 años.

La edad mínima de los depósitos lacustres de Comeya es coherente con fenómenos de descenso en la insolación en torno a hace 45.000 años, que podrían explicar la ocurrencia del avance del hielo antes del LGM global. El incremento posterior de la insolación tras este momento podría haber favorecido la deglaciación, con la formación de depósitos proglaciares, glaciolacustres y fluvioglaciares. La existencia de episodios de incremento de la precipitación combinados con descensos de la temperatura asociados a los eventos fríos globales que tuvieron lugar hace 30.000 y 40.000 años permitiría explicar el resto de las evidencias datadas tanto en Enol como en Brañagallones (38–33 ka cal BP). Por otra parte, la respuesta sincrónica al LGM global estaría marcada por la edad de la morrena lateral de Brañagallones (24.000 años). Ello coincidiría, además, con la ocurrencia de condiciones relativamente frías y húmedas detectadas en registros lacustres de la península ibérica (Moreno *et al*., 2012), cuya evolución es coherente también con el registro del retroceso detectado en el valle del río Monasterio entre hace 18.100 y 14.000 años y el tránsito a un ambiente periglaciar, que aparentemente finalizó con condiciones climáticas más suaves registradas entre hace entre 14.600 y 12.900 años (Rasmussen et al., 2014).

III.3. DINÁMICA DE LADERAS: LOS ARGAYOS ASTURIANOS

Entre los procesos más importantes de la evolución del relieve asturian se encuentran los que, de modo general, se conocen como procesos de gravedad, inestabilidad de laderas o movimientos en masa. En Asturias, estos procesos se engloban comúnmente bajo la denominación de “argayos” y “fanas”. Estos fenómenos van a condicionar en buena medida la evolución de las laderas de los valles (fluviales y glaciares), así como de los acantilados costeros.

III.3.A. *¿Qué son los procesos de gravedad?: tipología, causas y formas result*antes

Los procesos de gravedad son el resultado del desplazamiento de porciones de las laderas de las zonas más altas hacia las más bajas, afectando a rocas, suelos o derrubios (material rocoso suelto formado por acción de la gravedad). El movimiento comienza cuando las fuerzas que empujan la masa pendiente abajo superan la resistencia del terreno. En Asturias se conocen popularmente como "argayos" o, en algunas áreas, "fanas"; estos términos tradicionales se emplean de manera amplia y no designan un único mecanismo. De hecho, un argayo puede ser un desprendimiento, un deslizamiento, un flujo o una combinación de varios tipos de movimiento. La clasificación geomorfológica atiende al material movilizado, al tipo de deformación y a la velocidad (Hungr *et al*., 2014).

En los desprendimientos, fragmentos de roca de distintos tamaños se separan de un escarpe rocoso y caen, rebotan o ruedan. El material desestabilizado se acumula al pie de la ladera (Figura 19), dando lugar a canchales ("pedreros" o "lleras" en Asturias). En los deslizamientos, la masa conserva parte de su estructura interna y se desplaza sobre una superficie de rotura. En los flujos, el terreno, saturado de agua, se deforma internamente y avanza como una mezcla viscosa de agua, tierra y clastos. En ambos casos, en la parte más alta de las laderas, se crea una zona de cicatriz o de rotura y en la parte baja, se genera una acumulación de material con una morfología abombada. A ellos hay que añadir la reptación superficial, mecanismo de flujo que afecta a la parte más superficial de la ladera que actúa lentamente y cuyas evidencias se manifiestan a partir de la presencia de abombamientos diferenciales del terreno en incluso la curvatura de los árboles (Figura 20). En realidad, son frecuentes los movimientos complejos, que combinan la participación de varios mecanismos (Figura 21, Figura 22).

Para entender por qué los argayos se producen en un momento determinado y no en otro, es preciso entender sus causas o factores. De hecho, la inestabilidad resulta de la combinación de factores condicionantes, que "preparan" la ladera a lo largo del tiempo, y factores desencadenantes, que provocan la rotura en un momento determinado.

Respecto a los primeros, el relieve asturiano reúne condiciones favorables al desarrollo de estos procesos, destacando la existencia de valles fluviales encajados, con fuertes desniveles y altas pendientes, y en la costa, acantilados activos. Pero la litología y la estructura de las rocas es fundamental: laderas con rocas poco resistentes y/o muy fracturadas determinan la propensión a estos procesos, junto con la inclinación de los estratos hacia



Figura 20. Curvatura en los troncos de los árboles atribuible al proceso de reptación superficial (Parque Natural de Redes).



Figura 21. Argayo producido en 2005 en un talud artificial (Las Campas, Oviedo), con componentes de deslizamiento traslacional y flujo (movimiento complejo). El talud fue reparado posteriormente.



Figura 19. Desprendimientos rocosos a partir de escarpes de laderas de calizas en el Parque Natural de Somiedo.



Figura 22. Argayo producido en 2014 en una carretera del occidente de Asturias, con predominio de deslizamiento rotacional, aunque tiene más componentes de deslizamiento y flujo (movimiento complejo). La carretera fue posteriormente reparada. Créditos: María José Domínguez Cuesta y Pablo Valenzuela Mendizábal.

la parte baja de la ladera. Una de las zonas más favorables a este tipo de fenómenos es la Cuenca Carbonífera Central, donde existen alternancias de areniscas, lutitas y capas de carbón, con baja resistencia a la erosión (Domínguez-Cuesta et al., 2007). Asimismo, son también importantes los escarpes rocosos vinculados a cuarcitas y calizas, en los que tienen lugar sobre todo fenómenos de desprendimientos rocosos y avalanchas. A ellos hay que añadir el pasado glaciar de la Cordillera Cantábrica: tras retirarse el hielo glaciar, se favorece este tipo de fenómenos por descompresión de las laderas (Rodríguez-Rodríguez *et al*., 2018a).

Respecto a los factores desencadenantes de los argayos, cabe destacar que el agua (en sus diversas manifestaciones) es el principal. La lluvia aumenta el peso del terreno, reduce la cohesión de los materiales finos y eleva la presión del agua en los poros de las rocas y entre las partículas sueltas de las formaciones superficiales cuaternarias, disminuyendo así su resistencia. Los umbrales de lluvia necesarios para su desencadenamiento varían entre sectores según el clima local y la humedad preexistente (Valenzuela *et al*., 2018, 2019). La erosión del pie de las laderas por los ríos, el oleaje o la acción antrópica, la gelifracción en cotas altas, la pérdida de vegetación, las fugas de agua y las excavaciones o sobrecargas humanas completan las causas, a las que hay que añadir la influencia de la retirada del hielo glaciar hace miles de años (Rodríguez-Rodríguez *et al*., 2018).

Los terremotos tienen poca relevancia como factores desencadenantes actualmente en Asturias, aunque se han propuesto para explicar el origen de algunos grandes movimientos antiguos (Fernández *et al*., 2021, Rodríguez-Rodríguez *et al*., 2023).

III.3.B. *¿Dónde aparecen los argayos?: Distribución espacial de los movimientos en masa en Asturias*

Los argayos (procesos gravitacionales) aparecen en todo el territorio asturiano, reconociéndose su influencia desde los antiguos circos y valles glaciares, laderas en valles fluviales hasta en los acantilados costeros, pero su tipología y frecuencia varían con las características geológicas del sustrato, del relieve y la intervención humana.

En las zonas más elevadas de Asturias, en el eje de la cordillera Cantábrica y sus valles dominan los grandes deslizamientos, los desprendimientos rocosos y los flujos canalizados. Los macizos calcáreos orientales y centrales, como Picos de Europa, Aramo y Ubiñas, presentan paredes abruptas, canchales y caídas de bloques, además de inestabilidades heredadas de la deglaciación. En las montañas occidentales y suroccidentales, las cuarcitas, pizarras y mantos de alteración alimentan desprendimientos, deslizamientos y sistemas torrenciales, con flujos de derrubios; la fana de Genestaza es uno de los ejemplos destacados de estos últimos (Jiménez-Sánchez et al., 1996). La Cuenca Carbonífera Central concentra numerosos movimientos superficiales. Así, en un sector de 278 km^2 de la cuenca del Nalón se inventariaron 603 movimientos, muchos pequeños pero capaces de cortar carreteras y afectar a viviendas (Domínguez-Cuesta *et al*., 2007). El litoral constituye otra zona de actuación de estos procesos: el oleaje socava el pie de los acantilados y favorece distintos movimientos en masa desde el occidente hasta el oriente (Jiménez-Sánchez *et al*., 2025).

La Base de Datos de Argayos del Principado de Asturias (BAPA) registró 2063 movimientos entre 1980 y 2015, cuya mayor parte se registró en la Cuenca Carbonífera Central (Figura 23). Su distribución muestra una elevada presencia en la zona central y a lo largo de carreteras y áreas pobladas, aunque parte de este patrón refleja la mayor exposición y la mejor cobertura informativa por parte de la prensa, no solo una mayor propensión natural (Valenzuela et al., 2017). En una actualización posterior se consideraron 2245 argayos para 1980-2016, con una media de 60,7 movimientos anuales y una densidad de 0,2 movimientos por km^2 (Valenzuela et al., 2019).

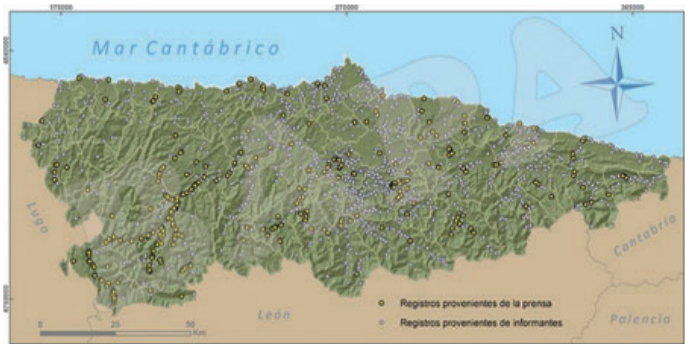


Figura 23. Base de Datos de Argayos del Principado de Asturias (BAPA), siempre en fase de actualización.
https://geol00.geol.uniovi.es/BAPA/Objetivos.html

III.3.C. *Cronología e impacto social de los argayos en Asturias*

La historia de los argayos forma parte de la evolución cuaternaria del paisaje asturiano, no sólo de la actualidad. Como ya se ha comentado, la elevación de la cordillera y la incisión fluvial generaron laderas de alta pendiente, pero, además, durante el Pleistoceno, los glaciares excavaron numerosos valles de montaña (Rodríguez-Rodríguez *et al*., 2015), y también hubo diversos eventos sísmicos, por lo que se mustran a continuación distintos ejemplos.

Tras la retirada del hielo glaciar, se produjo una situación de descompresión de las laderas, por lo que muchos grandes desprendimientos y deslizamientos de alta montaña se iniciaron al final del Pleistoceno o durante el Holoceno temprano, aunque sus edades son desiguales y algunos experimentaron reactivaciones posteriores (Rodríguez-Rodríguez *et al*., 2018). En la Sierra de la Sobia, Fernández *et al*. (2021) interpretaron depósitos de avalancha rocosa como posibles eventos de inestabilidad asociados a antiguos terremotos (magnitud superior a 6). Rodríguez-Rodríguez *et al*. (2023), mediante dataciones con 36Cl de una veintena de bloques en los depósitos de avalancha, detectaron un evento a 8,5 ± 0,6 ka que dio lugar a dos avalanchas de rocas en distintos puntos de la sierra de la Sobia, así como hasta cinco episodios de inestabilidad potencialmente cosísmicos desde hace unos 22 ka, que habrían tenido una recurrencia media de 3,7 ka. Tanto la deglaciación como la sismicidad son herencias o factores secundarios frente a los argayos recientes dominados por la lluvia.

En cuanto a las sierras prelitorales, en el valle del Meredal se cartografiaron 65 movimientos, con flujos sobre lutitas triásicas, avalanchas rocosas en escarpes calcáreos y depósitos holocenos datados en 5.050 ± 40 y 3.392 ± 128 años BP (Jiménez-Sánchez

et al., 1999), mostrando así la importancia del factor litológico en el desencadenamiento de estas inestabilidades y tal vez el factor paleoclimático.

Los argayos actuales quedan bien registrados en la BAPA y el análisis realizado comparando los registros temporales obtenidos a partir de los archivos de prensa muestran una estrecha relación entre temporadas de altas precipitaciones y episodios de inestabilidad, sobre todo entre otoño y primavera (Valenzuela et al., 2017, 2018).

En la actualidad, conocer los argayos, cómo se producen, en dónde y por qué es fundamental para prevenir la peligrosidad y el riesgo geológico asociadas a ellos. Cuando hablamos de peligrosidad, nos referimos a la probabilidad de que se produzca un argayo en un intervalo de tiempo determinado. Si hablamos de riesgo, ya estamos evaluando además la probabilidad de que bienes humanos y personas sean afectadas por los argayos. De hecho, actualmente, la problemática de los argayos en Asturias es muy importante por su interferencia con el ser humano: los argayos crean numerosas pérdidas económicas y en ocasiones de vidas humanas, siendo uno de los principales problemas que generan cortes en infraestructuras. Un ejemplo relevante es el argayo acaecido en noviembre de 2024 en la autopista del Huerna, que durante algo más de dos semanas interrumpió el tráfico en la principal vía de comunicación con la Meseta. En el momento de redacción de esta publicación, las obras de estabilización del talud y restauración de la autovía todavía continúan.

III.4. EL KARST EN ASTURIAS: UN PAISAJE ESPECIAL

Cuando se habla de "karst", nos referimos a un tipo de relieve (y por tanto, paisaje) especial, que se asocia a la existencia de rocas solubles. El agua procedente de las precipitaciones (lluvia, nieve…) es capaz de disolver las rocas, y así se genera un relieve en el que el paisaje superficial es tan importante como el subterráneo. En el caso de Asturias, estas rocas solubles son las calizas, cuya presencia condiciona la evolución del paisaje asturiano, modulando la influencia de otros procesos anteriormente descritos.

III.4.A. *El karst: un paisaje singular "por dentro y por fuera"*

En los paisajes kársticos, el paisaje superficial es tan importante como el paisaje subterráneo. Para entenderlo, es preciso comprender las rocas solubles como un acuífero (roca capaz de almacenar y transmitir agua) y por tanto como un sistema en el que existe un balance entre las entradas y las salidas de agua. Entender las calizas en un sentido hidrogeológico, a modo de gran esponja, donde entra agua, realiza un trabajo geomorfológico de disolución, y sale agua a modo de manantiales o surgencias, nos puede ayudar a entender el paisaje kárstico de Asturias.

El paisaje superficial incluye un conjunto de formas como lapiaces (canales y hendiduras apreciables en las calizas, Figura 24), dolinas (depresiones que, en planta, presentan una forma circular a elíptica, y que tienen tamaños variados Figura 25), aunque también existen uvalas (formadas cuando coinciden dos o más dolinas) y depresiones glaciokársticas (formadas por la acción conjunta de la disolución de las calizas y la acción glaciar).



Figura 24. Lapiaz (canales de disolución) en calizas (Parque Nacional de los Picos de Europa).



Figura 25. Dolina (depresión formada en el terreno) que aparece en el macizo de Ardines (Ribadesella)

También existen otras formas, entre las que cabe destacar la presencia de valles ciegos, en los que hay cursos fluviales que no desembocan en ríos, sino en sumideros (orificios por los que se infiltra el agua superficial en el terreno), como poljes (o poljés), valles asociados generalmente a un factor tectónico, y que suelen ser también valles ciegos (Figura 26). A ellos hay que añadir cañones fluvio-kársticos, y también manantiales o surgencias, que tienen que ver con la salida del agua tras haber recorrido los laberintos subterráneos del macizo kárstico.

El paisaje subterráneo hace referencia a las cuevas, a las cavidades kársticas: se trata de las formas subterráneas, que constituyen el endokarst. Entre ellas están las simas, conductos con una forma predominantemente vertical, y las galerías, con una componente predominantemente horizontal. Por estos conductos circula el agua que se infiltra en el macizo…y aflora de nuevo a la superficie a través de manantiales y surgencias, reseñadas en el párrafo anterior. Es en las cuevas donde aparece también el desarrollo de depósitos característicos asociados al proceso de precipitación química: los espeleotemas, siendo los más comúnmente conocidos las estalactitas, estalagmitas y columnas.



Figura 26. Un ejemplo de poljé en Asturias: la Vega de Comeya, con cauces superficiales que desaparecen en un sumidero localizado al noroeste (aunque su historia guarda muchos capítulos). Se puede apreciar desde el Mirador del Príncipe (Parque Nacional de los Picos de Europa). Es un caso muy particular, porque no sólo está modelado en rocas solubles, sino también en rocas silíceas, por lo que se puede denominar alternativamente como "semipoljé".

III.4.B. *Distribución espacial del karst en Asturias: una aproximación*

El karst asturiano se concentra predominantemente donde afloran rocas carbonatadas paleozoicas, sobre todo en el oriente regional —Picos de Europa, sierras prelitorales (Sueve, Cuera) y litoral de Llanes-Ribadesella— y en macizos carbonatados del sector central como Aramo, Monsacro, Sobia o Ubiña, aunque también existen ejemplos en otras zonas, como las vinculadas a las rocas carbonatadas del Mesozoico, con sistemas kársticos de interés, especialmente en el entorno de Gijón-Villaviciosa.

De entre las sierras prelitorales, cabe destacar ejemplos como el del macizo de Ardines, cuya superficie culminante corresponde a una rasa marina situada a 70-80 m, karstificada mediante dolinas subcirculares, elípticas y formas complejas próximas a uvalas, además de lapiaces. En este macizo se encuentra la cueva de Tito Bustillo (declarada Patrimonio Mundial por la UNESCO por su patrimonio cultural) que conserva formas y depósitos fluviokársticos, gravitacionales, químicos, biogénicos y antrópicos (Jiménez-Sánchez *et al.,* 2004). Otro ejemplo está en la cueva El Pindal (también declarada Patrimonio Mundial por la UNESCO por su patrimonio cultural), cavidad que se desarrolla a 24 m sobre el nivel del mar bajo una rasa de calcárea de 50-64 m de altitud, y que recibe sedimentos de otra rasa localizada a unos 140-150 m en rocas cuarcíticas. La cueva de El Pindal registra colapsos, inundaciones episódicas, sedimentación detrítica y varias generaciones de espeleotemas (Jiménez-Sánchez ***et al.,*** 2006). Sin embargo, uno de los lugares donde más se ha estudiado el karst está en los Picos de Europa, por lo cual se trata en un apartado posterior, aunque existen otros ejemplos relevantes, incluyendo las zonas costeras de Asturias.

III.4.C. *Los Picos de Europa: un laboratorio natural del karst… de la mano de la Espeleología*

Los Picos de Europa, en su conjunto, constituyen un gran acuífero kárstico (Meléndez *et al.,* 2019) a la par que un conjunto paisajístico excepcional. El fuerte encajamiento de la red de drenaje dio lugar a la individualización de tres macizos (Occidental, Central y Oriental) separados por los ríos Dobra, Cares, Duje y Deva, que fluyen de Sur a Norte formando profundos cañones. Además de los procesos de erosión fluvial, el relieve ha sido intensamente modelado por procesos kársticos y glaciares (Jiménez-Sánchez *et al.,* 2014), destacando el extraordinario desarrollo del endokarst, contando el Parque con el 14% de las cuevas más profundas del mundo (más de 1 km de profundidad) (Ballesteros *et al.,* 2019a).

