

LA INVESTIGACIÓN EN GEOCRONOLOGÍA Y GEOLOGÍA: CONOCIMIENTO, DESARROLLO E INNOVACIÓN A TRAVÉS DEL CENIEH

*J.M. Parés; A.Álvaro; A. Benito-Calvo; M. Duval; T. Fujioka;
A. Hasozbek; A. Medialdea; D. Moreno.
Programa de Geocronología y Geología. CENIEH*

RESUMEN

A partir de los años ochenta las investigaciones en paleontología humana y arqueología prehistórica experimentaron un enorme progreso en España. Dichas disciplinas se incorporaron por derecho propio a la vanguardia de debates y foros internacionales. Ello en gran parte se debía al propio patrimonio arqueológico y paleontológico en nuestro país, cada vez mejor estudiado, y al crecimiento de la masa investigadora y de su calidad. En particular, en la Sierra de Atapuerca (Burgos), ya se había documentado a finales de los años noventa, uno de los registros arqueológicos y paleontológicos más importante del mundo para el estudio de la evolución humana, configurándose como un auténtico “observatorio de la prehistoria”. España se posicionaba como uno de los países con mayor relevancia en investigaciones sobre paleontología humana y arqueología prehistórica, en parte por los hallazgos producidos y el enorme potencial de los yacimientos burgaleses. Dado este empuje en nuestro país, se creó el Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH). En este artículo se hace referencia a las distintas actividades e investigaciones de este centro, y los avances que ha venido propiciando en el ámbito de la Geocronología y la Geología.

1. INTRODUCCIÓN

El CENIEH fue inaugurado en julio 2009, con el objetivo de ser un “centro nacional de referencia que aglutine y potencie las numerosas iniciativas ya existentes relacionadas con el rico patrimonio paleontológico y prehistórico ...”. El CENIEH nació para favorecer la visibilidad y cohesión de la investigación arqueo-paleontológica en España, y para promover y mejorar los resultados de los distintos grupos de investigación en el país, gracias a la implantación de infraestructuras analíticas únicas y conocimiento científico. En particular, se decidió dotar el Centro con expertos e infraestructura dedicadas a la Geocronología del Cuaternario, con el objetivo de paliar el déficit a nivel nacional. El CENIEH se constituyó, en definitiva, con el claro objetivo de fomentar grandes avances en el conocimiento de la evolución y orígenes humanos mediante investigación multidisciplinar.

El objetivo fundamental de la geocronología y geología del CENIEH, unos de sus pilares fundacionales, es el establecimiento del marco temporal y espacial de la evolución humana y de su interacción con el medio ambiente, y para ello desarrolla y focaliza las tareas conducentes a la ordenación temporal y espacial en yacimientos arqueológicos y paleontológicos (Fig. 1). El desarrollo de estudios cronométricos y cronoestratigráficos en dichos yacimientos, neógenos y cuaternarios conllevó el establecimiento de una infraestructura analítica para la determinación de edades numéricas y relativas, la cual constituye varios laboratorios de geocronología.



Figura 1: La geocronología y la cronoestratigrafía son las disciplinas en geociencias que permiten establecer la edad de rocas, sedimentos y fósiles utilizando firmas inherentes a las propias rocas. Los estudios de geocronología comienzan con la toma de muestras geológicas en el campo. Foto: Muestreo de rocas sedimentarias del periodo Cuaternario (N Marruecos).

La ordenación temporal de eventos y cuerpos sedimentarios no se puede realizar de forma aislada. Es fundamental integrar los aspectos cronológicos en un marco más amplio medio-ambiental. No tiene mucho sentido el estudiar y evaluar implicaciones de las dataciones de localidades fosilíferas sin emplazar éstas en un contexto más amplio. En los últimos años hemos visto numerosos estudios que documentan por ejemplo que el clima y la evolución del relieve han condicionado migraciones humanas. En consecuencia, hay que dar gran importancia a la implementación y refinamiento de las escalas cronológicas-patrón para el periodo del Cuaternario, desde los vértices geológico, bioestratigráfico, cronométrico, medioambiental y paleoclimático.

Para ello, el llamado Programa de Geocronología y Geología del CENIEH, alberga, entre otros, personal especializado y laboratorios en las disciplinas de la luminiscencia, resonancia paramagnética electrónica, nucleidos cosmogénicos, series del uranio y paleomagnetismo, las cuales constituyen los pilares de la geocronología y geología del Cuaternario (Fig. 2). Dispone, así mismo, de una línea de investigación centrada en geomorfología y procesos de formación que se apoya en diversos laboratorios, como en el Laboratorio de Cartografía Digital, imprescindible para establecer el marco espacial del desarrollo y contexto de yacimientos paleontológicos y arqueológicos.