Entre las formas superficiales del relieve, cabe señalar como elementos característicos los jous o hous, depresiones cerradas de alta montaña remodeladas por disolución, nieve, hielo y procesos gravitacionales, que llegan a superar las dimensiones hectométricas y que se asocian a campos de lapiaz (Figura 27). También destacan las gargantas de los ríos Cares, Sella, Dobra o Deva, donde la incisión fluvial ha condicionado el desarrollo del paisaje tanto superficial como subterráneo (Adrados *et al.,* 2012, Ballesteros *et al.,* 2019b).



Figura 27. El Jou Santo, un ejemplo de depresión glaciokárstica al pie de la Peña Santa. Fotografía: Laura Rodríguez-Rodríguez.

El endokarst presenta una notable diversidad morfológica, que ha sido estudiada en el Macizo Occidental de los Picos de Europa, para lo cual ha sido inestimable la labor realizada por multitud de grupos espeleológicos. Es aquí donde se ha señalado el predominio de cavidades verticales con simas, pozos y cañones

vadosos que conectan las zonas de recarga de alta montaña con manantiales situados en fondos de valle y que constituyen las áreas de descarga (Figura 28). Junto a ellos aparecen galerías de distintos orígenes asociados a la acción del agua subterránea, involucrando procesos fluviales y de precipitación química con formación de espeleotemas, además de la acción de la gravedad, con formación de desprendimientos (Ballesteros *et al.,* 2015, 2019b).

La génesis del karst responde a la interacción entre disolución carbonatada, estructura geológica, clima, nivel de base y procesos cuaternarios. El factor litológico es esencial: las calizas carboníferas, localmente muy potentes, proporcionan el volumen soluble, mientras que areniscas y lutitas ordovícicas, estefanienses o pérmico-triásicas actúan como acuitardos o suministran sedimento alóctono a las cavidades (Ballesteros *et al.,* 2019b). La estructura varisca y alpina —cabalgamientos, pliegues, fallas y diaclasas— guía la circulación del agua subterránea y la orientación de los conductos.

El clima oceánico húmedo favorece la karstificación por la elevada disponibilidad de agua. En Picos de Europa: las precipitaciones anuales alcanzan aproximadamente 1.000-1.800 mm, con nieve durante 6-9 meses por encima de 1.500 m; esta alternancia de lluvia, nieve y fusión nival controla la recarga, y la dinámica actual del karst, incluyendo disolución de la caliza y crecidas de los cauces subterráneos (Ballesteros *et al.,* 2017a, 2019b). Durante el Cuaternario, los glaciares cubrieron amplias superficies de Picos de Europa —hasta unos 180-195 km² en fases pleistocenas— y descendieron a cotas de 600-900 m, remodelando depresiones, y generando nuevos depósitos dentro de las cuevas (Ballesteros *et al.,* 2019b, 2020). La interacción glaciar y kárstica originaría las formas de modelado glaciokárstico tan características de los Picos de Europa: los jous, grandes depresiones que aparecen en las zonas más elevadas.

III.4. D. *Significado del karst en Asturias: algunas ideas*

En conjunto, el karst de Asturias es heterogéneo. En los Picos de Europa, la alta montaña oriental, domina un karst alpino y glaciokárstico, muy vertical y de gran extensión subterránea; en el litoral, los macizos calcáreos karstificados se relacionan

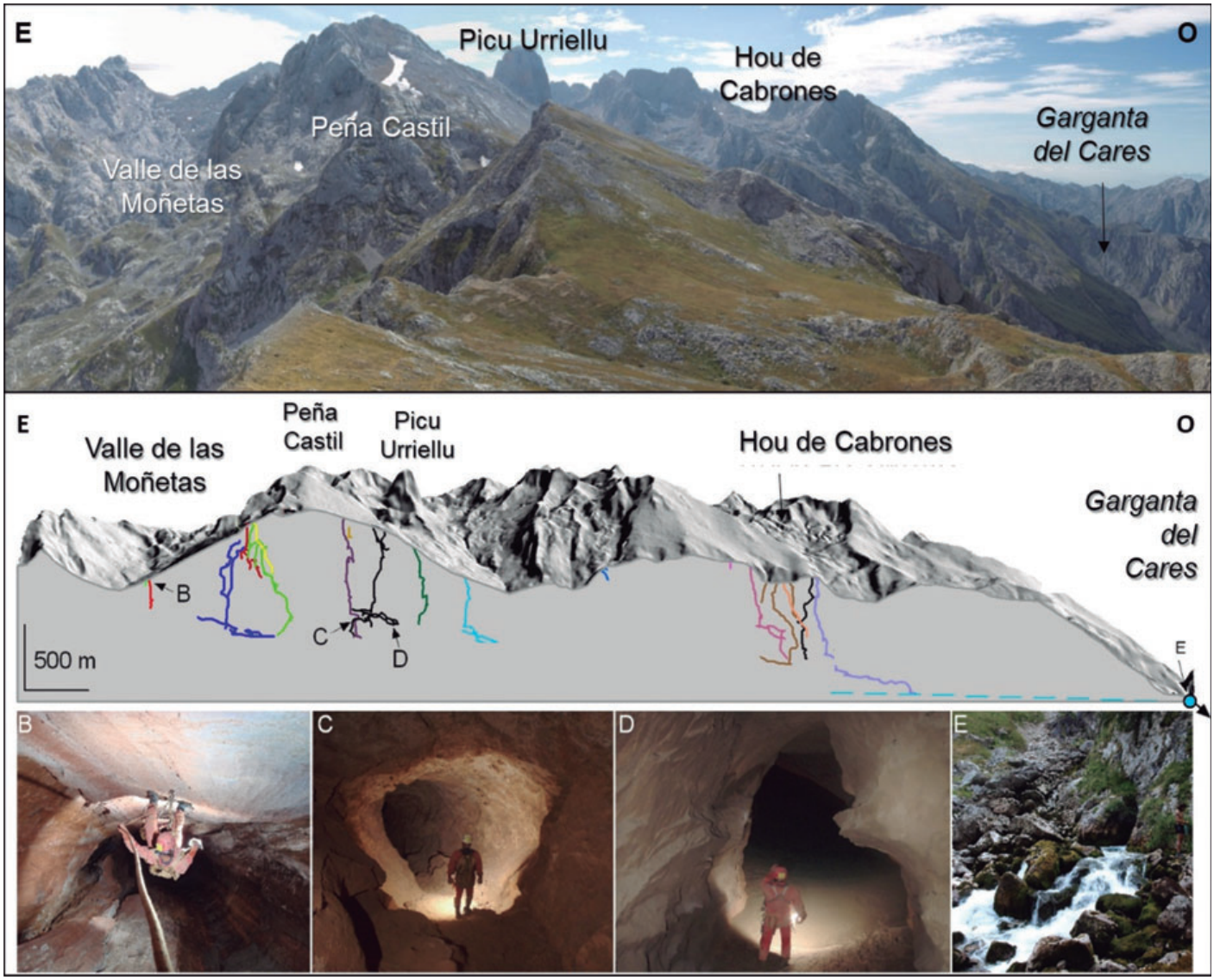


Figura 28. Ejemplo de la relación entre el relieve superficial y subterráneo en el (Parque Nacional de los Picos de Europa). A) Modelo digital del terreno de los Picos de Europa con las principales cumbres. B), C) y D) ilustran las características de las cuevas profundas de los Picos, mientras que E) hace referencia a una surgencia del Farfáo de la Viña (créditos: Daniel Ballesteros, con fotos cortesía del IEV Valenciano, Secció de Investigacions Subterrànies del Centre Excursionista de Terrassa, V. Ferrer y Expediciones 1987-2012 a Castil Urriello.

con rasas y oscilaciones marinas. Su génesis no puede atribuirse a un único proceso: resulta de la disolución de calizas bajo clima húmedo, influenciada por la fracturación de las rocas y la influencia de las glaciaciones, la incisión fluvial, los cambios en el nivel del mar a lo largo del tiempo, y levantamiento tectónico.

Esta combinación explica tanto la variedad de formas superficiales como la riqueza del endokarst asturiano, que además actúa como un archivo geológico de información geomorfológica, climática e hidrogeológica del margen cantábrico, entrañando además algunos de los registros paleontológicos relevantes de Asturias (Álvarez-Lao *et al*. 2020), así como de algunas de las primeras comunidades humanas que poblaron Asturias de las que tenemos noticia (Cañaveras *et al*., 2018).

III.5. EL LITORAL ASTURIANO

El litoral asturiano constituye uno de los sectores más representativos de las costas rocosas del margen septentrional de la Península Ibérica. Su configuración geomorfológica responde, (tal como ya ha sido comentado para otros aspectos del paisaje previamente) a la interacción entre la estructura geológica (varisca y alpina), las oscilaciones relativas del nivel del mar, la dinámica marina, la red fluvial cantábrica y los procesos gravitacionales, kársticos y eólicos. Aunque la distancia en línea recta entre los estuarios del Eo y Tina Mayor (que delimitan Asturias respectivamente por el oeste y el este) es de aproximadamente 200 km, la longitud real de la línea de costa supera los 660 km, dado que es una costa muy recortada. De este total, alrededor de 570 km corresponden a costa natural, 86 km a sectores artificializados y 11 km a ambientes estuarinos o de transición fluvial (Domínguez-Cuesta *et al*., 2019).

El sustrato geológico costero puede agruparse en dos grandes conjuntos (Domínguez-Cuesta *et al*., 2019; López-Fernández *et al*., 2020). El primero está constituido por materiales precámbricos y paleozoicos, dominantes en los sectores occidental (predominantemente silíceo) y oriental (con calizas carboníferas karstificadas); el segundo comprende las rocas pérmicas, mesozoicas y cenozoicas, mejor representadas en el sector central, con litologías variadas. Estas diferencias litológicas condicionan también las diferencias en el paisaje litoral de Asturias.

III.5.A. *¿Cuál es el funcionamiento general de los procesos litorales asturianos?*

La costa asturiana está sometida a un régimen mesomareal y a oleajes procedentes principalmente del norte y noroeste. En las zonas de acantilados se producen fenómenos de inestabilidad, condicionados por la litología, la fracturación, la orientación de los estratos y el estado hídrico. Las lluvias aumentan la saturación y las presiones intersticiales, mientras los temporales intensifican la erosión basal. La coincidencia de estos factores puede favorecer el desarrollo de los movimientos de ladera o argayos (Domínguez-Cuesta *et al*., 2019, 2022).

En las calizas del sector costero oriental, la dinámica marina coexiste con la karstificación. El mar captura, amplía o reactiva cuevas, simas y dolinas, y genera formas mixtas como bufones, arcos, playas interiores y estuarios kársticos (Flor-Blanco *et al*., 2022).

Los ríos aportan gravas, arenas y fangos; el oleaje es capaz de seleccionar los tamaños del sedimento y las corrientes costeras de deriva litoral lo redistribuyen, con una componente neta frecuentemente dirigida hacia el este, aunque variable según la orientación de cada tramo costero. La pérdida de energía en bahías y desembocaduras favorece la sedimentación.

Hay que añadir, además, la acción eólica en las zonas litorales. Así, durante la bajamar, el viento transporta arena seca de las playas hacia el interior, donde los obstáculos y la vegetación favorecen la formación de dunas. Estos depósitos constituyen reservas sedimentarias que amortiguan parcialmente el oleaje, pero son sensibles a la urbanización (Flor *et al*., 2019).

En los estuarios, áreas de desembocadura de los ríos en el mar, donde coexiste la dinámica fluvial y marina, se alternan corrientes fluviales y mareales: los canales transfieren agua y sedimento, mientras que en áreas protegidas, se depositan limos y arcillas que forman llanuras intermareales y marismas. Los estuarios actúan, así como sistemas de transferencia y almacenamiento sedimentario (Flor-Blanco y Flor, 2019).

Como resultado de esta dinámica costera, desde el punto de vista geomorfológico, en la costa asturiana aparecen formas erosivas que incluyen principalmente acantilados, plataformas de abrasión y rasas, mientras que, como formas sedimentarias o de depósito aparecen playas, dunas y estuarios.

III.5.B. *Acantilados y plataformas de abrasión*

Los acantilados son la forma dominante de la costa asturiana. Presentan habitualmente alturas de 5-50 m, aunque localmente superan los 120 m, especialmente al oeste de Villaviciosa (Domínguez-Cuesta *et al*., 2015, 2019). Su evolución deriva de la combinación de procesos de abrasión marina, meteorización subaérea y movimientos en masa con factores como la fracturación, disposición estructural de los estratos rocosos y precipitaciones. En el occidente predominan acantilados siliciclásticos relativamente rectilíneos, mientras que en el oriente calcáreo la interacción entre oleaje y karstificación genera lapiaces, dolinas capturadas por el mar, cuevas, arcos, islotes, playas cerradas, estuarios confinados y bufones (Flor-Blanco *et al*., 2022).

El funcionamiento de los acantilados es el resultado de la "competición" entre la energía erosiva del oleaje y la resistencia del macizo rocoso: el mar socava la base del acantilado y favorece desprendimientos, deslizamientos y otros procesos de inestabilidad, especialmente en materiales fracturados o fácilmente erosionables (Jiménez-Sánchez *et al*., 2025). Con todo ello, el acantilado va retrocediendo y en su base aparece una plataformaligeramente inclinada hacia el mar (plataforma de abrasion), que es remodelada por la acción del oleaje. Así, el oleaje moviliza, de manera alternativa, hacia el mar y hacia tierra, los bloques caídos, que ejercen así una acción abrasiva sobre el sustrato rocoso. Ejemplos de estas plataformas de abrasión son apreciables en distintas zonas de Asturias, especialmente en el sector occidental, donde dominan las rocas silíceas, y central, con litologías mixtas (Figura 29). El retroceso diferencial genera asimismo cabos (en rocas resistentes) y ensenadas y bahías (en zonas con sustratos rocosos menos resistentes), así como cuevas, arcos, e islotes. Estos últimos constituyen marcadores de la antigua posición de la línea de costa.



Figura 29. Acantilado y plataforma de abrasión desarrollados en rocas de edad jurásica en la playa de Peñarrubia (Gijón). Fotografía: María José Domínguez Cuesta.



Figura 30. Procesos activos en la parte alta de la ladera del faro de Tazones con apertura de grietas y desarrollo de inestabilidades en el año 2021 (Fuente: Diario El Comercio, https://www.elcomercio.es/asturias/mas-concejos/argayo-faro-tazones-avanza-imparable-medio-metro-20210320003454-ntvo.html, noticia del 20/03/21.

Un ejemplo de funcionamiento activo de un acantilado es el gran argayo del faro de Tazones, que constituye uno de los ejemplos mejor documentados de inestabilidad de acantilados en la costa asturiana (Domínguez-Cuesta *et al*., 2022a, 2022b). El movimiento afecta a una superficie aproximada de 70.750 m^2, presenta una profundidad estimada de entre 10 y 50 m y moviliza un volumen del orden de 3.550.000 m^3. Entre junio de 2018 y mayo de 2020 se realizaron 22 campañas mensuales sobre una red de 38 puntos de control, lo que permitió reconstruir la evolución espacial y temporal del movimiento y elaborar un modelo geomorfológico en cuatro dimensiones. La inestabilidad principal corresponde a un deslizamiento traslacional favorecido por la inclinación y la fracturación de los estratos, al que se superponen flujos superficiales y desprendimientos rocosos. Durante el periodo de seguimiento se registraron varios episodios de aceleración. En febrero de 2019, 12 puntos de control superaron desplazamientos mensuales de 50 cm. En noviembre del mismo año, aproximadamente la mitad de los puntos rebasó 1 m de desplazamiento y uno de ellos superó nada menos que 15 m. Estos episodios coincidieron con valores de precipitación lluviosa máxima de 64,5 y 82,1 mm en 24 horas y con alturas significantes de ola de 6,54 y 9,09 m, respectivamente, lo que ilustra la gran influencia conjunta de los procesos litorales y las lluvias en la evolución de los acantilados asturianos. En la superficie más alta de la ladera (Domínguez-Cuesta *et al*., 2022a, 2022b), las evidencias del movimiento corresponden a grietas asociadas al deslizamiento principal que han ido modificándose a lo largo del tiempo (Figura 30), mientras que en la parte más baja, donde la pendiente del acantilado aumenta hasta casi la vertical, dominan diferentes tipos de argayos y desprendimientos (Figura 31), algo que está presente en otras áreas del litoral asturiano, como es el caso de Luarca (Figura 32).

III.5.C. *Otras formas: playas, dunas, estuarios y… bufones*

En Asturias existen numerosas playas, predominando las playas pequeñas, encajadas y compartimentadas entre los promontorios o salientes costeros. Flor *et al*. (2022) analizaron 61 playas arenosas y 20 campos dunares a lo largo de 387 km de costa. Las mayores playas suelen asociarse a barreras estuarinas, como Salinas-El Espartal, Bayas-Los Quebrantos, o Rodiles, entre otras. Sus arenas tienen una doble procedencia: siliciclástica, derivada sobre todo de aportes fluviales, y carbonatada biogénica, procedente de organismos de la franja rocosa intermareal y perimareal.

Otro ejemplo es la playa de San Lorenzo, en Gijón. De acuerdo con Rodríguez-Rodríguez *et al*. (2025), el paisaje de



Figura 31. Acantilado del faro de Tazones, visto desde el mar, mostrando diversas inestabilidades (argayos y desprendimientos) que alimentan el "pedreru" que está en la base. La imagen de la figura 30 corresponde a la parte alta, no visible desde esta perspectiva. Fotografía: María José Domínguez Cuesta.



Figura 32. Acantilado activo en la playa de Arreas, Luarca (enero 2019), con playa de cantos y "pedreru" (resultado de desprendimientos del acantilado) en su base.

Gijón, hace un par de milenios contaría con un icónico islote (cerro de Santa Catalina) conectado a tierra por una barra arenosa (tómbolo). Al este nos encontraríamos la playa de San Lorenzo, un extenso campo dunar y el estuario del río Piles, cuyas marismas se extenderían por lo que ahora es el parque de Isabel la Católica y parte del recinto de la FIDMA. Al oeste del tómbolo, existiría una barra arenosa litoral delimitando una zona de esteros (El Humedal) alimentada por los arroyos Cutis y Pilón. En sus inmediaciones se encuentra actualmente la playa de Poniente, playa artificial cuya construcción se inició en 1994, siendo inaugurada un año después.

Los estuarios representan otro componente esencial del litoral. Los principales sistemas son Eo, Navia, Nalón (Figura 33), Avilés, Villaviciosa, Ribadesella y Tina Mayor, aunque existen además estuarios menores, confinados como Barayo, Porcía, Esva, Guadamía, Cuevas del Mar, Niembro, Poo, Purón, Marimuerto o La Franca. Su morfología responde a valles fluviales inundados y rellenados de sedimentos durante la transgresión holocena (etapa de ascenso del nivel del mar), con barreras arenosas o mixtas, canales mareales, bancos arenosos, llanuras intermareales y marismas. Muchos estuarios han sido modificados por dragados, rellenos, canalizaciones, infraestructuras portuarias y ocupación de marismas (Flor-Blanco y Flor, 2019).



Figura 33. Estuario del río Nalón (fotografía de 2004, tomada desde avión, durante la construcción de la A-63) o Ría de San Esteban de Pravia. Se aprecia la desembocadura del río, modificada por distintas estructuras portuarias, así como la playa de Los Quebrantos, en su margen derecha. Las superficies planas y separadas del mar por acantilados corresponden a rasas.

En el oriente carbonatado destacan formas controladas por el karst, como la playa de la Ballota en Llanes (Figura 34), y los campos de bufones (Figura 35) así como otras como las playas cerradas de Gulpiyuri y Cobijeru, situadas tierra adentro respecto al acantilado actual y conectadas con el mar por conductos que transmiten el oleaje y permiten la entrada de arena (Flor-Blanco *et al*., 2022). En Cobijeru, el sistema incluye la existencia de una playa interior, una cueva, un arco, un bufón y el estuario cerrado de Marimuerto, conectado al mar por un conducto kárstico de unos 80 m. El conjunto ilustra la interacción entre karst, oleaje, sedimentación y relleno estuarino (Ballesteros *et al*., 2017b, Flor-Blanco *et al*., 2022; Flor-Blanco y Mariano González, 2026).



Figura 34. Playa de la Ballota en Llanes, un ejemplo de interacción entre el karst carbonatado y la refracción del oleaje, entre otros fenómenos y factores.



Figura 35. Bufones de Arenillas en distintas fases de actividad (fotografías de noviembre de 2019). A) Actividad en la zona norte. B) Actividad en la zona sur.

Los bufones constituyen elementos singulares de la costa oriental. Su máxima actividad tiene lugar cuando se combina la acción del oleaje y marea alta. Así se favorece la entrada brusca de agua a conductos kársticos subverticales previamente ocupados por aire, dando lugar a una mezcla de aire y agua pulverizada que puede ascender varios metros. Los bufones de Arenillas (Figura 35), además de estar declarados como Monumento Natural ha sido propuesto como patrimonio geológico de relevancia mundial (Flor-Blanco *et al*. 2023).

III.5. D. *Las rasas asturianas*

Las rasas litorales (Figura 2C., Figura 33, Figura 36) son parte de los rasgos más característicos y debatidos del litoral cantábrico, al que imprimen un carácter especial. Se trata de superficies erosivas elevadas, planas o suavemente inclinadas hacia el mar, delimitadas hacia el norte por laderas escarpadas. Se interpretan como antiguas plataformas de abrasión o superficies mixtas marino-continentales, posteriormente levantadas y modificadas por erosión fluvial, meteorización, karstificación y procesos de gravedad. Los esquemas clásicos distinguieron numerosos niveles, desde superficies próximas a 285 m s. n. m. hasta niveles bajos situados en torno a 35-40, 15-18 y 5-6 m (Flor, 1983; Flor y Flor-Blanco, 2014).

De acuerdo con López-Fernández et al. (2020), se puede reconocer un nivel regional de rasa que se prolonga durante más de 200 km a lo largo de la costa cantábrica y alcanza una anchura conservada máxima de unos 6 km.

En el sector occidental (Figura 36), la superficie principal se conserva de manera continua durante aproximadamente 122 km



Figura 36. Rasa cantábrica de Cabo Peñas, en torno a 100 m de altitud, modelada en cuarcitas. En primer término, la rasa de la Punta del Castiello de Podes (36 m de altitud), modelada en rocas carbonatadas y lutitas.

y muestra una inclinación de alrededor de 0,08 grados hacia el oeste. La falla de Ventaniella separa dos dominios con evolución diferenciada y produce un desnivel aparente cercano a 50 m en la superficie erosiva principal. Estos resultados reducen el número de niveles regionales necesarios para explicar la distribución de las rasas, aunque no excluyen la existencia de superficies menores generadas o reelaboradas durante episodios posteriores. La variación en altitud de este nivel de rasa, con pérdida gradual de cota hacia el occidente, podría guardar relación con el diferente espesor de la raíz cortical generada bajo la cordillera Cantábrica durante la orogenia alpina. Este proceso explicaría un levantamiento lento y desigual a lo largo de la línea de costa, asociado a procesos complejos de isostasia, que se reflejaría en las diferencias en la morfología y altitud de la rasa litoral en el Cantábrico. Otros trabajos mencionan la existencia de fallas que cortan y desplazan este nivel de rasa y los sedimentos que reposan encima (Gutiérrez-Claverol *et al*., 2006, Álvarez-Marrón *et al*. 2008).

Conocer la edad de las rasas es algo complejo y requiere una metodología multidisciplinar. En el occidente, los nucleidos cosmogénicos proporcionan una edad mínima de 1-2 Ma para una plataforma de unos 100 km de longitud y 2-4 km de anchura, posiblemente iniciada en el Plioceno y afectada después por procesos de levantamiento regional. Se han estimado velocidades medias de levantamiento de 0,07-0,15 mm/año (Álvarez-Marrón *et al*., 2008). En el sector oriental de Asturias, la cueva del Pindal aporta otra referencia cronológica. La cavidad, de unos 590 m de desarrollo y situada a 24 m s. n. m., se relaciona con la rasa del Pindal, localizada entre 50 y 64 m, mientras la rasa de Pimiango se sitúa entre 125 y 170 m. Las dataciones U/Th de espeleotemas incluyen edades próximas a 124 y 73 ka. La relación entre cavidad, depósitos y superficies sugiere una edad mínima cercana a 300 ka para la propia rasa y el endokarst, con una tasa tentativa de elevación de 0,19 mm/año (Jiménez-Sánchez *et al*., 2006).

III.5. E. *El sistema costero asturiano en su conjunto*

En conjunto, acantilados, playas, dunas, estuarios y rasas pueden considerarse como un sistema geomorfológico integrado en Asturias. Los acantilados aportan bloques, cantos y partículas finas mediante procesos de gravedad; los ríos suministran buena parte del sedimento siliciclástico; los estuarios actúan como áreas de retención y redistribución de sedimento; las playas y dunas almacenan arena y amortiguan parcialmente la energía marina; y las rasas conservan el registro de antiguos niveles costeros y de la historia de la elevación del margen cantábrico.

La recurrencia de temporales de elevada energía y la presión antrópica sobre estos sistemas costeros pueden aumentar la vulnerabilidad de los sectores con balances sedimentarios deficitarios o acantilados inestables. El contexto actual de cambio climático refuerza la vulnerabilidad del sistema. A escala global, la tasa de subida del nivel del mar ha aumentado desde valores próximos a 2,1 mm/año en 1993 hasta 4,5 mm/año en 2023, aunque se manejan con frecuencia tasas medias en torno a 3,4 mm/año (Jiménez-Sánchez *et al*., 2025). En consecuencia, la gestión del litoral requiere integrar la evolución geomorfológica de acantilados, playas, dunas, estuarios y rasas, limitar la ocupación de las áreas expuestas, conservar los sistemas dunares y las marismas como espacios de amortiguación y mantener la vigilancia de los tramos acantilados afectados por argayos (Flor-Blanco et al., 2021; Domínguez-Cuesta *et al*., 2022a, 2022b).

IV. CONCLUSIONES

Como conclusión, tras recorrer brevemente la historia y dinámica del planeta Tierra, y con ello, la de Asturias en su conjunto, se puede responder a una pregunta fundamental: ¿la Geología puede ser una clave para entender el paisaje? Como hemos visto, la respuesta es afirmativa, y para ello sintetizamos algunos de los argumentos anteriormente expuestos.

Tal como hemos visto, el origen del relieve de Asturias responde a la existencia de dos orogenias: varisca y alpina. Ambas han dejado su impronta en el relieve actual: de la primera se conservan algunos vestigios en el paisaje, como pliegues que explican parte del trazado sinuoso de las principales alineaciones montañosas de la región. La segunda ha generado las líneas maestras del relieve actual, destacando la elevación de las principales montañas del sur, que nos separan de la Meseta, y la de otros relieves secundarios (más al N), así como la formación de una zona de suave relieve que va aproximadamente desde Grado a Piloña, las sierras prelitorales e incluso los rasgos del relieve submarino del mar Cantábrico. A esta influencia tectónica, marcada por ambas orogenias, es preciso añadir el comportamiento diferencial de las variadas rocas del sustrato geológico de Asturias: las rocas más resistentes (cuarcitas y calizas) generan los relieves más elevados de Asturias, así como las mayores pendientes del territorio, lo que contrasta frente a otras rocas menos resistentes (lutitas, pizarras y alternancias de ambas con areniscas y calizas), que se distribuyen más frecuentemente en el fondo de los valles y en zonas de menor pendiente. Además, el carácter soluble de las calizas, condiciona el desarrollo de paisajes singulares en diversas zonas de la región (karst).

Los procesos geológicos externos que han modelado y siguen modelando el relieve de Asturias (estudiados por la Geomorfología) incluyen principalmente: procesos fluviales, glaciares, gravitatorios, litorales y kársticos. Su influencia está condicionada por la historia tectónica anterior, por la distribución de las rocas en el sustrato y por los cambios climáticos acaecidos a lo largo de la historia terrestre, de los que contamos con registros principalmente cuaternarios. Estos procesos han estado controlando la evolución del paisaje de la región, aunque su cronología todavía resulta enigmática. A ellos habría que añadir la interacción del ser humano con el paisaje y los procesos activos, un aspecto que cada vez cobra más importancia por las situaciones de impacto y riesgo que conlleva.

La existencia de relieves elevados en la cordillera Cantábrica ha condicionado la posición de la divisoria que separa los ríos cantábricos, por una parte, de los que vierten a otras cuencas fluviales. De ahí que el trazado principal de los ríos asturianos, se dirija fundamentalmente hacia el norte, para desembocar en el mar Cantábrico, labrando para ello un camino condicionado por la presencia de las rocas y estructuras geológicas asociadas a toda la historia geológica de la región, lo que explica la distribución espacial de la red hidrográfica asturiana. Realmente,

la evolución de los ríos condiciona la evolución del paisaje en todas sus facetas. Estos ríos continúan ejerciendo su labor en la actualidad, con regímenes de comportamiento que dependen fundamentalmente del clima, en concreto, las precipitaciones, que gobiernan las crecidas e inundaciones e interfieren con la ocupación de las llanuras aluviales, dando lugar a circunstancias de riesgo para las poblaciones expuestas a estos procesos naturales.

Por otra parte, los elevados relieves del sur propiciaron la existencia de altitudes favorables para permitir la acumulación de hielo, y la generación de lenguas glaciares que probablemente ocuparían la cordillera Cantábrica en varias ocasiones durante las etapas más frías del Cuaternario, aprovechando el trazado de los cursos fluviales previos.

Paralelamente, principalmente los procesos kársticos, gravitatorios, y litorales han ido condicionando el modelado del relieve. Respecto a los procesos kársticos, están restringidos a aquellas áreas donde existen formaciones solubles, particularmente calizas, que se distribuyen principalmente en el sector oriental de la región, alcanzando desde las zonas más elevadas, en los Picos de Europa, hasta las zonas costeras. Respecto a la actuación de los procesos de gravedad, su influencia afecta a toda la región, incluyendo desde antiguos relieves glaciares a laderas en valles fluviales y acantilados en la costa, llegando a crear situaciones de riesgo conjuntamente con temporales marinos e inundaciones fluviales. Es de destacar que en su origen influyen especialmente factores climáticos, aunque no hay que descartar el factor sísmico en los últimos miles de años. En cuanto a los procesos y formas litorales, Asturias presenta una costa fundamentalmente rocosa en la que dominan los acantilados, aunque existen playas y estuarios. Sin embargo, como elemento más singular del paisaje, está la existencia de rasas, cuya formación sigue siendo ampliamente estudiada.

En suma, la elevación del relieve por la acción de importantes fallas explica la distribución de las líneas maestras del paisaje actual con su peculiar configuración montañosa, y el fuerte gradiente de altitudes, entre el eje de la cordillera y el mar. Por otra parte, la variedad litológica del sustrato, con rocas silíceas al occidente, mixtas en la zona central y calcáreas al este, junto con su respuesta a la acción de la gran variedad de procesos geológicos externos que actúan en Asturias, explican las grandes diferencias existentes entre el este y el oeste de Asturias. Realmente, la Geología, aunque no lo sepamos, ha determinado la arquitectura del paisaje asturiano, su orografía, y con ella, la del devenir del pueblo asturiano. Por tanto, en conclusión, se puede afirmar que la diversidad y singularidad del relieve asturiano es el resultado de sus características geológicas… por lo cual la Geología es la clave para entender el paisaje, y con ello, las peculiaridades de esta comunidad autónoma tan especial.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al doctor Mario Díaz el reto planteado de elaborar un artículo que contribuya a entender mejor la influencia de la Geología en el paisaje del territorio asturiano. Quiero agradecer la colaboración alentadora de personas que han contribuido a concluir este trabajo, revisando el texto, preparando figuras, aportando bibliografía y fotografías propias y proporcionando ideas, a quienes cito en orden alfabético de su apellido. Entre ellas están las doctoras María José Domínguez-Cuesta, Lidia Ferri Hidalgo y Laura Rodríguez-Rodríguez y los doctores Diego Álvarez-Laó, Daniel Ballesteros Posada, Germán Flor-Blanco, Sergio Llana-Fúnez, Carlos López-Fernández, Luis Quintana Rodríguez, y Pablo Valenzuela Mendizábal. También agradezco a la Arqueóloga Esperanza Martín Hernández y al Biólogo Jesús María Valderrábano, sus imágenes. Asimismo, agradezco las sugerencias de mejora del texto al doctor José Luis Acuña. El trabajo se ha realizado en el marco de las actividades de difusión científica del Grupo de Investigación GEOCANTABRICA, que coordino desde 2018, destacando los proyectos GEOCANTABRICA (IDE/2024/000753, SEK-25-GRU-GIC-24-072, SEKUENS-UE-FONDOS EUROPEOS), RETROCLIFF (PID2021-122472NB-100, MICIU, UE-FEDER, AEI) y CUEVAS UNESCO PA-24 (Gobierno del Principado de Asturias, Servicio de Patrimonio de la Consejería de Cultura, Política Llingüística y Deporte).

REFERENCIAS

Adrados González, L., Alonso Alonso, V., Bahamonde Rionda, J. R., Farias Arquer, P., Fernández González, L. P., Gutiérrez Claverol, M., Heredia Carballo, N., Jiménez Sánchez, M., Meléndez Asensio, M., Merino Tomé, O. y Villa Otero, E. (2012). *Guía Geológica del Parque Nacional de los Picos de Europa*. 2.ª ed. IGME-OAPN.

Alonso, J. L., Pulgar, J. A., García-Ramos, J. C. and Barba, P. (1996). Tertiary basins and Alpine tectonics in the Cantabrian Mountains (NW Spain). En Friend, P. F. y Dabrío, C. J. (Eds), *Tertiary basins of Spain: Tectonics, Climate and Sea-Level Changes*, 214-227. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511524851.031

Alonso, J. L., Pulgar, J. A., and Pedreira, D. (2007). El relieve de la Cordillera *Cantábrica*. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15 (2): 151-163.

Álvarez-Lao, D. J., Ballesteros, D., Rivals, F., Álvarez-Vena, A., Valenzuela, P., and Jiménez-Sánchez, M. (2020). First occurrence of musk ox *Ovibos moschatus* in the Late Pleistocene (MIS 3) record from NW Iberia: Paleobiogeographic and paleoenvironmental implications. Quaternary Science Reviews, 238: 106336. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106336

Álvarez-Marrón, J., Hetzel, R., Niedermann, S., Menéndez, R., and Marquínez, J. (2008). Origin, structure and exposure history of a wave-cut platform more than 1 Ma in age at the coast of northern Spain: A multiple cosmogenic nuclide approach. *Geomorphology*, 93 (3–4): 316–334. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.03.005

Ballesteros Posada, D. (2016). *Geomorfología y evolución de cuevas alpinas en los Picos de Europa, Cordillera Cantábrica (España)*. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo. 370 pp.

Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., Giralt, S., García-Sansegundo, J., and Meléndez-Asensio, M. (2015). A multi-method approach for speleogenetic research on alpine karst caves. Torca La Texa shaft, Picos de Europa (Spain). *Geomorphology*, 247: 35–54. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.026

Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., Giralt, S., De Felipe, I., and García-Sansegundo, J. (2017a). Glacial origin for cave rhythmite during MIS 5d-c in a glaciokarst landscape, Picos de Europa (Spain). *Geomorphology*, 286: 68–77 https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.014

Ballesteros, D., Rodríguez-Rodríguez, L., González-Lemos, S., Giralt, S., Álvarez-Lao, D. J., Adrados, L., and Jiménez-Sánchez, M. (2017b). New evidence of sea-level lowstands and paleoenvironment during MIS 6 and 4 in the Cantabrian coastal karst: The Cobiheru Cave (North Iberia). *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(11): 1704–1716. https://doi.org/10.1002/esp.4115

Ballesteros, D., Fernández-Martínez, E., Carcavilla, L., and Jiménez-Sánchez, M. (2019a). Karst cave geoheritage in protected areas: Characterisation and proposals of management of deep caves in the Picos de Europa National Park (Spain). Geoheritage, 11: 1919-1939 https://doi.org/10.1007/s12371-019-00416-8

Ballesteros, D., Giralt, S., García-Sansegundo, J., and Jiménez-Sánchez, M. (2019b). Quaternary regional evolution based on karst cave geomorphology in Picos de Europa (Atlantic Margin of the Iberian Peninsula). Geomorphology, 336: 133–151. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.002

Ballesteros, D., Álvarez-Vena, A., Monod-Del Dago, M., Rodríguez-Rodríguez, L., Sanjurjo-Sánchez, J., Álvarez-Lao, D., Pérez-Mejías, C., Valenzuela, P., De Felipe, I., Laplana, C., Cheng, H., and Jiménez-Sánchez, M. (2020). Paleoenvironmental evolution of Picos de Europa (Spain) during marine isotopic stages 5c to 3 combining glacial reconstruction, cave sedimentology and paleontological findings. Quaternary Science Reviews, 248: 106581. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106581

Bastida, F. y Aller, J. (1995). Rasgos geológicos generales. En: Aramburu, A. and Bastida, F. (Eds.), *Geología de Asturias*, 27-33. Ediciones Trea.