2. MÉTODOS DE GEOCRONOLOGÍA Y GEOLOGÍA

A continuación, se describe brevemente cada uno de estos métodos específicos de geocronología y geología del Cuaternario que se desarrollan en el CENIEH:

Resonancia paramagnética electrónica: Es uno de los puntos “cardinales” en cronometría del Plio-Pleistoceno, dado que la disciplina abarca un rango de tiempo de unos miles a unos 3 millones de años. La resonancia paramagnética electrónica (conocida como ESR por su acrónimo en inglés) es un método de datación por exposición a la radiación, es decir, paleodosimétrico, y basado en la evaluación de la dosis de radiación natural absorbida por los materiales a lo largo de tiempos geológicos. Las cargas atrapadas dan lugar a una señal ESR cuya intensidad es proporcional a la dosis de radiación absorbida por la muestra a lo largo del tiempo. El procedimiento analítico estándar de ESR consiste en determinar dos parámetros principales: la dosis equivalente, es decir, la dosis total absorbida por la muestra durante el tiempo transcurrido entre la puesta a cero del reloj y el muestreo, y la tasa de dosis, que es la dosis media absorbida por la muestra en un año.

El laboratorio de resonancia paramagnética del CENIEH está completamente equipado para procesar tanto dientes fósiles, como granos de cuarzo de manera rutinaria. Incluye un área de preparación de muestras con el equipo necesario para la purificación del cuarzo y la extracción del esmalte, instalaciones de irradiación gamma (fuente de ^{137}Cs); 2 detectores Canberra de germanio de alta pureza para evaluar la radiactividad natural y el área de espectrometría ESR, que incluye un espectrómetro EMXmicro-6/1 (banda X) y un espectrómetro ELEXSYS (banda Q y X) de Bruker. Ambos espectrómetros están equipados para trabajar a temperatura ambiente o a temperatura del nitrógeno líquido, dependiendo de si se pretende medir dientes fósiles o bien granos de cuarzo.

Luminiscencia: La datación mediante luminiscencia es, al igual que la ESR, un método de datación de cargas atrapadas basado en la evaluación y cuantificación de la dosis de radiación absorbida por un material determinado como resultado de su exposición a la radiactividad natural. Entre las diversas técnicas, la luminiscencia estimulada ópticamente (OSL por su acrónimo en inglés) se ha convertido en la más popular para datar granos de cuarzo o feldespato del Pleistoceno Medio a tardío de sedimentos en diversos contextos (por ejemplo, eólico, fluvial, glacial). Cuando se aplica específicamente a minerales de feldespato, generalmente se prefiere el término IRSL (luminiscencia estimulada por infrarrojos). Al igual que la ESR, el método consiste en determinar dos parámetros principales, la dosis equivalente, recibida por los granos minerales y la tasa de dosis, que permite cuantificar la radiación de dosis por unidad de tiempo.

Esta instalación en el CENIEH incluye una zona para llevar a cabo la preparación de muestras (principalmente extracción de granos de cuarzo y feldespato del material sedimentario) bajo condiciones de luz controlada, y otra zona para equipos con 5 lectores de luminiscencia Risø y un sistema multicontador de beta de bajo nivel. El equipamiento del laboratorio permite la medición del material sedimentario utilizando las técnicas más modernas incluyendo luminiscencia estimulada por luz violeta (VSL) y análisis de granos individuales (*single grain*). Los nuevos desarrollos permiten ampliar el rango de edad cubierto por esta técnica más allá de los límites de los métodos convencionales y hacen posible estimar dosis equivalentes a partir de muestras con una respuesta de luminiscencia poco fiable a la estimulación estándar azul/verde/IR. El laboratorio de luminiscencia comparte con el de ESR los detectores Canberra para medida de radioisótopos presentes en la matriz sedimentaria a estudio, a partir de su emisión gamma.

Series del Uranio: La datación mediante series del uranio se basa en los productos de desintegración radiactiva producidos a partir de los dos isótopos de uranio de larga vida que se encuentran en la naturaleza, ^{238}U y ^{235}U . Este método abarca varias técnicas, incluidas la datación por U-Th y U-Pb, cada una de ellas adaptada a matrices y escalas de tiempo específicas. La datación por U-Th evalúa el desequilibrio entre ^{238}U y sus isótopos hijos de vida más corta, como ^{230}Th , lo que la hace particularmente útil para datar carbonatos como espeleotemas, corales y tobas a escalas de tiempo que van desde cientos a cientos de miles de años (~500 ka). Por el contrario, la datación U-Pb se basa en la desintegración a largo plazo de ^{238}U a ^{206}Pb y de ^{235}U a ^{207}Pb , y se puede aplicar a matrices de carbonato para escalas de tiempo geológicas que se extienden hasta millones de años. Ambos métodos dependen de las constantes de desintegración bien caracterizadas de los isótopos de uranio y su comportamiento de fraccionamiento distintivo en entornos naturales.

La datación por series U tiene numerosas aplicaciones en geociencias y estudios de evolución humana, dependiendo del material analizado (p. ej., carbonatos, fosfatos, etc.) y del sistema isotópico elegido. Con el reciente avance de las técnicas de espectrometría de masas, la datación mediante las series del uranio es la más adecuada para materiales compuestos por carbonato de calcio (espeleotemas y concreciones calcíticas en general). Es una técnica de amplísima aplicabilidad en yacimientos de cuevas. También se realizan estudios del sistema isotópico $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, dado que constituye una herramienta robusta y altamente fiable para el estudio de la movilidad del estroncio y la determinación de procedencias en contextos arqueológicos y geológicos.

Todo ello conlleva una instrumentación compleja y elaborada, y para ello del CENIEH dispone de una sala blanca para la preparación de muestras con certificación ISO 7. La base del laboratorio la constituye un espectrómetro de masas multicolector Thermo NEPTUNE MC-ICPMS con 9 copas Faraday (tres amplificadores con capacidad de 1013 ohm) y 6 contadores de iones, así como un espectrómetro de masas de doble aproximación Thermo ELEMENT XR de rango dinámico extendido de alta resolución, con posibilidad de acoplarlo a un sistema de ablación láser de plataforma universal.

Nucleidos cosmogénicos: Los nucleidos cosmogénicos producidos a través de la interacción de partículas de rayos cósmicos con la materia, se utilizan para determinar la historia de exposición de materiales en la superficie terrestre. Dadas las escalas de tiempo de interés en evolución humana (del Mioceno a Pleistoceno Medio) y las características de los depósitos, nos centramos en dos enfoques, de un lado el enterramiento in situ de ^{10}Be - ^{26}Al y datación meteórica mediante ^{10}Be . La datación de enterramiento in situ se pueden utilizar para datar depósitos cuando el cuarzo ha sido previamente expuesto a rayos cósmicos y acumulado nucleidos de aluminio y berilio, y se es enterrado posteriormente. Los granos de cuarzo producidos en la superficie terrestre en erosión constante adquieren los dos nucleidos $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ en la proporción $\sim 6,8$, que, después del enterramiento, disminuirá de acuerdo con la tasa de desintegración respectiva (con vidas medias de $\sim 0,7$ Ma y $\sim 1,4$ Ma para ^{26}Al y ^{10}Be , respectivamente), lo que dicta el tiempo o fecha de enterramiento. El método es aplicable a un rango de edad de 0,4 a 5 Ma, que es adecuado para los depósitos del Plioceno-Pleistoceno.

La técnica requiere un acelerador de masas (AMS), que puede considerarse como una “gran instalación”. En el CENIEH se dispone del laboratorio de preparación de muestra para el AMS, tarea que por sí sola requiere de una larga y compleja cadena de procesos químicos y físicos con el propósito de aislar los elementos químicos a determinar (aluminio y berilio).

Paleomagnetismo: Las rocas sedimentarias adquieren una magnetización remanente al depositarse, ya sea debido a la alineación de los granos durante la sedimentación o poco después. La dirección de la magnetización primaria remanente revela la polaridad del campo magnético de la Tierra durante la formación de la roca. Cuando se aplica a una sucesión de capas a lo largo de una sección o secuencia sedimentaria, el paleomagnetismo aporta una magnetoestratigrafía, es decir, una sucesión vertical de intervalos de polaridad normal y/o inversa. La comparación y correlación entre la magnetoestratigrafía obtenida y la Escala de Tiempo de Polaridad Geomagnética (GPTS por su acrónimo en inglés), con la ayuda de otros indicadores independientes como los fósiles o las estimaciones numéricas de edad, permite inferir fechas cronométricas. Aunque la magnetoestratigrafía no es estrictamente un método de datación numérica per se, proporciona, no obstante, restricciones cronológicas muy útiles para la cronología de cuerpos geológicos, basadas en la presencia de las inversiones de polaridad, de una sección sedimentaria dada.