Cañaveras, J. C., Sánchez-Moral, S., Cuezva, S., Fernández-Cortés, A., Muñoz, M. C., Lario, J., Silva, P. G., Santos-Delgado, G., Duarte, E., Santamaría, D., y de la Rasilla, M. (2018). Estudio geoarqueológico de la cueva de El Sidrón (Piloña, Asturias). *Boletín Geológico y Minero*, 129 (1–2), 107–128. https://doi.org/10.21701/bolgeomin.129.1.005

Chazarra Bernabé, A., Lorenzo Mariño, B., Belinchón Martín, F., Moreno García, J. V., y Romero Fresneda, R. (2024). *Mapas climáticos de España (1991–2020) y ETo (1996–2020)*. Agencia Estatal de Meteorología. https://doi.org/10.31978/666-24-007-4

Domínguez-Cuesta, M. J., Jiménez-Sánchez, M., and Berrezueta, E. (2007). Landslides in the Central Coalfield (Cantabrian Mountains, NW Spain): Geomorphological features, conditioning factors and methodological implications in susceptibility assessment. *Geomorphology*, 89(3–4): 358–369. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.01.004

CampoMORFOS (2025). *Sedimentos, dinámica fluvial e impactos en el curso bajo del río Nalón (Asturias)*. II Jornadas de Morfodinámica Fluvial y Observatorio de Sedimentos en Ríos. https://inundacion.es/wp-content/uploads/2025/11/Dosier_CampoMORFOS_20251110.pdf

Confederación Hidrográfica del Cantábrico. (s. f.). Ríos de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental: *https://www.chcantabrico.es/organismo/las-cuencas-cantabricas/marco-fisico/hidrologia/rios/dhc-occidental*

Domínguez-Cuesta, M. J., Jiménez-Sánchez, M. J., González-Fernández, J. A., Quintana, L., Flor, G., and Flor-Blanco, G. (2015). GIS as a tool to detect flat erosional surfaces in coastal areas: A case study in North Spain. *Geologica Acta*, 13(2): 97-106. https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2015.13.2.2

Domínguez-Cuesta, M. J., Valenzuela, P., Rodríguez-Rodríguez, L., Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., Piñuela, L., and García-Ramos, J. C. (2019). Cliff coast of Asturias. In: Morales, J. A. (Ed.): *The Spanish coastal systems: dynamic processes, sediments and management,* 49-77. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_3

Domínguez-Cuesta, M. J., González-Pumariega, P., Valenzuela, P., López-Fernández, C., Rodríguez-Rodríguez, L., Ballesteros, D., Mora, M., Meléndez, M., Herrera, F., Marigil, M. A., Pando, L., Cuervas-Mons, J., and Jiménez-Sánchez, M. (2022a). Understanding the retreat of the Jurassic Cantabrian coast (N. Spain): Comprehensive monitoring and 4D evolution model of the Tazones Lighthouse landslide. *Marine Geology,* 449: 106836. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2022.106836

Domínguez-Cuesta, M.J., Rodríguez-Rodríguez, L., López-Fernández, C., Pando, L., Cuervas-Mons, J.; Olona, J., González-Pumariega, P., Serrano, J., Valenzuela, P. and Jiménez-Sánchez, M. (2022b). Using Remote Sensing Methods to Study Active Geomorphologic Processes on Cantabrian Coastal Cliffs. *Remote Sensing*, 14(20): 5139. https://doi.org/10.3390/rs14205139

Farias, P. y Marquínez, J. (1995). El relieve. En: Aramburu, A. y Bastida, F. (Eds.), *Geología de Asturias*, 163-172. Ediciones Trea.

Fernández, F. J., Menéndez-Duarte, R., Pando, L., Rodríguez-Rodríguez, L. and Iglesias, M. (2021). Gravitational slope processes triggered by past earthquakes on the Western Cantabrian Mountains (Sierra de la Sobia, Northern Spain). *Geomorphology*, 390: 107867. https://doi:10.1016/j.geomorph.2021.107867

Fernández, F. J., Menéndez-Duarte, R. A., Vázquez-Tarrío, D., Medialdea, A., Uzkeda, H., Bulnes, M. T., y Poblet, J. (2025). Incisión fluvial cuaternaria en la cuenca del Nalón-Narcea (Cordillera Cantábrica, vertiente norte). En Ruiz-Fernández, J., Menéndez-Duarte, R. A, García-Hernández, C., Rodríguez-Rodríguez, L., Herrán-Alonso, M., Vázquez-Tarrío, D. Gallinar, D., Fernández-Iglesias, M. E., González-Díaz, B., Ferri-Hidalgo, L., Ochoa-Álvarez, M., Incera-Sañudo, L., Fresnedo-Guillén, F. y Pérez-García, L. (Eds.), *Avances de la Geomorfología española en 2023-2025*, 36–39. Ediciones Trabe. Sociedad Española de Geomorfología.

Fernández-Viejo, G., Gallart, J., Pulgar, J.A., Córdoba, D., and Danobeitia, J.J., (2000). Seismic signature of Variscan and Alpine tectonics in NW Iberia: Crustal structure of the Cantabrian Mountains and Duero basin. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 105: 3001–3018. https://doi.org/10.1029/1999JB900321

Flor, G. (1983). Las rasas asturianas: Ensayos de correlación y emplazamiento. *Trabajos de Geología*, 13: 65-81.

Flor, G. and Flor-Blanco, G. (2014). Raised beaches in the Cantabrian Coast. En F. Gutiérrez and M. Gutiérrez (Eds.), *Landscapes and Landforms of Spain*, 239-248. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8628-7_20

Flor-Blanco, G., and Flor, G. (2019). Cantabrian estuaries. In: Morales, J.A. (Ed): *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management*, 415-436. Springer International Publishing.

Flor-Blanco, G., y Mariano González, E. (2026). Una propuesta para Global Geosite. La singularidad del sistema playa y estuario interior de Cobijeru (Llanes-NE Asturias). *Geo-Temas*, 22: 31–34.

Flor-Blanco, G., Adrados, L., Llana-Fúnez, S. y Bruschi, V. (2023). Los campos de bufones de Pría y Arenillas (Asturias). ¿Patrimonio geológico mundial?. *Geogaceta*, 74: 91–94. https://I: 10.55407/geogaceta98280

Flor, G., Flor-Blanco, G., Cedrún, P. M., Flores-Soriano, C. and Borghero, C. (2019). Aeolian dune fields in the coasts of Asturias and Cantabria (Spain, NW Iberian Peninsula). In: Morales, J.A. (Ed): *The Spanish Coastal Systems*. 585-609. Springer International Publishing

Flor-Blanco, G., Alcántara-Carrió, J., Jackson, D. W. T., Flor, G. and Flores-Soriano, C. (2021). Coastal erosion in NW Spain: Recent patterns under extreme storm wave events. *Geomorphology*, 387: 107767. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107767

Flor-Blanco, G., Bruschi, V., Adrados, L., Domínguez-Cuesta, M. J., Gracia-Prieto, F. J., Llana-Fúnez, S., and Flor, G. (2022). Geomorphological evolution of the calcareous coastal cliffs in North Iberia (Asturias and Cantabria regions). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 273: 107913. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107913

Flor, G., Flor-Blanco, G. y Rey Ruanova, M. (2022). Transferencias arenosas transversales y longitudinales entre playas apoyadas y dunas asociadas en la costa de Asturias (NO de la península Ibérica). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 35(1): 15-35. https://doi.org/10.55407/rsge.94880

Gibbard, P. L., Head, M. J., Walker, M. J. C., and The Subcommission on Quaternary Stratigraphy (2010). Formal ratification of the Quaternary System/Period and the Pleistocene Series/Epoch with a base at 2.58 Ma. *Journal of Quaternary Science*, 25 (2): 96–102. https:// doi:10.1002/jqs.1338

Gobierno del Principado de Asturias. (2022). *Plan Director de Abastecimiento de Aguas del Principado de Asturias 2020–2030*. Portal de Medio Ambiente del Principado de Asturias. https://medioambiente.asturias.es/

Gutiérrez Claverol, M., y García-Ramos, J. C. (2016). La geología de Asturias a través de las Topografías Médicas. *Trabajos de Geología*, 36: 203–236. doi: 10.17811/tdg.36.2016.203-236

Gutiérrez-Claverol, M., López-Fernández, C., y Alonso, J. L. (2006). Procesos neotectónicos en los depósitos de rasa de la zona de Canero (Occidente de Asturias). *Geogaceta*, 40: 75–78.

Hillenbrand, I.W., and Williams, M.L. (2022). Geochemical evidence for diachronous uplift and synchronous collapse of the high elevation Variscan hinterland: Geophysical Research Letters, 49, e2022GL100435. https://doi.org/10.1029/2022GL100435

Hungr, O., Leroueil, S. and Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, 11: 167-194. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y

Jiménez-Sánchez, M. (1999). Geomorfología fluvial en la cabecera del río Nalón (Cordillera Cantábrica, Noroeste de España). Trabajos de Geología, 21: 189-201. https://doi.org/10.17811/tdg.21.1999.189-201

Jiménez-Sánchez, M. (2021): *Geología y cambios globales: relatos de hielo efímero*. Lección Inaugural 2021-22. 39 pp. Servicio de Publicaciones. Universidad de Oviedo.

Jiménez Sánchez, M.; Menéndez Duarte, R.; Farias Arquer, P. y Fernández Menéndez, S. (1996). La «Fana» de Genestaza: un ejemplo de sistema torrencial activo en la Cordillera Cantábrica. Geogaceta, 20(5), 1109–1111.

Jiménez-Sánchez, M., Farias, P., Rodríguez, A., and Menéndez-Duarte, R. A. (1999). Landslide development in a coastal valley in Northern Spain: Conditioning factors and temporal occurrence. *Geomorphology*, 30(1–2): 115–123. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00048-3

Jiménez-Sánchez, M. and Farias Arquer, P. J. (2002). New radiometric and geomorphologic evidences of a last glacial maximum older than 18 ka in SW European mountains: the example of Redes Natural Park

(Cantabrian Mountains, NW Spain). *Geodinamica Acta*, 15: 93-101. https://doi.org/10.1080/09853111.2002.10510741

Jiménez-Sánchez, M., y Farias, P. (2005). Geomorfología glaciar en la Cordillera Cantábrica (noroeste de España): algunos ejemplos). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 13(3): 259-269.

Jiménez-Sánchez, M., Anadón Ruiz, M. S., Farias Arquer, P., García-Sansegundo, J. y Canto Toimil, N. (2004). Geomorfología de la cueva de Tito Bustillo y del macizo kárstico de Ardines (Ribadesella, Costa Cantábrica, Norte de España). *Boletín Geológico y Minero*, 115(2): 257-264.

Jiménez-Sánchez, M., Bischoff, J. L., Stoll, H., and Aranburu, A. (2006). A geochronological approach for cave evolution in the Cantabrian Coast (Pindal Cave, NW Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, Neue Folge, *Supplementband*, 147: 129-141.

Jiménez-Sánchez, M., Ballesteros, D., Rodríguez-Rodríguez, L., and Domínguez-Cuesta, M. J. (2014). The Picos de Europa national and regional parks. In: Gutiérrez, F. and Gutiérrez, M. (Eds.), *Landscapes and landforms of Spain*, 155-163. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8628-7_13

Jiménez-Sánchez, M., Rodríguez-Rodríguez, L., García-Ruiz, J. M., Domínguez-Cuesta, M. J., Farias, P., Valero-Garcés, B, Moreno, A., and Valcárcel, M. (2013). A review of glacial geomorphology and chronology in northern Spain: timing and regional variability during the last glacial cycle. *Geomorphology*, 196: 50-64. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.009

Jiménez-Sánchez, M., Rodríguez-Rodríguez, L., González-Lemos, S., and Domínguez-Cuesta, M. J. (2022). The glaciers in the Redes Natural Park. En Palacios, D., Andrés, J. and Oliva M. (Eds.), *Iberia, Land of Glaciers*, 221-235. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00011-6

Jiménez Sánchez, M., Rodríguez Rodríguez, L. y Domínguez Cuesta, M. J. (2025). Cambio climático y costas rocosas: el mar está ganando la batalla a los acantilados. *The Conversation*. https://theconversation.com/cambio-climatico-y-costas-rocosas-el-mar-esta-ganando-la-batalla-a-los-acantilados-261025, https://doi.org/10.64628/AAO.hr567psqj

López-Fernández, C., Fernández-Viejo, G., Olona, J. and Llana-Fúnez, S. (2018). Intraplate seismicity in Northwest Iberia along the trace of the Ventaniella Fault: A case for fault intersection at depth. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108 (2): 604–618. https://doi.org/10.1785/0120170215

López-Fernández, C., Llana-Fúnez, S., Fernández-Viejo, G., Domínguez-Cuesta, M. J., and Díaz-Díaz, L. M. (2020). Comprehensive characterization of elevated coastal platforms in the north Iberian margin: A new template to quantify uplift rates and tectonic patterns. *Geomorphology,* 364: 107242. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107242

Llopis Lladó, N. y Martínez Álvarez, J. A. (1959). Estudio hidrogeológico del Terciario de los alrededores de Grado (Oviedo). *Speleon*, 10 (1–2): 45-75.

Matte, P. (2001). The Variscan collage and orogeny (480–290 Ma) and the tectonic definition of the Armorica microplate: A review. Terra Nova, 13: 122–128. https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00327.x

Menéndez, R., y Marquínez, J. (1996). Glaciarismo y evolución tardiglaciar de las vertientes en el valle de Somiedo. Cordillera Cantábrica. *Cuaternario y Geomorfología*, 10 (3–4): 21–31.

Meléndez, M., Ballesteros, D., y Jiménez-Sánchez, M. (2019). Hidrogeología del Parque Nacional de los Picos de Europa, norte de España. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (4): 593–614. https://doi:10.21701/bolgeomin.130.4.002

MITECO (s. f.). *Anuario de Aforos*. CEDEX. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/sistema-informacion-anuario-aforos.html

MITECO (2024). *Mapas de peligrosidad por inundación fluvial*. Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/mapas-peligrosidad-por-inundacion-fluvial.html

Moreno, A., Valero-Gárcés, B.L., Jiménez-Sánchez, M., Domínguez, M.J., Mata, P., Navas, A., González-Sampériz, P., Stoll, H., Farias, P., Morellón, M., Corella, P. and Rico, M., (2010). The last deglaciation in the Picos de Europa National Park (Cantabrian Mountains, northern Spain). *Journal of Quaternary Science*, 25: 1076–1091. https://doi.org/10.1002/jqs.1265

Moreno, A., González-Sampériz, P., Morellón, M., Valero-Garcés, B.L. and Fletcher, W.J. (2012). Northern Iberian abrupt climate change dynamics during the last glacial cycle: A view from lacustrine sediments. *Quaternary Science Reviews*, 36: 139-153. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.06.031

NASA (2020). The Blue Marble: The View From Apollo 17. https://www.nasa.gov/image-feature/the-blue-marble-the-view-from-apollo-17 Acceso 27 de junio de 2026.

Pérez-Estáun, J.L. (1995). Evolución geológica de Asturias en el contexto de la tectónica global. En: Aramburu, A. y Bastida, F. (Eds.), *Geología de Asturias*, 153-162. Ediciones Trea.

Pérez Estaún, A. y Martínez, F. J. (1978): El Precámbrico del Antiforme del Narcea en el sector de Tineo-Cangas de Narcea (NW de España. Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo, 10: 367-379.

Quintana, L., Alonso, J. L. y Rodríguez Fernández, L. R. (2021). Mapa Geológico de España E. 1:50.000, Hoja 28 - Grado, 3.ª serie. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna3SHoja.aspx?language=es&id=28. Acceso 27 de junio de 2026.

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., Vallelonga, P., Vinther, B.M., Walker, M.J.C., Wheatley, J.J. and 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. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.007

Rodríguez-Rodríguez, L., Jiménez-Sánchez, M., Domínguez-Cuesta, M. J., and Aranburu, A. (2015). Research history on glacial geomorphology and geochronology of the Cantabrian Mountains, north Iberia (43–42°N/7-2°W). *Quaternary International*, 364: 6–21. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.06.007

Rodríguez-Rodríguez, L., Jiménez-Sánchez, M., Domínguez-Cuesta, M. J., Rinterknecht, V., Pallas, R., and ASTER Team. (2017). Timing of last deglaciation in the Cantabrian Mountains (Iberian Peninsula; North Atlantic Region) based on in situ-produced 10Be exposure dating. *Quaternary Science Reviews*, 171: 166–181. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.07.012

Rodríguez-Rodríguez, L., Jiménez-Sánchez, M., Domínguez-Cuesta, M.J., Rinterknecht, V., Pallàs, R., and Bourlès, D. (2018a). Timing of paraglacial rock-slope failures and denudation signatures in the Cantabrian Mountains (North Iberian Peninsula). *Land Degradation and Development*, 29 (10): 3500-3513. https://doi.org/10.1002/ldr.3012

Rodríguez-Rodríguez, L., Domínguez-Cuesta, M. J., Rinterknecht, V., Jiménez-Sánchez, M., González-Lemos, S., Léanni, L., Sanjurjo, J., Ballesteros, D., Valenzuela, P., Llana-Fúnez, S., and ASTER Team. (2018b). Constraining the age of superimposed glacial records in mountain environments with multiple dating methods (Cantabrian Mountains, Iberian Peninsula). *Quaternary Science Reviews*, 195: 215–231. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.07.025

Rodríguez-Rodríguez, L., Fernández, F. J., Menéndez-Duarte, R., Guillou, V., Puente-Berdasco, B., Rinterknecht, V. and ASTER Team (2023). Age and recurrence of coseismic rock avalanches in Sierra de la Sobia (Cantabrian Mountains, Spain). *CATENA*, 223: 106931. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106931

Rodríguez-Rodríguez, L., Farias-Arquer, P., Flor-Blanco, G. García-Sansegundo, J., Fernández-González, M. A., Pando, L. A., Rodríguez-Terente, L. M., Quijada, E. y Gómez Ruiz de Argandoña, V. (2025): *¿Cómo sería Gijón sin Gijón?* Colección Geolodía. https://geolodia.es/geolodia-2025/asturias-2025/

Rubio-Ordóñez, A., Gutiérrez-Alonso, G., Valverde-Vaquero, P., Cuesta, A., Gallastegui, G., Gerdes, A., and Cárdenes, V. (2015). Arc-related Ediacaran magmatism along the northern margin of Gondwana: Geochronology and isotopic geochemistry from northern Iberia. *Gondwana Research*, 27 (1), 216–227. https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.09.016

Ruiz-Fernández, J. y Poblete Piedrabuena, M. Á. (2011). Las terrazas fluviales del río Cares: aportaciones sedimentológicas y cronológicas (Picos de Europa, Asturias). *Estudios Geográficos*, 72 (270): 173–202. https://doi.org/10.3989/estgeogr.201108

Ruiz-Fernández, J., Oliva, M., Cruces, A., Lopes, V., Freitas, M. da C., Andrade, C., García-Hernández, C., López-Sáez, J. A., and Geraldes, M. (2016). Environmental evolution in the Picos de Europa (Cantabrian Mountains, SW Europe) since the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews*, 138: 87–104. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.03.002

Ruiz-Fernández, J., García-Hernández, C., and Gallinar Cañedo, D. (2022a). The glaciers of the Picos de Europa. En: Palacios, D., Andrés, J. and Oliva M. (Eds.), *Iberia, Land of Glaciers*, 237–264. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00012-8

Ruiz-Fernández, J., González-Díaz, B., Gallinar Cañedo, D., and García-Hernández, C. (2022b). The glaciers of the Central-Western Asturian Mountains. En: Palacios, D., Andrés, J. and Oliva M. (Eds.), *Iberia, Land of Glaciers*, 265-289. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00013-X

Silva, P. G., Bardají, T., Roquero, E., Baena-Preysler, J., Cearreta, A., Rodríguez-Pascua, M. A., Rosas, A., Zazo, C., and Goy, J. L. (2017). El Periodo Cuaternario: La Historia Geológica de la Prehistoria. *Cuaternario y Geomorfología*, 31 (3–4): 113–154. https://doi.org/10.17735/cyg.v31i3-4.55588

Suárez, O. (1995). Las rocas ígneas y el metamorfismo. En: Aramburu, A. y Bastida, F. (Eds.), *Geología de Asturias*, 123-138. Ediciones Trea.