Para llevar a cabo estos estudios, el CENIEH dispone de un magnetómetro criogénico (SQUID) de 3 ejes (755 SRM, 2G Enterprises) con un sistema en línea para desmagnetización AF (hasta 170 mT), ubicado en un sistema de bobinas de Helmholtz para reducir el campo magnético ambiental. Además, el laboratorio posee un desmagnetizador térmico TD48 (ASC) y un MicroMag 3900 VSM (Princeton) para análisis magnético de rocas, además de un puente de susceptibilidad a tres frecuencias diferentes (MFK1-FA, Agico).

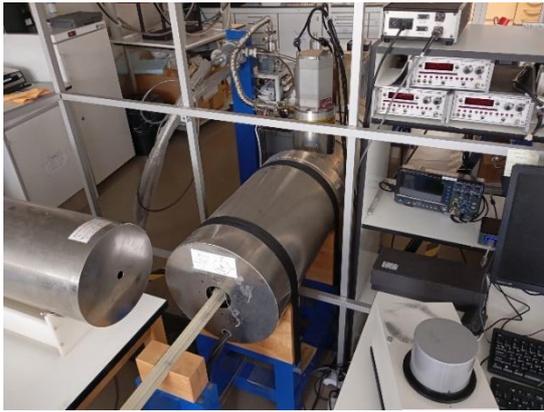


Figura 2: Los estudios geocronológicos requieren de sofisticada y especializada tecnología. En la imagen izquierda se muestra el detalle del magnetómetro superconductor (SQUID) en el CENIEH, que permite la medición de muestras geológicas con débiles intensidades de magnetización remanente. A la derecha puede verse el espectrómetro de masas multicolector con fuente de ionización de plasma generado por acoplamiento inductivo (MC-ICPMS, Thermo NEPTUNE), para la determinación de proporciones isotópicas, incluso a nivel ultra traza.

Geomorfología, procesos de formación y cartografía digital: Esta especialidad se ocupa del estudio del modelado del paisaje, para determinar su evolución dinámica, reconstruir los procesos morfogénéticos y sus interrelaciones con los cambios climáticos, y de esta forma enmarcar los yacimientos arqueo-paleontológicos en su contexto físico-espacial. La aproximación es geomorfológica, con aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) para el análisis de paleopaisajes y la producción de soportes cartográficos, bases de datos e información morfométrica. Para ello, se aplican técnicas geomorfológicas, estratigráficas y sedimentológicas para analizar la formación de los yacimientos y reconstruir los paisajes y procesos que caracterizaron el medio físico de las ocupaciones humanas durante el Plioceno y el Cuaternario. Para ello, línea de investigación cuenta con un Laboratorio de Cartografía digital y Análisis 3D, que se centra en la cartografía, reconstrucción y análisis espacial de elementos geológicos y arqueológicos. Entre los productos que se realizan cabe destacar: cartografías geológicas y geomorfológicas, reconstrucciones paleogeográficas, análisis de patrones espaciales, reconstrucciones 3D y análisis morfométricos de yacimientos y objetos arqueológicos en diversos proyectos de investigación en Europa y África.

3. LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN

El CENIEH dispone también de un *Laboratorio de Arqueometría*, con el objetivo fundamental de caracterizar materiales, mediante el estudio de su composición química y mineralógica, así como su análisis vibracional y térmico. Pretende dar apoyo a la investigación no solamente en las áreas de geología y la arqueología, sino también en patrimonio, química, farmacia, ingeniería civil entre otras. Este laboratorio dispone de varias técnicas analíticas de caracterización de sólidos, que incluye la difracción de rayos X de polvo cristalino, espectrometría de fluorescencia de rayos X, espectroscopía Raman, espectroscopía infrarroja y análisis térmico.

El *Laboratorio de Geología*, tiene el objetivo de dar apoyo a otros laboratorios para la preparación y caracterización de muestras de distinta naturaleza, así como a áreas de investigación como estudios medioambientales, paleoclimáticos, paleoceanográficos y la geotecnia. Este laboratorio incluye la preparación de muestras, separación mineral y sedimentología, sala de molienda, sala de balanzas, preparación de láminas delgadas y micromorfología de suelos.