Valenzuela, P. (2017). Landslide triggering in Asturias (NW Spain): *Rainfall and soil moisture conditions modelling*. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo. 193 pp.

Valenzuela, P., Domínguez-Cuesta, M. J., García, M. A. M. and Jiménez-Sánchez, M. (2017). A spatio-temporal landslide inventory for the NW of Spain: BAPA database. *Geomorphology*, 293: 11-23. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.05.010

Valenzuela, P., Domínguez-Cuesta, M. J., Mora García, M. A., and Jiménez-Sánchez, M. (2018). Rainfall thresholds for the triggering of landslides considering previous soil moisture conditions (Asturias, NW Spain). *Landslides*, 15 (2): 273-282. https://doi.org/10.1007/s10346-017-0878-8

Valenzuela, P., Zêzere, J. L., Domínguez-Cuesta, M. J. and Mora García, M. A. (2019). Empirical rainfall thresholds for the triggering of landslides in Asturias (NW Spain). *Landslides*, 16 (7): 1285–1300. https://doi.org/10.1007/s10346-019-01170-2

Cómo aprovechar (y evaluar) el potencial de la Ciencia para impulsar el crecimiento económico de los territorios

Fernando Rubiera Morollón

Laboratorio de Análisis Económico Regional - REGIOlab
Cátedra SEKUENS para el Análisis de la Innovación en Asturias
Universidad de Oviedo

Resumen- **El objetivo de este artículo es revisar y comprender como la Ciencia, y su desarrollo tecnológico, contribuyen al crecimiento económico de los territorios. El progreso científico y tecnológico facilita el cambio tecnológico gracias al cual se incrementa la productividad y se consigue el crecimiento económico. Pero el aprovechamiento del potencial de los avances científicos para generar cambios tecnológicos depende en buena parte de características endógenas de cada lugar. Este carácter endógeno del cambio tecnológico puede provocar que la Ciencia y la Tecnología contribuyan a aumentar las desigualdades espaciales. Una evaluación integral de la investigación científica y tecnológica es aquella que no se limita a evaluar el desempeño de los científicos o las instituciones de investigación, sino que trata de medir su contribución —tanto en términos de crecimiento económico como en términos de su impacto sobre las desigualdades entre territorios, ya sean países o regiones—. Todas estas cuestiones son ilustradas con ejemplos y casos concretos, varios de ellos referidos a Asturias.**

"Epimeteo, que no era del todo sabio, gastó, sin darse cuenta, todas las facultades en los demás animales y dejó sin equipar de virtudes a la especie humana. Hallándose en ese trance, llega Prometeo para supervisar la distribución. Ve a todos los animales armoniosamente equipados y al hombre, en cambio, desnudo, sin calzado, sin abrigo e inerme. Ante la imposibilidad de encontrar un medio de salvación para el hombre Prometeo roba a Hefesto y a Atenea la sabiduría de las artes junto con el fuego y se la ofrece, así, como regalo al hombre. Con ella recibió la especie humana la sabiduría para conservar la vida, pero no recibió la sabiduría política, porque estaba en poder de Zeus y a Prometeo no le estaba permitido acceder a la mansión de Zeus, en la acrópolis, a cuya entrada había dos guardianes terribles".

"*El mito de Prometeo, Protágoras", Platón*

I. INTRODUCCIÓN

La Ciencia, y su desarrollo tecnológico o efecto innovador, son motores fundamentales del crecimiento y el desarrollo económico. Cualquier sociedad que quiera progresar, hacerse más competitiva y mejorar el bienestar de sus ciudadanos necesita realizar esfuerzos sólidos y continuados en investigación científica y desarrollo tecnológico. Pero cuando hablamos del papel fundamental de la Ciencia en el crecimiento, lo estamos planteando en un plano agregado, a una escala nacional o continental. Si reflexionamos sobre el efecto de la Ciencia desagregando a escala regional o local empiezan a surgir cuestiones interesantes: ¿están todas las regiones igual de preparadas para generar crecimiento sobre la base del progreso científico y tecnológico?, o, por el contrario, ¿hay regiones que pueden aprovechar mucho más el potencial de la Ciencia para crecer? Si ocurriera lo segundo, ¿podría pasar que la Ciencia aumentase las desigualdades entre territorios? En realidad, cuando hablamos de evaluar el papel de la Ciencia en el crecimiento de los territorios, nos estamos planteando estas dudas y buscamos que dicha evaluación nos ayude a comprender mejor todas las aristas de la relación entre Ciencia y crecimiento.

En la actualidad, la Unión Europea afronta dos retos fundamentales. Por una parte, en el contexto de un mundo cada vez más complejo, Europa tiene que ser capaz de mejorar sus capacidades científicas al máximo nivel para lograr ser competitiva frente a Estados Unidos y frente a la fuerte emergencia que están experimentando los países asiáticos en general y China en particular. Pero, por otra parte, la Unión afronta este reto de competitividad internacional en un contexto de desigualdades internas extremas. En Europa coexisten algunas de las regiones más ricas y desarrolladas del mundo, con estructuras económicas avanzadas, fuertemente fundamentadas en conocimiento científico y tecnológico, con otras regiones poco desarrolladas y con estructuras económicas poco avanzadas y serios problemas institucionales. Resulta muy peligroso para el propio proyecto de integración europea que estas brechas continúen creciendo. Por lo tanto, la Unión tiene que usar todos los recursos que fomenten el crecimiento, y la Ciencia es uno de los principales, no solo para crecer sino también para tratar de reducir las desigualdades existentes. ¿Es posible diseñar un modelo científico en Europa que nos permita estar en la vanguardia mundial impulsando nuestra competitividad, pero reduciendo las desigualdades dentro de la Unión? Estas son las preguntas que inspiran este trabajo, que se estructura a través de tres objetivos principales.

El primer objetivo es reflexionar sobre el papel de la Ciencia en el crecimiento económico de los territorios, cuestión que se aborda en la siguiente sección (II). Para ello, se reflexiona primero sobre qué significa crecer y qué factores explican el crecimiento (apartado II.1) para luego profundizar en las limitaciones de la mayor parte de estos factores (apartado II.2) que nos lleva

a entender el papel clave de la investigación científica y el desarrollo tecnológico en el crecimiento de largo plazo (apartado II.3). Este preámbulo nos permite, por fin, abordar las teorías modernas del crecimiento económico, que ponen el acento en la importancia de las características de cada lugar para extraer el máximo potencial de la Ciencia como motor de desarrollo y crecimiento (apartados II.4 y II.5).

Esta idea de la importancia de las características de cada territorio en la comprensión de la relación entre Ciencia y crecimiento nos conduce al segundo objetivo del artículo: comprender la relación entre la Ciencia y las desigualdades entre territorios. Esto es lo que se aborda en la sección III. Primero se hace una reflexión general de como la Ciencia afecta a las desigualdades entre territorios a través del componente endógeno (apartado III.1) para luego abordar las estructuras y políticas qué se pueden implementar para optimizar el efecto de la Ciencia sobre el territorio (apartado III.2).

Una vez que el marco teórico se ha situado en las secciones II y III, la sección IV aborda el tercer objetivo: comprender la complejidad de la evaluación del papel de la Ciencia en el crecimiento y cómo esta evaluación no puede ceñirse a analizar el desempeño de los científicos o de las instituciones de investigación, sino que debe medir esencialmente la interrelación entre la investigación científica y su entorno. Así, el apartado IV.1 se dedica a revisar cómo se evalúa el desempeño de los científicos o los grupos y centros de investigación. En relación con ello, en el apartado IV.2, se explica el papel de los organismos de evaluación académica, con una mención especial a la ANECA. En el apartado IV.3 se hace una reflexión específica sobre la evaluación de las universidades explicando, en particular, como funcional el *ranking* de Shanghái. Pero es en el apartado IV.4 donde, apoyados en la revisión de teorías hecha en las secciones previas, defendemos la idea de que una evaluación integral de la Ciencia pasa por evaluar la interrelación de esta con su entorno territorial. Para ello, ilustramos esta reflexión con algunos ejemplos de trabajos específicos desarrollados en la Cátedra SEKUENS para el análisis de la innovación, proyecto financiado por el Principado de Asturias, a través de la agencia SEKUENS, y desarrollado por la Universidad de Oviedo, a través del Laboratorio de Análisis Económico Regional (REGIO*lab*) (apartado IV.5).

Terminamos el artículo con un resumen final y algunas consideraciones de política económica y política científica en una sección final (sección V) de conclusiones.

II. CIENCIA Y CRECIMIENTO ECONÓMICO

II.1. FACTORES DEL CRECIMIENTO ECONÓMICO Y EL PAPEL FUNDAMENTAL DE LA CIENCIA

Definimos el crecimiento económico como el aumento sostenido de la capacidad de producción de bienes y servicios de un territorio durante un periodo de tiempo, lo que suele medirse a través del incremento del Producto Interior Bruto (PIB). En otras palabras, implica que una economía es capaz de producir más riqueza con el paso del tiempo, ya sea porque dispone de más recursos, los utiliza de forma más eficiente o incorpora nuevas tecnologías y conocimientos. Este crecimiento no solo se refleja en mayores niveles de producción, sino también en la mejora potencial del nivel de vida de la población.

El crecimiento económico de los territorios se explica por la combinación de varios factores fundamentales que actúan de manera interrelacionada. En primer lugar, destacan los factores productivos básicos, como el capital físico, el trabajo y los recursos naturales. Por ejemplo, una región con buenas infraestructuras de transporte (carreteras, puertos o aeropuertos) y acceso a energía fiable facilita la actividad empresarial y reduce costes. Asimismo, la disponibilidad de mano de obra y de recursos naturales —como ocurre en territorios con riqueza minera o agrícola— proporciona una base inicial para el desarrollo.

En segundo lugar, el capital humano es un elemento clave, ya que el nivel educativo y las competencias de la población influyen directamente en la productividad. Territorios con sistemas educativos sólidos, universidades de calidad o programas de formación profesional —como los que fomentan habilidades digitales o técnicas— suelen atraer empresas más avanzadas y generar empleo de mayor valor añadido.

Un tercer factor fundamental es la calidad de las instituciones y del gobierno. Por ejemplo, países con marcos legales estables, respeto a la propiedad privada y administraciones eficientes tienden a atraer más inversión, tanto nacional como extranjera. En cambio, la corrupción o la inseguridad jurídica suelen frenar el desarrollo económico.

En cuarto lugar, la apertura económica y la integración en los mercados internacionales permiten a los territorios crecer aprovechando el comercio exterior. Por ejemplo, regiones exportadoras de bienes industriales o agrícolas pueden ampliar sus mercados más allá de sus fronteras, mientras que la llegada de inversión extranjera puede aportar capital, empleo y conocimiento.

Todos factores son fundamentales para entender el crecimiento, pero están limitados en el largo plazo. Si queremos que ese crecimiento se pueda mantener en el tiempo el combustible fundamental que es capaz de hacerlo es la innovación y el desarrollo científico y tecnológico. Si apoyamos el crecimiento solo en los factores anteriores en algún momento su efecto acaba agotándose. Solo la capacidad de generar y aplicar nuevos conocimientos permite mejorar la eficiencia, crear nuevos productos o nuevas formas de producir y/o organizarse gracias a lo que se puede sostener el crecimiento y progreso a largo plazo.

Es decir, la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación desempeñan un papel especial en el crecimiento económico porque son el principal motor del aumento de la productividad a largo plazo. Por un lado, la investigación científica genera nuevos conocimientos que permiten desarrollar tecnologías más avanzadas. Estas innovaciones hacen posible producir más con los mismos recursos o producir lo mismo de forma más eficiente. Por ejemplo, los avances en informática han permitido automatizar procesos, reducir costes y mejorar la calidad de los productos. Por otro lado, la Ciencia impulsa la creación de nuevos sectores económicos. Ámbitos como la biotecnología, la inteligencia artificial o las energías renovables surgen directamente de la investigación científica, generando empleo cualificado y nuevas oportunidades de negocio. Además, la innovación favorece la competitividad de los territorios. Las empresas que invierten en Ciencia y Tecnología pueden

diferenciarse, mejorar sus productos y acceder a mercados internacionales con mayor facilidad. Esto atrae inversiones y talento, reforzando el crecimiento económico. En definitiva, mientras otros factores explican el crecimiento a corto o medio plazo, la Ciencia es el elemento que permite mantenerlo de forma sostenida, ya que impulsa cambios estructurales, transforma la economía y sienta las bases del progreso futuro.

Dado que comprender en profundidad porque la Ciencia es tan importante en el crecimiento de los territorios es uno de los objetivos principales de este trabajo debemos profundizar y formalizar un poco mas esta idea, para lo que recurriremos a los modelos económicos del crecimiento, en particular al modelo neoclásico de Solow (1956) y a sus actualizaciones mas recientes.

II.2. LIMITACIONES DE LOS FACTORES DEL CRECIMIENTO: LOS RENDIMIENTOS MARGINALES DECRECIENTES Y EL MODELO DE SOLOW

Todos los componentes del crecimiento resumidos en el apartado anterior, incluida la investigación científica y el desarrollo tecnológico, inciden en un aspecto clave: el aumento de la productividad. El crecimiento absoluto no es el verdaderamente relevante. Si para aumentar la producción total hemos tenido que incrementar el empleo total en una proporción similar, la producción per cápita no habrá aumentado y, por lo tanto, no se habrá producido una auténtica mejora del bienestar total. El crecimiento verdaderamente valioso es aquel en el que el aumento de la producción es significativamente superior al aumento del volumen de trabajo (Baumol, 1986). Dicho de otro modo, para que el crecimiento de un país o región se traduzca en una auténtica mejora del bienestar total —que es lo que buscamos realmente conseguir— se requiere que aumente la producción en una proporción mayor que el aumento del trabajo empleado.

Matemáticamente, la productividad se expresa como $y=Y/L$, donde Y es el volumen total de producción y L el volumen total de trabajo. Aumentará y, la productividad, cuando el incremento de la producción (Y) sea superior al aumento del trabajo (L).

La pregunta que surge inmediatamente es: ¿cómo se puede aumentar de modo sostenido y continuado la productividad para conseguir un crecimiento económico per *cápita* que se traduzca en un aumento del bienestar total?

Para desarrollar su labor, los trabajadores requieren herramientas, maquinaria, tecnologías o infraestructuras. Esto es lo que en Ciencia Económica se denomina, de modo genérico, 'capital'. Podemos definir el capital —denotado habitualmente con la letra K— como el conjunto de recursos que una persona o empresa utiliza para generar valor, producir bienes y servicios y obtener un beneficio económico. Todo proceso productivo se apoya en dos factores productivos que se combinan: el trabajo (L) y el capital (K).

Cuantos mayores sean los recursos de los que dispone un trabajador, es decir, la 'dotación de capital por trabajador' $(k=K/L)$, mayor será su productividad (y). Imaginemos un trabajador que tiene que arar un campo y dispone para ello de unas pocas herramientas básicas. Es evidente que, al disponer de una baja dotación de capital para desempeñar su trabajo, su productividad será muy limitada. Pero si ese mismo trabajador pasa a estar equipado con maquinaria avanzada y abundantes herramientas sofisticadas, su productividad se incrementará de manera extraordinaria. Aumentar la dotación de capital por trabajador es la primera fuente para experimentar aumentos de productividad y, a través de ello, conseguir crecimiento per cápita y mejora del bienestar total.

Sin embargo, es sencillo comprender que el crecimiento económico basado en incrementos de las dotaciones de capital por trabajador tiene un límite. Es lo que en Economía se conoce como 'rendimientos marginales decrecientes del capital'. El economista estadounidense Robert Solow formalizó matemáticamente la relación entre la dotación de capital por trabajador (k), la productividad (y) y el crecimiento en su obra *Una contribución a la teoría del crecimiento económico*, publicada en 1956 (Solow, 1956), por la que recibió el Premio Nobel de Economía en 1987.

La Figura 1, tomada del modelo de Solow, nos sirve para ilustrar la idea de cómo los rendimientos marginales decrecientes del capital acaban por anular la capacidad de crecer en el largo plazo únicamente a base de aumentar las dotaciones de capital. En el eje de abscisas (eje horizontal) se recoge la dotación de capital por trabajador $(k=K/L)$. A medida que avanzamos por ese eje, se incrementa dicha dotación. En el eje de ordenadas (eje vertical) se representa la productividad del trabajo $(y=Y/L)$, de modo que, según ascendemos, se indican mayores niveles de producción por trabajador. Las curvas recogidas en la figura representan la relación entre la dotación de capital por trabajador (k) y la productividad (y), asumiendo que existen rendimientos marginales decrecientes del capital.

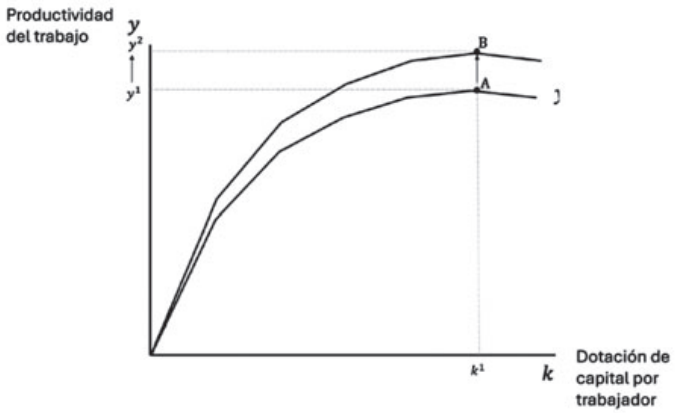


Figura 1. Representación de la relación entre dotación de capital por trabajador (k=k/l) y productividad (y=y/l) asumiendo rendimientos marginales decrecientes del capital (*Adaptado a partir de solow, 1956*).

Nos fijaremos por ahora solo en la curva que contiene el punto A, sin prestar atención, por el momento, a la que está por encima y que contiene el punto B. Lo que nos indica la forma creciente a ritmo decreciente de esta curva es que los primeros incrementos en la dotación de capital por trabajador producen un gran efecto en términos de productividad: cuando dotamos de las primeras herramientas y maquinaria a un trabajador que apenas dispone de ellas, su productividad se incrementa notablemente. Pero hay un punto, el punto k^1, en el que el efecto del capital se satura y nuevos incrementos de la dotación de capital por trabajador pasan a producir aumentos de productividad muy moderados. Este punto k^1 es lo que Solow denomina 'estado estacionario': el

momento en que la capacidad de crecer a base de aumentos en la dotación de capital por trabajador se agota, entrando en una fase de estancamiento económico.

Aunque hemos centrado nuestra atención en la dotación de capital entendamos que de modo similar pasaría lo mismo con otros factores del crecimiento. El capital humano, la cualificación de los trabajadores o de la población en general, contribuye a crecer. Pero en un determinado momento un mayor número de graduados universitarios, de doctores, de técnicos acabaría por saturar las necesidades y entrar en similares rendimientos decrecientes. Lo mismo pasa si mejoramos nuestras instituciones y estructuras sociales. Y sin impulsar la productividad no se puede aumentar la competitividad en mercados internacionales. Al final casi todas de las vías acaba agotando su capacidad de impulsar crecimiento en el largo plazo… afortunadamente todas menos una.