Durante sus 18 años de andadura, el equipo de Geocronología y Geología del CENIEH ha alcanzado numerosos hitos en cuanto a la investigación y conocimiento de diversas localidades de interés en evolución humana. Cabe destacar los grandes esfuerzos que se realizan en el continente africano, desde Etiopía (Benito-Calvo et al., 2014), Tanzania (p.e. Benito-Calvo y de la Torre, 2011, de la Torre et al., 2025; Fujioka et al., 2022), Algeria (Duval et al. 2023; Sahnouni et al., 2018; Parés et al., 2023) y Marruecos (Parés et al., 2023; Benito-Calvo et al., 2020), pasando por Costa de Marfil (Ben Arous et al., 2025). Así mismo, se continúa realizando investigación en los afamados y productivos yacimientos arqueo-paleontológicos de la Sierra de Atapuerca (Burgos), donde todo el equipo investigador aplica y desarrolla las disciplinas descritas a fin de mantener en la vanguardia el contexto temporal y espacial de dichos yacimientos que sin duda han re-escrito el conocimiento de la expansión del género humano fuera del continente africano.

En definitiva, se trata de un centro concebido como punto focal para desarrollar, promover y facilitar la investigación en evolución humana, que gracias a la convergencia en diversidad de laboratorios y científicos centrados en la Geocronología y Geología, fomenta avances a través de la investigación multidisciplinaria, a la par que se preocupa en perfeccionar procedimientos analíticos, precisión y fiabilidad de las dataciones que se elaboran.

4. REFERENCIAS

- Ben Arous, E., Blinkhorn, J.A., Elliott, S. *et al.* Humans in Africa's wet tropical forests 150 thousand years ago. *Nature* (2025). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08613-y>
- Benito-Calvo, A., Barfod, D. N., McHenry, L. J., & de la Torre, I. (2014). The geology and chronology of the Acheulean deposits in the Mieso area (East-Central Ethiopia). *Journal of Human Evolution*, 76(0), 26-38. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2014.08.013>.
- Benito-Calvo, A., & de la Torre, I. (2011). Analysis of orientation patterns in Olduvai Bed I assemblages using GIS techniques: Implications for site formation processes. *Journal of Human Evolution*, 61(1), 50-60.
- de la Torre, I., Doyon, L., Benito-Calvo, A. *et al.* Systematic bone tool production at 1.5 million years ago. *Nature* 640, 130–134 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08652-5>.
- Fujioka, T. et al. Direct cosmogenic nuclide isochron burial dating of early Acheulian stone tools at the T69 Complex (FLK West, Olduvai Bed II, Tanzania). *J. Hum. Evol.* 165, 103155 (2022).
- Duval M., Sahnouni M., Parés J.M., Zhao J.-X., Grün, R., Abdessadok S., Pérez-González A., Derradji A., Harichane Z. Mazouni N., Boulaghraief K., Chelli Cheheb R., van der Made J. (2023). On the age of Ain Hanech Oldowan locality (Algeria): First numerical dating results. *J Hum Evol.* 2023 Jul;180:103371. doi: 10.1016/j.jhevol.2023.103371.
- Parés J. M., Sahnouni M., Van der Made J., Pérez-González A. Harichane Z., Derradji A., and Medig M., 2014. Early human settlements in Northern Africa: Paleomagnetic evidence from the Ain Hanech Formation (Northeastern Algeria), *Quat. Sci. Rev.* 99, 203-209.
- Parés, J.M.; Haddoumi, H.; Duval, M.; Aouraghe; H. ; Álvarez-Posada, C.; Pla-Pueyo, S.; Benito-Calvo, A.; Rodríguez-Hidalgo, A.; Van der Made, J.; Piñero, P.; Agustí, J.; Oujaa, A.; Grün, R.; Chacón, M. G.; Sala-Ramos, R., 2023. First magnetostratigraphic results in the Aïn Beni Mathar-Guefaït Basin, Northern High Plateaus (Morocco): the Pliocene-Pleistocene Dhar Iroumyane composite section. *Geobios*. <https://doi.org/10.1016/j.geobios.2023.01.004>.
- Sahnouni, M.; Parés, J.M., Duval, M.; Cáceres, I.; Harichane, Z.; van der Made, J.; Pérez, A.; Abdessadok, S.; Kandi, N.; Derradji, A.; Medig, M.; Boulaghraif, K., Semaw, S., 2018. 1.9-million- and 2.4-million-year-old artifacts and stone tool-cutmarked bones from Ain Boucherit, Algeria. *Science*, 10.1126/science.aau0008.