¿Cómo escapar a este estancamiento o estado estacionario para seguir creciendo? Aquí es donde por fin aparece en escena el concepto clave del 'cambio tecnológico'.

II.3. EL CAMBIO TECNOLÓGICO BASE DEL CRECIMIENTO ECONÓMICO SOSTENIDO EN EL TIEMPO

Una vez que se entra en la fase de rendimientos marginales decrecientes del capital, cuando la curva que relaciona la dotación de capital por trabajador (k) con la productividad (y) entra en su fase creciente a ritmo decreciente, la única manera de evitar el estancamiento es experimentar 'cambio tecnológico'. Definimos el cambio tecnológico como la incorporación de nuevas tecnologías o avances científicos que amplían la capacidad productiva para un determinado volumen de capital y trabajo.

En términos de la Figura 1, el cambio tecnológico consiste en la generación de una nueva relación, es decir, una nueva curva en la que, para las mismas dotaciones de capital por trabajador, se consiguen mayores niveles de productividad: la curva desplazada hacia arriba y que contiene el punto B. Al saltar a esta nueva relación conseguimos crecer y se vuelve a dotar al capital de una renovada capacidad para seguir impulsando la productividad, hasta que volvemos a llegar a un nuevo estado estacionario del que solo podemos escapar con nuevos progresos científicos. El cambio tecnológico tiene que ser continuado para fomentar un crecimiento de largo plazo. Sobre la Ciencia recae así la responsabilidad de generar avances continuados que estimulen saltos sucesivos en las relaciones entre capital y productividad.

El cambio tecnológico puede consistir en una nueva tecnología o en una nueva forma de organización, puede afectar al proceso de producción o ser una innovación organizativa, o significar un producto totalmente nuevo. Pero la esencia del concepto de cambio tecnológico es que permite romper el límite que imponían los rendimientos marginales decrecientes del capital mediante una modificación de la relación entre capital y trabajo que implica un aumento de la productividad.

Un ejemplo de cambio tecnológico es la llegada de los teléfonos móviles inteligentes. Estos dispositivos nos permiten realizar tareas de un modo mucho más eficiente, reformulando el modo de trabajar, organizarse o producir. Un teléfono inteligente contiene una acumulación de avances científicos y tecnológicos que van desde los satélites y toda la tecnología necesaria para ponerlos en órbita, hasta los componentes y materiales que se usan en el propio dispositivo, pasando por extraordinarios avances en la ingeniería de programación. La acumulación de conocimientos científicos y desarrollos tecnológicos necesaria para disponer de un teléfono inteligente es impresionante. Pero lo es aún más toda la transformación productiva y, por lo tanto, todo el crecimiento *per cápita* y la mejora del bienestar que luego logra generar ese dispositivo.

Este sencillo ejemplo del teléfono inteligente nos permite percibir cómo, para que se genere un cambio tecnológico relevante, es necesario que se produzca una gran acumulación de progreso científico en múltiples áreas de la Ciencia y la ingeniería. En el corto y medio plazo se puede crecer a base de aumentar el capital por trabajador, pero en el largo plazo solo es posible crecer a base de acumular conocimiento y progreso científico. La Ciencia, la Tecnología y el crecimiento económico capaz de generar mejoras del bienestar total están indisolublemente unidos en el largo plazo. La conclusión es clara: si queremos mejorar la calidad de vida de un país o región, tenemos que hacer una decidida apuesta por impulsar la Ciencia y la Tecnología como motores del cambio tecnológico.

II.4. LA PREGUNTA CLAVE: ¿CÓMO APROVECHAR EL POTENCIAL DE LA CIENCIA COMO MOTOR DE CRECIMIENTO?

Sabiendo lo importante que es el progreso científico y tecnológico, surge la pregunta clave: ¿cómo se puede conseguir un desarrollo científico y tecnológico que genere continuos cambios tecnológicos? Hay dos respuestas a esta pregunta: la respuesta fácil y rápida y la respuesta compleja que requiere profundizar en algunos conceptos adicionales.

Empecemos por la respuesta fácil. Es obvio que, si se quiere impulsar la capacidad científica y tecnológica de un lugar —ya sea un país o una región—, simplemente hay que invertir más en investigación científica y desarrollo tecnológico, lo que se conoce por el acrónimo I+D. Si aumentamos el dinero, público y privado, que se destina a investigar y desarrollar tecnologías —más I+D, en definitiva—, se aumentarán las posibilidades de experimentar cambios tecnológicos sobre los que se vaya apoyando el crecimiento y la competitividad del territorio.

Esta respuesta es rápida y sencilla de entender y, además, es completamente cierta. De ella se deduce la primera recomendación de política económica: invertir más en I+D. Pero hay que entender que la relación entre la inversión en I+D y el cambio tecnológico no es lineal. Hay ocasiones en las que se invierte mucho y se consiguen resultados muy pobres en términos de crecimiento —porque se logra rentabilizar poco la inversión—, y otras veces, con menos esfuerzo presupuestario, se logran más resultados. ¿Por qué? Esto es lo que necesariamente nos lleva a la respuesta más compleja, para la que necesitamos comprender una idea adicional: el carácter endógeno del cambio tecnológico.

II.5. ENDOGENEIDAD DEL CAMBIO TECNOLÓGICO

Solow pensaba que el cambio tecnológico era exógeno. Es decir, se producía de manera externa al propio proceso productivo, vinculado únicamente al esfuerzo de inversión en

I+D que se realizara. Sin embargo, varios autores destacados han ido comprendiendo el carácter endógeno del cambio tecnológico que significa que la probabilidad de que se produzca depende de características intrínsecas del propio sistema productivo de cada lugar.

Paul Romer, premio Nobel de Economía en 2018, es uno de los economistas más destacados de las nuevas teorías del crecimiento. En 1990 publicó su trabajo *Cambio tecnológico endógeno* (Romer, 1990), donde postula que el cambio tecnológico sostenido surge a partir de la inversión en investigación y desarrollo (I+D), pero combinado con elementos endógenos del propio sistema productivo, tales como incentivos de mercado, estructuras empresariales o, entre otros, factores sociales e institucionales. Es decir, la probabilidad de que un país o región experimente un cambio tecnológico relevante en términos de crecimiento económico depende tanto del esfuerzo en inversión en I+D como de factores jurídicos, institucionales y sociales, así como de las estructuras y características empresariales del país o región.

Imaginemos un caso extremo de un país donde no se protege adecuadamente la propiedad intelectual. En esas circunstancias, decaen los incentivos privados a invertir en investigación científica, ya que, si se logra un resultado valioso, este podría ser copiado por otras empresas debido a la falta de una adecuada protección jurídica. Si en ese país se impulsa la inversión pública en I+D, desarrollando un fuerte sistema científico, seguramente la capacidad científica logre progresar, pero la traducción de esta en resultados económicos —en cambio tecnológico generador de crecimiento— es probable que no experimente grandes mejoras. Para que el esfuerzo científico tenga resultados en términos de crecimiento es necesario que exista un ecosistema propicio: empresas innovadoras en sectores intensivos en conocimiento y/o tecnología que aprovechen los avances científicos, una regulación adecuada que proteja a empresarios y científicos, una apreciación social de la ciencia que estimule a los científicos y atraiga hacia el sistema innovador a las mentes más destacadas, o incentivos a las empresas para promover y desarrollar la investigación en su actividad.

Volviendo a la pregunta con la que terminábamos la sección anterior, ¿cómo aprovechar todo el potencial de la Ciencia como motor de crecimiento?, la idea de la endogeneidad del cambio tecnológico nos permite entender la respuesta más compleja: no basta con invertir más en Ciencia y desarrollo tecnológico (aumentar la inversión en I+D), sino que es necesario desarrollar ecosistemas empresa Ciencia capaces de transformar el progreso científico en productos comercializables o procesos de producción generadores de valor. En ausencia de todo ese contexto óptimo, puede ocurrir que, aun aumentando la inversión en I+D, no se logren generar efectos sobre el crecimiento de nuestra economía o la competitividad de nuestras empresas.

El conjunto de elementos que interactúan creando un contexto adecuado para explotar todo el potencial de la Ciencia es amplísimo. Años después de que Romer, entre otros, destacase el carácter endógeno del cambio tecnológico, seguimos comprendiendo nuevos elementos que contribuyen a que la inversión en I+D dé mejores resultados. Por eso es muy importante investigar sobre cómo funciona la Ciencia, y hacerlo no mirando solo a la propia Ciencia, sino a todo su entorno social, institucional y empresarial. Sobre esta idea volveremos en la sección IV, al hablar de la evaluación de la Ciencia. Pero antes debemos entender una derivada adicional que produce el hecho de que el cambio tecnológico tenga esta dimensión endógena. Esto es lo que vamos a ver en la siguiente sección, dedicada a la relación entre Ciencia y territorio.

III. CIENCIA Y TERRITORIO

III.1. ¿PUEDE LA CIENCIA GENERAR DESIGUALDADES ESPACIALES?

En la sección anterior hemos visto el aspecto más positivo, desde el punto de vista económico, de la Ciencia: la acumulación de conocimiento científico impulsa el cambio tecnológico, que es el que, a su vez, posibilita crecer en el largo plazo —más allá del punto donde el efecto de la dotación de capital por trabajador se agota—. Sin embargo, la última idea con la que terminábamos la sección anterior —la idea de la endogeneidad del cambio tecnológico— abre una puerta peligrosa: el hecho de que la investigación científica pueda producir efectos económicos diferentes en función de las características endógenas de carácter productivo, institucional o social de cada territorio implica que la Ciencia —incluso si la inversión en I+D fuera idéntica en todos los lugares— puede acabar produciendo desigualdades entre territorios. Es decir, dicho de otro modo, aunque la Ciencia indudablemente es fuente del crecimiento a largo plazo, también puede contribuir a generar desigualdades espaciales.

Además, es fácil intuir que aquellas regiones más ricas y desarrolladas son las que, normalmente, presentan empresas de alto desarrollo tecnológico, mejores infraestructuras, mayor abundancia de trabajadores altamente cualificados e instituciones más sólidas. Por lo tanto, teniendo en cuenta la endogeneidad del proceso de cambio tecnológico, es previsible que las regiones más avanzadas sean también las que más provecho puedan obtener del esfuerzo en I+D. Por el contrario, las regiones menos desarrolladas son las que probablemente presenten peores condiciones endógenas para aprovechar el efecto de invertir en I+D. Siendo esto así, es fácil concluir que la Ciencia y su desarrollo tecnológico o innovador pueden contribuir a agrandar las brechas entre territorios más ricos y desarrollados y territorios más pobres y menos avanzados (Feldman, 1994).

Este aspecto resulta especialmente relevante en el caso de la Unión Europea. Europa es muy heterogénea en términos de desarrollo económico: contiene regiones muy ricas y avanzadas en el centro del continente —el eje que conecta Londres, París, Berlín y Milán—, pero, al mismo tiempo, contiene otras regiones muy atrasadas con respecto a la media de la Unión, ubicadas en la periferia este o sur. Las condiciones endógenas del centro más desarrollado son óptimas para facilitar el cambio tecnológico al más alto nivel. Por el contrario, en la periferia este y sur se dan realidades sociales, institucionales o de estructura productiva poco apropiadas para generar las condiciones endógenas adecuadas para que la Ciencia desarrolle todo su potencial. ¿Cómo se puede evitar que la Ciencia se convierta en un generador de mayores brechas espaciales en la Unión dadas estas condiciones? La manera ideal de compensar la mayor probabilidad de generar cambio tecnológico en las regiones más avanzadas es realizar un mayor esfuerzo de inversión en I+D en la periferia menos

desarrollada. Si un euro invertido en Ciencia puede producir efectos mayores en las regiones más avanzadas, el modo de compensar este efecto sería mediante una intensificación de la inversión en las regiones menos avanzadas.

La Figura 2 muestra la distribución de la inversión en I+D de cada región, expresada en porcentaje sobre su Producto Interior Bruto (PIB), a lo largo de la geografía europea. Como se puede observar, salvo excepciones concretas como algunas regiones nórdicas, las regiones más avanzadas consiguen acumular una mayor inversión en I+D que las regiones más rezagadas de la periferia. Es decir, ocurre justo lo contrario: la Europa más avanzada —con mejores condiciones endógenas para aprovechar el potencial de la Ciencia— es la que más invierte en I+D, mientras que la Europa menos avanzada —que debería realizar un mayor esfuerzo científico y tecnológico— es la que menor esfuerzo de inversión en I+D lleva a cabo. Bajo estas condiciones, es previsible que la Ciencia contribuya a agrandar las brechas entre territorios (Rodríguez Pose y Crescenzi, 2008).

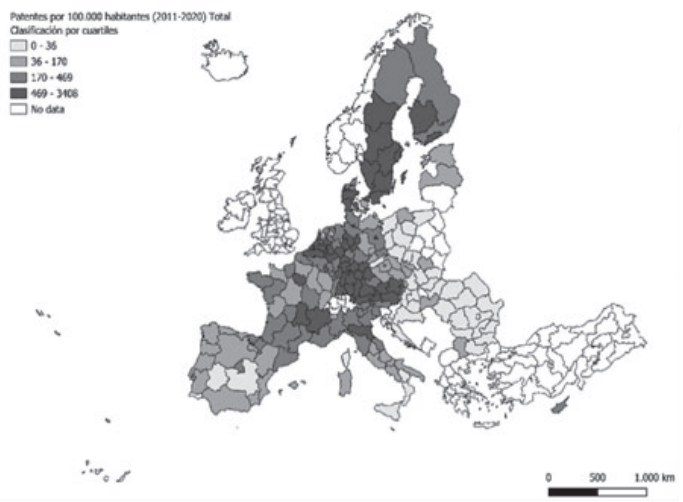


Figura 2. Esfuerzo de inversión en i+d por regiones europeas: inversión en i+d de cada región sobre su producto interior bruto (pib), 2020.
(*Datos procedentes de eurostat, representación de las regiones en las que existe información homogénea*).

Realmente, la Unión Europea se enfrenta a un dilema complejo en torno a la Ciencia. Por una parte, es evidente que esta es un instrumento de crecimiento y competitividad (véase todo lo apuntado en la sección II). Si queremos ser competitivos con Estados Unidos, China u otras economías emergentes, necesitamos realizar esfuerzos significativos de inversión en I+D. En ese caso, lo eficiente es concentrar los esfuerzos en las regiones y países que tengan mejores condiciones endógenas para aprovechar todo el potencial de la inversión científica y/o tecnológica. Pero, si hacemos esto, la brecha entre la Europa rica y desarrollada y la Europa pobre, que se queda atrás, se irá incrementando. Al final, las desigualdades territoriales pueden llegar a ser tan grandes que acaben por desmoronar desde dentro el propio proyecto de integración europea. Si, por el contrario, nuestro objetivo pasa a ser utilizar la Ciencia para que las regiones y países más atrasados converjan con los más desarrollados, tendríamos que invertir preferentemente en las regiones menos desarrolladas. Pero esta estrategia, que sería muy valiosa desde el punto de vista de la reducción de desigualdades, podría ocasionar que la capacidad de la Unión para experimentar cambio tecnológico se reduzca, perdiendo la carrera por la innovación y la competitividad con otros países o continentes (Rubiera y Fernández, 2023).

La Unión Europea trata de resolver este dilema, de difícil solución, combinando ambos objetivos. Los Programas Marco de I+D de la Unión Europea, como el actual Horizonte Europa, buscan optimizar el esfuerzo en Ciencia priorizando la inversión en los centros de excelencia, normalmente ubicados en las regiones más desarrolladas. Pero, al mismo tiempo, tratan de apoyar a las regiones menos desarrolladas priorizando las propuestas que integren un cierto equilibrio espacial y que incorporen centros y regiones menos avanzadas. Junto con convocatorias que premian básicamente la excelencia y la capacidad para generar el máximo cambio tecnológico, se ponen en marcha otras convocatorias que buscan desarrollar las capacidades científicas de los territorios e instituciones más atrasadas. El equilibrio entre la competitividad global de Europa y la reducción de las desigualdades no es fácil, y el éxito en la consecución de ambos objetivos no siempre es posible.

III.2. ESTRUCTURAS FUNDAMENTALES PARA IMPULSAR ENDÓGENAMENTE EL PAPEL DE LA CIENCIA DESDE LOS TERRITORIOS

La investigación científica raramente produce sus efectos económicos de forma aislada. Por el contrario, los mejores resultados suelen obtenerse cuando científicos, empresas, emprendedores e instituciones interactúan de manera continuada dentro de un mismo entorno. La proximidad geográfica facilita la circulación de información, la formación de redes de colaboración y la aparición de procesos de aprendizaje colectivo que aumentan la probabilidad de transformar el conocimiento científico en innovación y crecimiento económico. Esta circunstancia ayuda a explicar por qué determinados territorios son capaces de aprovechar mucho mejor la inversión en investigación científica y desarrollo tecnológico que otros.

Uno de los mecanismos más importantes a través de los cuales se produce esta interacción son los clústeres de conocimiento. Un clúster puede definirse como una concentración geográfica de empresas, universidades, centros de investigación e instituciones especializadas que operan en ámbitos tecnológicos o productivos relacionados. La existencia de un clúster genera economías de aglomeración que facilitan la innovación. Las empresas tienen acceso a trabajadores altamente cualificados, los investigadores pueden colaborar de forma más sencilla con el sector productivo y las nuevas ideas se difunden con rapidez entre los distintos agentes. En estos contextos el conocimiento producido por universidades y centros de investigación encuentra más fácilmente vías para su aplicación práctica, aumentando la probabilidad de generar cambios tecnológicos relevantes. Ejemplos paradigmáticos son Silicon Valley en Estados Unidos, la región de Cambridge en el Reino Unido o diversos clústeres industriales y tecnológicos del centro de Europa.

Los centros tecnológicos constituyen otra pieza fundamental de estos ecosistemas territoriales de innovación. A diferencia de las universidades, cuya misión principal es la generación y

transmisión de conocimiento científico, los centros tecnológicos suelen orientarse a la investigación aplicada y a la transferencia de tecnología hacia las empresas. Su función consiste en actuar como puente entre el mundo científico y el productivo, ayudando a transformar resultados de investigación en nuevos productos, procesos o servicios. En muchas ocasiones proporcionan a las pequeñas y medianas empresas capacidades tecnológicas que estas no podrían desarrollar por sí mismas debido a sus limitados recursos. Por ello, los territorios que disponen de una red sólida de centros tecnológicos suelen mostrar una mayor capacidad para convertir el esfuerzo científico en innovación empresarial y crecimiento económico.

Junto a los clústeres y centros tecnológicos, los parques científicos y tecnológicos desempeñan un papel cada vez más relevante en las estrategias de desarrollo regional. Estos espacios buscan concentrar físicamente universidades, centros de investigación, empresas innovadoras y servicios avanzados en un mismo entorno, facilitando la cooperación y el intercambio de conocimiento. Su objetivo no es únicamente proporcionar infraestructuras de calidad, sino construir un ecosistema favorable a la innovación. Los parques científicos suelen albergar empresas de base tecnológica surgidas de las propias universidades, conocidas como spin-offs, así como empresas innovadoras que buscan beneficiarse de la proximidad al conocimiento científico. De este modo, contribuyen a acelerar los procesos de transferencia tecnológica y a fortalecer las conexiones entre Ciencia y mercado.

La importancia de estas estructuras radica en que permiten reforzar precisamente aquellos factores endógenos que, según las teorías modernas del crecimiento, condicionan la capacidad de un territorio para aprovechar la inversión en I+D. Una región que cuenta con universidades de calidad, centros tecnológicos activos, clústeres empresariales dinámicos y parques científicos bien conectados posee mayores probabilidades de transformar los avances científicos en innovación, productividad y crecimiento. Por el contrario, en territorios donde estas conexiones son débiles, el conocimiento generado puede no llegar a incorporarse eficazmente al tejido productivo, limitando el impacto económico de la inversión científica.

Esta realidad ayuda a comprender mejor por qué la Ciencia puede contribuir simultáneamente al crecimiento y a las desigualdades territoriales. Los clústeres de conocimiento, los centros tecnológicos y los parques científicos tienden a concentrarse en las regiones más avanzadas, donde ya existen empresas innovadoras, capital humano altamente cualificado e instituciones sólidas. Como consecuencia, estas regiones reúnen unas condiciones especialmente favorables para aprovechar el progreso científico y tecnológico, mientras que los territorios menos desarrollados encuentran mayores dificultades para construir ecosistemas de innovación comparables. De este modo, las fuerzas de aglomeración asociadas al conocimiento pueden reforzar las ventajas competitivas de los territorios líderes y ampliar las brechas existentes, salvo que las políticas públicas intervengan para fortalecer las capacidades científicas y tecnológicas de las regiones rezagadas.

En relación con esto, la Ley 1/2025 de Ciencia, Tecnología e Innovación del Principado de Asturias configura el Sistema Asturiano de Ciencia, Tecnología e Innovación (SACI) e impulsa la colaboración entre universidades, centros tecnológicos, parques científicos, empresas y administraciones públicas. Resulta especialmente relevante que esta ley otorgue un papel destacado a todas estas estructuras científicas e innovadoras. Esta visión coincide plenamente con las teorías contemporáneas del crecimiento económico, que subrayan la importancia de los ecosistemas territoriales de innovación y de los factores endógenos en la generación de cambio tecnológico.

Todo lo visto hasta ahora nos ayuda a comprender por qué es tan importante, al tiempo que difícil, evaluar el papel de la Ciencia sobre el crecimiento. ¿Qué evaluamos exactamente?: ¿el puro rendimiento científico?, ¿el efecto sobre el crecimiento agregado? o ¿el efecto sobre las desigualdades entre territorios? Trataremos de responder a todo ello en la siguiente sección en la que abordamos el tercer objetivo que planteamos en la introducción.

IV. LA EVALUACIÓN DE LA CIENCIA

IV.1. EVALUACIÓN DIRECTA DEL DESEMPEÑO DEL CIENTÍFICO Y LA INSTITUCIÓN INVESTIGADORA

Cuando hablamos de evaluar la Ciencia, podemos estar refiriéndonos a cosas muy diversas que, en realidad, abordan objetivos diferentes. Lo primero que podemos querer analizar es el desempeño del científico, del grupo de investigación o de la institución investigadora —ya sea un centro de investigación, un instituto científico o una universidad—. Para ello se usan indicadores referidos a los dos principales *outputs* del proceso investigador: las publicaciones científicas y/o las patentes o registros de propiedad intelectual similares.

El desarrollo de una investigación científica conduce al *output* final de una 'publicación científica', donde se muestran al resto de la comunidad científica las conclusiones y avances obtenidos. Existen repositorios internacionales de revistas científicas que garantizan el cumplimiento de unos criterios más o menos exigentes de calidad científica —como *Web of Science*—. Pero, además, existen indicadores del número de veces que cada trabajo es citado en otros trabajos, lo que permite medir el impacto de cada publicación en términos de citas con una precisión extraordinaria. Con ello se construyen índices de impacto, como el *impact factor* del *Journal Citation Reports* (IF JCR), un informe anual elaborado por Clarivate Analytics, basado en los datos de *Web of Science*, donde se contabilizan las citas entre publicaciones científicas. Con esta información se elaboran *rankings* de las revistas. Una vez que tenemos clasificadas las revistas científicas en dichos *rankings*, podemos evaluar la actividad de un científico, un grupo de investigación o una institución a través del número de publicaciones y del impacto o posición de las revistas en las que se realizan dichas publicaciones.

Evidentemente, esta evaluación, como todas, tiene límites. Un científico puede tener un gran impacto en términos de publicaciones y de citas por parte de otros colegas sin que los resultados de su trabajo sean realmente útiles en su entorno (nacional o regional), por diversas razones. Por eso, las evaluaciones de los científicos se suelen complementar teniendo en cuenta los proyectos obtenidos o, entre otros indicadores, el conjunto de actividades de transferencia y formación que

realizan. No obstante, y aunque puede haber excepciones, normalmente un científico con muchas publicaciones en revistas de alto impacto suele tener una notable influencia académica y social.

Aparte de las publicaciones, en los campos más aplicados el objetivo final del proceso de investigación puede concretarse en un producto, proceso o modelo nuevo. En esos ámbitos, el *output* final no es solo la publicación científica, sino también la 'patente'. La patente es un derecho que se concede a una persona o empresa para explotar en exclusiva una invención durante un tiempo determinado —normalmente 20 años—. A cambio, el inventor debe explicar públicamente cómo funciona su invento en un registro. En la medida en que la patente queda recogida en dicho registro, se dispone de información sobre la misma que puede ser utilizada para evaluar investigadores, centros o instituciones.

La Figura 3 presenta el mapa europeo de distribución de patentes. Nos sirve a modo de ilustración, pero, sobre todo, para ratificar lo que apuntábamos en la sección III: el efecto de la Ciencia sobre las desigualdades territoriales. Se puede apreciar con claridad cómo las patentes no se distribuyen de modo homogéneo a lo largo de la geografía del continente. Lejos de ello, vemos cómo las regiones más ricas del centro y el norte de Europa acumulan un número de patentes por cada 100 mil habitantes muy superiores al que se registra en las regiones menos desarrolladas del este y el sur del continente.

Ya sea usando sólo publicaciones científicas —en ámbitos menos aplicados— o publicaciones y patentes —en ámbitos más aplicados— usando estos indicadores podemos evaluar con precisión el trabajo de investigadores, grupos o instituciones. Desde luego, para tener una evaluación justa debemos relacionar el número de publicaciones o patentes con el volumen de financiación, lo que nos da una medida más precisa de lo que llamaríamos 'eficiencia científica'.

IV.2. EL PAPEL DE LAS AGENCIAS DE EVALUACIÓN CIENTÍFICA Y ACADÉMICA

Aunque la aplicación de las métricas e índices de evaluación científica comentados en el apartado anterior no resulta



Figura 3. Distribución de las patentes en europa: patentes acumuladas entre 2011 y 2020 por cada 100 mil habitantes.
(Datos procedentes de la oficina internacional de patentes)

complicada, si que resulta necesario establecer prioridades, interpretar valores y conectarlos con los objetivos de la política científica ya sea regional, nacional o supranacional (Unión Europea).

En la mayoría de los países existen organismos especializados cuya función es diseñar y aplicar procedimientos de evaluación que permitan valorar la calidad de la investigación, la actividad docente y el desempeño de las instituciones científicas y universitarias. Estas entidades, habitualmente denominadas agencias de evaluación de la calidad científica, desempeñan un papel fundamental en los sistemas de Ciencia y Tecnología modernos.

Las agencias de evaluación cumplen diversas funciones. En primer lugar, establecen criterios y estándares de calidad que permiten valorar de forma homogénea la actividad investigadora y docente. En segundo lugar, participan en los procesos de acreditación y certificación de instituciones, titulaciones o programas universitarios. En tercer lugar, proporcionan información objetiva para la asignación de recursos públicos y para la toma de decisiones de política científica. Finalmente, contribuyen a reforzar la transparencia y la rendición de cuentas de las universidades y centros de investigación ante la sociedad.

La existencia de estas agencias responde a una necesidad cada vez más importante en sistemas científicos complejos y financiados en gran medida con recursos públicos: garantizar que la inversión en investigación y educación superior se realiza con criterios de calidad, excelencia y eficiencia. Para ello suelen combinar métodos cuantitativos, basados en indicadores de publicaciones, citas o captación de proyectos, con procedimientos cualitativos sustentados en la evaluación por pares expertos.

En el caso español, la institución más relevante es la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA), creada en 2002. La ANECA es un organismo público encargado de evaluar, acreditar y certificar la calidad del sistema universitario español. Entre sus funciones más conocidas destacan los programas de acreditación del profesorado universitario, necesarios para acceder a las diferentes figuras docentes permanentes, así como los procedimientos de evaluación de titulaciones, centros universitarios y sistemas internos de garantía de calidad.

La actividad de la ANECA tiene una influencia notable sobre las trayectorias profesionales de los investigadores y profesores universitarios. Sus evaluaciones se apoyan en evidencias objetivas relacionadas con la producción científica, la capacidad de transferencia, la experiencia docente y la gestión académica. De este modo, la Agencia trata de garantizar que las promociones y acreditaciones se fundamenten en criterios transparentes y comparables a escala nacional.

No obstante, la propia evolución de los sistemas de evaluación ha generado un intenso debate académico. Numerosos autores han señalado que una excesiva dependencia de indicadores bibliométricos puede incentivar comportamientos orientados a maximizar publicaciones o citas sin reflejar necesariamente la contribución real de la investigación al desarrollo económico y social. Por ello, en los últimos años tanto la ANECA como otras agencias internacionales han comenzado a incorporar enfoques más amplios que consideran aspectos como la transferencia de conocimiento, el impacto social de la investigación o la Ciencia 'abierta'.

Precisamente esta evolución de los sistemas de evaluación conecta con la tesis central defendida en este trabajo. Evaluar adecuadamente la Ciencia exige ir más allá de la mera medición de publicaciones o patentes y considerar también cómo el conocimiento generado se integra en el tejido económico y social, contribuyendo al crecimiento, la innovación y el desarrollo territorial. En este contexto, las agencias de evaluación constituyen una pieza esencial del sistema científico, aunque sus metodologías deben seguir adaptándose para captar de manera cada vez más completa el verdadero impacto de la actividad investigadora.

IV.3. UN APUNTE PARTICULAR SOBRE LA EVALUACIÓN DE LAS UNIVERSIDADES: EL RANKING DE SHANGHÁI

La evaluación de las universidades merece una atención especial. Las universidades no son solo centros de investigación, sino que cumplen una función fundamental de transmisión del conocimiento. Para evaluar correctamente su actividad deben tenerse en cuenta ambos aspectos mediante múltiples indicadores que van más allá del uso exclusivo de publicaciones o patentes. Se emplean indicadores relativos a la cantidad y calidad de los egresados o a la calidad del profesorado. Estos indicadores suelen integrarse en un índice sintético con el que es posible clasificar a las universidades en un ranking. El *ranking* de instituciones universitarias más utilizado es el *ranking* de Shanghái.

El *ranking* de Shanghái, conocido oficialmente como *Academic Ranking of World Universities (ARWU)*, es una clasificación internacional de universidades creada en 2003. A diferencia de otros *rankings*, no utiliza encuestas de reputación ni indicadores subjetivos, sino exclusivamente datos objetivos y verificables, lo que le otorga una gran estabilidad en el tiempo. Cada año analiza más de 2.500 universidades, aunque solo publica las 1.000 mejores.

El cálculo del *ranking* se basa en seis indicadores, agrupados en cuatro grandes dimensiones: (i) calidad de la educación, (ii) calidad del profesorado, (iii) producción científica y (iv) rendimiento per cápita. Estos indicadores tienen ponderaciones fijas: el 10 % corresponde a la calidad de la educación, el 40% a la calidad del profesorado, el 40% a la producción científica y el 10% restante al rendimiento ajustado por el tamaño de la institución. Dos indicadores evalúan premios de prestigio internacional: por un lado, los premios Nobel y las medallas Fields obtenidos por antiguos alumnos (10%) y, por otro, los obtenidos por el personal académico de la universidad (20%). A ellos se suma el número de investigadores altamente citados según Clarivate (20%), así como la producción científica medida a través de artículos publicados en revistas indexadas en *Web of Science* (40%). Finalmente, el indicador de rendimiento per cápita (10 %) relaciona los resultados obtenidos en los cinco indicadores anteriores con el número de profesores e investigadores, intentando corregir parcialmente el efecto del tamaño institucional. Cada indicador se normaliza tomando como referencia la universidad con mejor resultado, que recibe 100 puntos, y el resto se expresa como porcentaje relativo. El resultado final es un *ranking* muy conservador, que favorece a universidades grandes, consolidadas y con fuerte presencia en ciencias experimentales, y apenas refleja la calidad docente o el impacto social de la universidad.

La Tabla 1 recoge, a modo de ilustración, las veinte primeras universidades del *ranking* de Shanghái en el último informe publicado hasta la fecha (2026 con datos de 2025). Al observar el listado se constata cómo el *ranking* premia a instituciones con un fuertísimo componente investigador. Muchas universidades a lo largo del planeta desarrollan políticas para ascender en el *ranking* de Shanghái. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en el conjunto de indicadores con los que se construye el *ranking* no aparece ninguno que mida el impacto social de la institución o su contribución directa al desarrollo de su entorno nacional o regional. Es decir, el *ranking* es valioso para identificar las universidades 'top' del mundo, pero no es un instrumento adecuado para evaluar en qué medida contribuyen al crecimiento y al bienestar regional o nacional las pequeñas o medianas instituciones universitarias, como la Universidad de Oviedo.

Posición en el ranking mundial	Institución (país)	Puntuación en el indicador
1	Harvard University (EEUU)	100.0
2	Stanford University (EEUU)	80.2
3	Massachusetts Institute of Technology (EEUU)	74.1
4	University of Cambridge (Reino Unido)	70.5
5	University of California, Berkeley (EEUU)	64.5
6	Princeton University (EEUU)	63.1
7	University of Oxford (Reino Unido)	62.1
8	Columbia University (EEUU)	58.0
9	University of Chicago (EEUU)	57.2
10	California Institute of Technology (EEUU)	56.8
11	Yale University (EEUU)	55.1
12	Cornell University (EEUU)	51.8
13	Paris-Saclay University (Francia)	50.8
14	University of California, Los Angeles (EEUU)	50.2
14	University of Pennsylvania (EEUU)	50.2
16	University of Washington (EEUU)	49.6
17	University College London (Reino Unido)	49.4
18	Tsinghua University (China)	48.3
19	ETH Zurich (Suiza)	48.0
20	University of California, San Diego (EEUU)	46.4

Tabla 1. Listado de las 20 primeras universidades del ranking de shanghái (*Academic ranking of world universities, publicado en 2026 con datos de 2025*).

IV.4. EVALUACIÓN DEL PAPEL DE LA CIENCIA EN EL CRECIMIENTO ECONÓMICO

En los dos apartados previos hemos revisado cómo se evalúa la actividad del científico o de las instituciones investigadoras, con un apunte especial respecto a la evaluación de las universidades. A través de una serie de indicadores —relativos a la cantidad y calidad de las publicaciones científicas o, en los ámbitos

más aplicados, al número de registros de patentes— podemos comparar el desempeño de investigadores, grupos o instituciones de investigación. Sin embargo, todo ello evalúa solo la acción del científico en su tarea de generar conocimiento, pero no mide en qué medida ese conocimiento generado se logra transformar en desarrollos empresariales o aplicaciones económicas y sociales que generen crecimiento económico y/o mejora del bienestar. Si el objetivo de nuestra evaluación es identificar en qué medida la inversión en Ciencia y desarrollo tecnológico contribuye finalmente a crecer y vivir mejor, es necesario ir más allá en el procedimiento de evaluación.

Para evaluar cómo la Ciencia contribuye al crecimiento económico necesitamos medir cómo el esfuerzo en inversión científica se traduce en aumentos de productividad o de renta per cápita. Esto no es sencillo por varias razones.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que no se puede simplemente correlacionar el esfuerzo inversor en Ciencia y desarrollo tecnológico con las tasas de crecimiento. Un país o región puede estar creciendo por muchas razones. Para aislar el efecto que la I+D produce en términos de crecimiento, hay que controlar por otros factores que también puedan estar influyendo, positiva o negativamente, sobre el crecimiento. Esto implica la necesidad de utilizar modelos estadísticos de regresión múltiple, donde las variables son seleccionadas conforme a relaciones firmemente establecidas en la teoría económica —es decir, modelos econométricos—. A partir de unas relaciones causales y de formas funcionales consistentes con la teoría económica se estima un modelo de crecimiento en el que se incluye el esfuerzo inversor en I+D. El parámetro que se estima en ese modelo aísla el efecto de la inversión en Ciencia *ceteris paribus* el resto de variables relevantes.

En segundo lugar, hay que considerar que el efecto de un esfuerzo inversor en Ciencia y desarrollo tecnológico no se produce de modo inmediato. Suelen necesitarse varios años para poder identificar el impacto. Es necesario establecer relaciones entre las variables que abarquen periodos de tiempo suficientemente dilatados. Evaluar el impacto de la Ciencia en el crecimiento suele requerir un lapso de al menos un lustro, aunque lo ideal es considerar toda una década.

En tercer lugar, en torno al crecimiento aparecen serios problemas de autocorrelación espacial o de endogeneidad de las variables. Todos estos problemas deben ser tenidos en cuenta en la aproximación metodológica, aplicando controles de endogeneidad mediante modelos con variables instrumentales, o de dependencia espacial, con modelos que identifican el componente espacial del comportamiento de las variables.

IV.5. AMODO DE EJEMPLO: LA EXPERIENCIA DE LA CÁTEDRAPARAELANÁLISISDELAINNOVACIÓNDE LA UNIVERSIDAD DE OVIEDO

La Cátedra SEKUENS para el análisis de la innovación de la Universidad de Oviedo justamente responde a la idea general que se ha expuesto a lo largo de este trabajo. Se busca evaluar la Ciencia de manera integral, como instrumento de crecimiento económico y desarrollo social, pero teniendo en cuenta el peso del entorno territorial, el componente endógeno, en el desempeño científico y tecnológico de las regiones o los países. Esta Cátedra es un proyecto financiado por el Principado de Asturias, a través de la Agencia de Ciencia, Competitividad Empresarial e Innovación de Asturias —Agencia SEKUENS—, y desarrollado por la Universidad de Oviedo a través del Laboratorio de Análisis Económico Regional (REGIO*lab*).

El objetivo principal de la Cátedra es estudiar cómo la Ciencia impulsa el crecimiento de los territorios e identificar cómo se pueden mejorar las condiciones endógenas para que, en regiones como Asturias, se pueda aprovechar el máximo potencial de la investigación científica y tecnológica como motor de desarrollo. En busca de este objetivo se elaboran informes que profundizan en distintos aspectos, pero qué tienen como denominador común el objetivo principal antes expuesto.

Los informes son de tres tipos. El primer tipo son aquellos que estudian al propio sector Científico y Tecnológico de Asturias, al estilo de lo que se explicó en el apartado IV.1. Con estos informes se busca comprender las debilidades y fortalezas del sistema científico regional, lo cual es clave para diseñar una acertada política científica del Principado. Los informes 3, 5, 6 y 7 pertenecen a este primer tipo.

A lo largo de estos informes hemos comprendido que el sistema científico asturiano destaca por abundancia de capital humano qué compensa una tradicional escasez de recursos de financiación. Asturias se sitúa en lo alto de las regiones europeas en cuanto a capacidad de formar científicos y se observa qué los mismos se desenvuelven en cotas de excelencia internacional en su actividad. Pero aun presenta niveles de inversión bajos y limitaciones importantes en sus estructuras institucionales, aunque este es un aspecto que comparte con la mayoría de las regiones del sur de Europa. También hemos identificado un techo de cristal para las mujeres científicas que, aunque su incidencia se está reduciendo y es menor al que existe en otras regiones europeas, sigue siendo significativamente limitador.

A modo de ejemplo la Figura 4 recoge los principales indicadores del sistema científico asturiano tomados del informe 3 de la Cátedra. Usamos indicadores relacionados con las publicaciones, patentes… como los resumidos en el apartado IV.1.

El segundo tipo son informes que analizan la realidad económica de Asturias para así desarrollar políticas y programas



Figura 4. Principales indicadores del comportamiento del sistema científico asturiano, 2020. (*Tomado del informe núm. 3 De la cátedra sekuens para el análisis de la innovación, datos de sadei, ine y eurostat*)

plenamente adaptados a esa realidad particular. Lo qué se entiende es que para diseñar una buena política científica no basta con entender como es nuestro sistema científico, sino que hay que profundizar en el conocimiento de la realidad económica y social en el que encaja y se desenvuelve: el componente endógeno. Los informes 1, 2, 11 o 13 pertenecen a este segundo tipo.

Por ejemplo, en el informe 13 se estudia en profundidad la estructura económica de Asturias y las relaciones entre las actividades de la región de cara a determinar en qué sectores nuestro tejido productivo tiene relevantes potencialidades. Ello permite dirigir los esfuerzos científicos hacia esos sectores o actividades. A modo de resumen tomamos el gráfico recogido en la Figura 5. Este gráfico pertenece al citado informe 13 —disponible, como todos, en la página web de la Cátedra— y se obtiene tras realizar un análisis de redes de las interrelaciones entre sectores. Nos muestra qué sectores tienen mayor tamaño, cuales presentan más conexiones con otras actividades y cuales tienen mayor potencialidad, ya sea por su propio potencial o por el arrastre qué ejercen sobre el resto del tejido productivo.

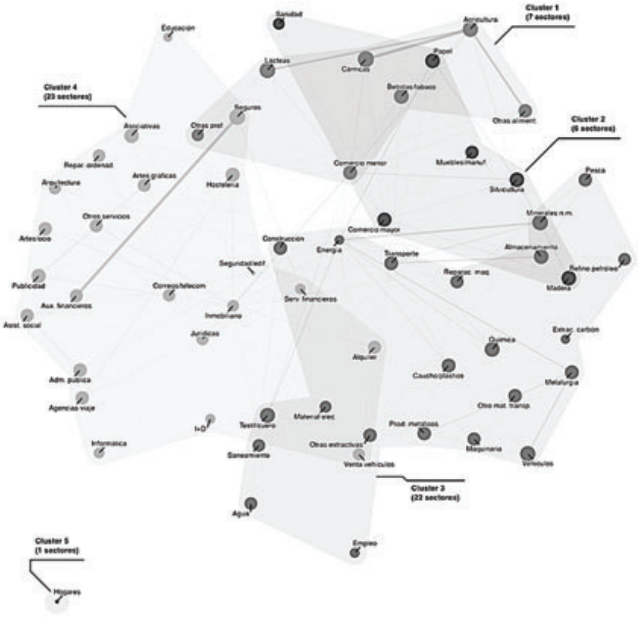


Figura 5. Análisis de las interrelaciones productivas en asturias e identificación de los clústeres sectoriales, 2021. (*Tomado del informe núm. 13 De la cátedra sekuens para el análisis de la innovación, datos de sadei, tablas input-output de asturias, 2021*)

La representación recogida en la Figura 5 permite desmentir ideas preconcebidas sobre la economía asturiana. El declive de la industria extractiva ha generado qué los sectores mineros no sean ya claves para nuestro futuro. Por el contrario, la región ha logrado posicionarse como un territorio extremadamente competitivo en sectores como la Maquinaria, el Material eléctrico o, la industria Metalmecánica. El trabajo de los centros de investigación en este entorno son clave para asentar el dominio nacional y europeo en estos sectores. Pero, además, está emergiendo una nueva Asturias competitiva en sectores como la Ingeniería, la Consultoría Técnica, los centros de cálculo y datos u otros sectores intensivos en conocimiento y tecnología. Otro ámbito en el que la región se está posicionando con fuerza y construyendo redes interesantes de interrelación es el ámbito biosanitario y biotecnológico. Toda esta información permite alimentar el diseño de políticas científicas dirigidas a los sectores con capacidades de crecimiento.

Por último, el tercer tipo de informes es el que más conecta con lo que hemos desarrollado en este trabajo y, en particular, con lo expuesto en el apartado IV.3. Son aquellos que buscan evaluar a la Ciencia no por su propio desempeño sino a través de su impacto en el crecimiento económico y desarrollo social de la región y teniendo en cuenta todos los aspectos a tener en cuenta repasados en el apartado IV.3. Son los informes 4, 8, 9 y 10.

Como ejemplo de las conclusiones alcanzadas en este grupo de informes, se muestra el mapa de la Figura 6 (tomada del informe 9), en el que se representa el efecto que la inversión en I+D logra producir en el crecimiento de las regiones europeas. Se aplica un modelo que contiene múltiples variables de control, de modo que se aísla adecuadamente el efecto de la inversión en Ciencia y Tecnología. Además, el modelo captura las heterogeneidades espaciales y corrige problemas de endogeneidad. Para un mayor detalle sobre la aproximación metodológica puede consultarse el informe núm. 9, disponible en la página web de la Cátedra SEKUENS. El mapa de dicha figura nos muestra cómo cada euro que se invierte en I+D logra un efecto mucho más relevante en términos de crecimiento en las regiones del norte y el centro de Europa, mientras que sus efectos en el sur y el este son mucho más moderados o incluso nulos. Este resultado confirma plenamente lo que apuntábamos en la sección II.4, en la que repasábamos la importancia del componente endógeno del cambio tecnológico.

Lo que nos muestra el análisis que se resume en el mapa de la Figura 4 es que los resultados científicos, en términos de publicaciones o patentes, de las regiones del sur y el este de Europa pueden ser perfectamente equivalentes a los de otras regiones más avanzadas del norte o del centro de Europa. No

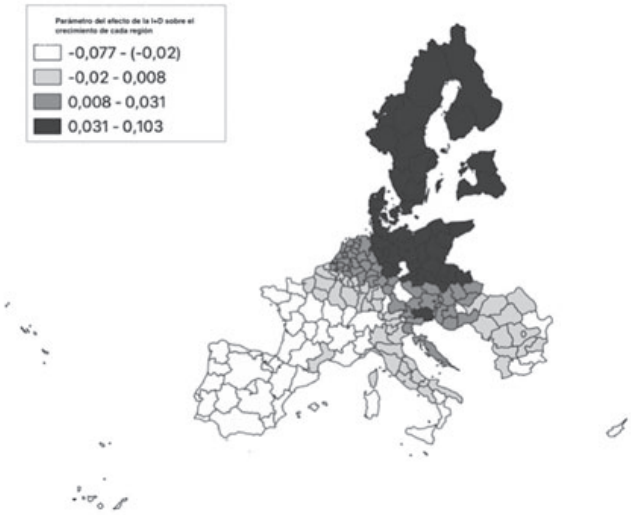


Figura 6. Efecto de la inversión en i+d sobre el crecimiento (renta per cápita) en las regiones europeas (nivel nuts2), 2008-2019.
(Tomado del informe núm. 9 De la cátedra sekuens para el análisis de la innovación, datos de eurostat, aplicación de un modelo GWR).
Nota: las regiones en tonos más oscuros logran un impacto de la inversión en i+d sobre el crecimiento mayor. Las regiones en tonos claros no consiguen que su esfuerzo inversor en i+d se traslade de modo efectivo en términos de crecimiento.

es que los científicos de estas regiones sean menos capaces de alcanzar resultados científicos relevantes, aunque en ocasiones puedan estar peor financiados. Son las características endógenas de sus territorios —sus estructuras productivas, su regulación e instituciones o el nivel de formación de los trabajadores— las que condicionan que los resultados finales sean mucho más pobres en términos de cambio tecnológico y, por ende, de crecimiento.

Otros análisis similares realizados con otros contextos o metodologías alcanzan conclusiones parecidas (para un resumen, véase Rubiera y Fernández, 2023). En general, se extraen conclusiones comunes de todos estos estudios muy relevantes a la hora de diseñar una política científica óptima. Que la Ciencia logre desarrollar todo su potencial como motor de desarrollo territorial depende no solo de la capacidad de los científicos, sino también de las condiciones endógenas de cada lugar. Si queremos evaluar la Ciencia para diseñar una política científica óptima, no debemos limitarnos a medir los resultados puramente científicos, sino que debemos evaluar y comprender la realidad económica, empresarial y social del territorio. Esa comprensión del entorno territorial permitirá desarrollar programas de investigación adaptados a dicho entorno, que puedan ser aprovechados por el tejido empresarial que rodea al sistema científico y permitirá, asimismo, actuar sobre el propio entorno.

V. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El objetivo principal de este artículo ha sido analizar el papel de la Ciencia como motor del crecimiento económico de los territorios, poniendo de relieve que el crecimiento sostenido en el largo plazo solo es posible a través del aumento continuado de la productividad y que dicho aumento depende, fundamentalmente, de la capacidad de generar y aplicar cambio tecnológico. Frente a los límites que imponen los rendimientos marginales decrecientes del capital, el progreso científico emerge como el principal mecanismo capaz de desplazar de forma continuada la frontera productiva, permitiendo aumentos persistentes de la renta, de la competitividad y, en última instancia, del bienestar de la población.

La revisión de las principales teorías económicas del crecimiento, desde el modelo neoclásico de Solow hasta las formulaciones más recientes del crecimiento endógeno, permite comprender que la Ciencia no constituye simplemente un factor adicional dentro del proceso productivo, sino que representa el elemento que hace posible la transformación estructural de las economías. La acumulación de conocimiento, la generación de innovaciones y su incorporación a los procesos productivos son los auténticos motores del progreso económico a largo plazo. Sin Ciencia no puede existir cambio tecnológico sostenido y, sin cambio tecnológico, las economías terminan enfrentándose inevitablemente al estancamiento.

Sin embargo, el trabajo también ha mostrado que la relación entre Ciencia, innovación y crecimiento es considerablemente más compleja de lo que tradicionalmente se ha supuesto. La inversión en investigación y desarrollo constituye una condición necesaria para impulsar el progreso tecnológico, pero no es suficiente por sí sola para garantizar resultados económicos relevantes. El aprovechamiento efectivo del conocimiento depende de factores endógenos ligados a las características específicas de cada territorio: la calidad institucional, la estructura productiva, la disponibilidad de capital humano cualificado, la existencia de empresas innovadoras, la capacidad emprendedora, la cultura científica o la presencia de mecanismos eficientes de transferencia de conocimiento. Son precisamente estos elementos los que determinan la capacidad real de transformar el esfuerzo científico en innovación, productividad y crecimiento.

Esta perspectiva ayuda a entender una de las conclusiones más importantes del artículo: la Ciencia no solo puede ser un instrumento de crecimiento, sino también un factor potencial de generación o ampliación de desigualdades territoriales. Allí donde existen ecosistemas innovadores más desarrollados, la inversión en investigación científica y desarrollo tecnológico produce retornos económicos superiores. Por el contrario, en territorios con estructuras productivas menos avanzadas o con menores capacidades institucionales, los resultados económicos del esfuerzo científico pueden ser significativamente más modestos. Como consecuencia, incluso cuando los esfuerzos científicos sean similares, las diferencias en las condiciones de partida pueden provocar que los beneficios del progreso tecnológico se concentren espacialmente.

Esta cuestión adquiere una relevancia especial en el contexto europeo. La Unión Europea afronta simultáneamente el reto de mantener su competitividad internacional y el de preservar la cohesión económica, social y territorial entre sus regiones. Ambos objetivos son legítimos y necesarios, pero no siempre resultan fáciles de compatibilizar. Concentrar recursos en los territorios más avanzados puede maximizar la generación de innovación y crecimiento agregado, pero también puede contribuir a aumentar las brechas internas. Por el contrario, orientar una parte significativa de los recursos hacia las regiones menos desarrolladas puede favorecer la convergencia territorial, aunque en algunos casos reduciendo la eficiencia inmediata de la inversión científica. La política científica europea debe, por tanto, encontrar un equilibrio complejo entre excelencia, competitividad y cohesión.

A lo largo del trabajo se ha puesto también de manifiesto la importancia de las estructuras intermedias que conectan el conocimiento científico con la actividad económica. Universidades, centros tecnológicos, parques científicos, clústeres empresariales y redes de innovación forman parte de ecosistemas que facilitan la circulación del conocimiento y aumentan la capacidad de los territorios para transformar la investigación en desarrollo económico. La existencia de estas estructuras no es un elemento accesorio, sino una condición fundamental para aprovechar plenamente el potencial de la Ciencia. En este sentido, políticas orientadas a fortalecer dichos ecosistemas pueden resultar tan importantes como el propio incremento de los recursos destinados a la investigación.

Las implicaciones para la evaluación de la Ciencia son igualmente relevantes. Durante décadas, los sistemas de evaluación se han centrado prioritariamente en medir la producción científica a través de publicaciones, citas, patentes o posiciones en rankings internacionales. Estos indicadores continúan siendo herramientas esenciales para valorar la calidad y excelencia de investigadores e instituciones. Sin embargo, el análisis realizado sugiere que una evaluación integral de la Ciencia debe ir más allá de estos resultados directos. Resulta necesario incorporar métricas capaces de captar la contribución

efectiva de la investigación al desarrollo económico, la innovación empresarial, la mejora institucional y el bienestar social. Evaluar la Ciencia únicamente por lo que produce internamente supone ignorar una parte fundamental de su verdadero valor.

Los ejemplos analizados para el caso europeo y, especialmente, los desarrollados en el marco de la Cátedra SEKUENS para el análisis de la innovación muestran que el rendimiento económico de la investigación presenta una elevada heterogeneidad territorial. Los resultados obtenidos indican que comprender las diferencias en las capacidades de absorción y aprovechamiento del conocimiento es tan importante como comprender los propios procesos de generación científica. Esta constatación justifica la necesidad de desarrollar investigaciones que analicen conjuntamente la Ciencia, la innovación, el tejido productivo y las dinámicas territoriales.

Desde una perspectiva de política pública, la principal enseñanza que se desprende de este trabajo es que las estrategias científicas y tecnológicas no deben diseñarse de forma aislada. Una política científica eficaz debe coordinarse con las políticas educativas, industriales, empresariales y territoriales. Incrementar la inversión en investigación y desarrollo es imprescindible, pero también lo es fortalecer las capacidades económicas e institucionales que permiten transformar dicho esfuerzo investigador en resultados tangibles. Del mismo modo, las regiones menos desarrolladas no solo necesitan más recursos científicos, sino también actuaciones dirigidas a consolidar su tejido empresarial, mejorar la cualificación de su población y reforzar sus estructuras de innovación.

En definitiva, a modo de conclusión final, la Ciencia constituye uno de los activos estratégicos más importantes de cualquier sociedad moderna. Su capacidad para generar conocimiento, impulsar la innovación y sostener el crecimiento económico la convierte en una herramienta esencial para afrontar los desafíos del siglo XXI. No obstante, la magnitud de sus beneficios dependerá de la capacidad de cada territorio para construir entornos favorables que permitan convertir el conocimiento en oportunidades de desarrollo.

Parece, por ello, que el *mito de Prometeo*, con cuya cita arrancábamos este trabajo, continúa siendo extraordinariamente actual. La humanidad ha aprendido a dominar el fuego del conocimiento científico y tecnológico y ha demostrado que este puede convertirse en una poderosa fuente de prosperidad, crecimiento y bienestar. Sin embargo, seguimos enfrentándonos al desafío de distribuir adecuadamente sus beneficios entre territorios y grupos sociales. La capacidad de generar conocimiento parece hoy mucho más desarrollada que la capacidad de organizar colectivamente sus resultados para garantizar una prosperidad equilibrada e inclusiva.

Quizá la principal lección sea precisamente esa: la Ciencia necesita seguir avanzando, pero también necesita ser comprendida, evaluada y gobernada desde una perspectiva más amplia. Conocer cómo se genera el conocimiento resulta fundamental; comprender cómo se transforma en desarrollo económico y cómo afecta a las desigualdades territoriales resulta igualmente imprescindible. Solo a través de una evaluación integral de la Ciencia, entendida como parte de un sistema económico, social e institucional complejo, podremos aprovechar plenamente su enorme potencial para construir sociedades más prósperas, innovadoras y cohesionadas.

La Ciencia nos permite producir más conocimiento que nunca. El gran reto de nuestro tiempo ya no consiste únicamente en descubrir nuevas verdades científicas, sino en construir las condiciones económicas, institucionales y sociales que permitan transformar ese conocimiento en prosperidad compartida. El futuro de los territorios dependerá, en buena medida, de su capacidad para lograr que la distancia entre el laboratorio y el bienestar de los ciudadanos sea cada vez más corta. Parece que las artes de Prometeo ya forman parte de nuestro patrimonio colectivo. El verdadero desafío del siglo XXI consiste ahora en acercarnos, poco a poco, a las artes de Zeus: aquellas que permiten convertir el conocimiento en un progreso compartido por todos los territorios y todos los ciudadanos.

AGRADECIMIENTOS

En este trabajo se han presentado y utilizado resultados obtenidos en las investigaciones de la Cátedra SEKUENS para el análisis de la innovación (www.cinnova.es). En particular se han utilizado trabajos desarrollados junto con la investigadora de la Cátedra, la Doctora y profesora de la Universidad de Oviedo, Tania Fernández García.

REFERENCIAS

Baumol, W.J. (1986). Productivity growth, convergence, and welfare: what the long-run data show; *The American Economic Review*, 76(5): 1072-1085.

Feldman, M. P. (1994). *The geography of innovation*. Springer Science & Business Media.

Rodríguez-Pose, A., Crescenzi, R. (2008). Research and development, spillovers, innovation systems, and the genesis of regional growth in Europe; *Regional Studies*, 42 (1)_ 51-67.

Romer, P. (1990). Endogenous Tecnological Change; *The Journal of Political Economy,* 98(5): 71-102.

Rubiera, F., Fernández, T. (2023). Spatial heterogeneity in the distribution of European research and development funds and its effects on territorial cohesion; *Journal of Regional Research*, 56: 9-30.

Solow, R. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth; *Quarterly Journal of Economics*, 70: 65-94.

Varios autores. Informes de la *Cátedra SEKUENS para el análisis de la innovación*, página web www.cinnova.es