



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación

Trabajo Fin de Grado

Datación de pinturas rupestres por el método de las Series de Uranio

Alumno/a: Itziar Aguirre Judas

Tutor/a: Prof. D. Alberto Sánchez Vizcaíno
Dpto.: Patrimonio Histórico

Enero, 2021

Índice

1. Introducción	5
2. Objetivos	5
3. Nociones previas	6
4. Métodos de datación habituales en pintura rupestre	6
4.1. Radiocarbono	6
4.2. Termoluminiscencia	9
5. Series de Uranio	10
5.1. Fundamento teórico	10
5.2. Materiales y rango cronológico	11
5.3. Condiciones para la aplicación del método	13
5.4. Ejecución del método	14
5.4.1. Toma de muestras	14
5.4.2. Tratamiento de muestras	16
5.4.3. Análisis de muestras	18
5.5. Fuentes de error	19
5.5.1. Causas provocan la sobreestimación de las fechas	19
5.5.2. Causas que provocan la infraestimación de las fechas	20
5.5.3. Errores de interpretación	20
6. Casos de estudio	21
6.1. Las cuevas de La Pasiega, Maltravieso y Ardales (Hoffmann <i>et al.</i> , 2018a)	21
6.1.1. Las cuevas y sus representaciones	21
6.1.2. La toma de muestras	22
6.1.3. Resultados e interpretación	23
6.2. Cueva de Nerja (Valladas <i>et al.</i> , 2016)	26

6.2.1. <i>La cueva y sus representaciones</i>	26
6.2.2. <i>La toma de muestra</i>	26
6.2.3. <i>Resultados e interpretación</i>	27
7. Discusión	28
7.1. Datación cruzada	28
7.2. ¿Pintura rupestre, manchas no intencionales o coloraciones naturales?	29
7.3. Contradicciones con el conocimiento arqueológico previo	29
7.4. Relación entre el pigmento y la muestra	31
7.5. Coherencia entre las edades y la estratigrafía de las muestras	31
7.6. Destrucción del patrimonio	32
7.7. Rango de fechas	33
8. Conclusión	34
9. Bibliografía	35
10. Webgrafía	40

Resumen: en este trabajo se ofrece una visión integral del método de datación por Series de Uranio aplicado a pinturas rupestres. Se intenta proporcionar una guía para el investigador, en la que quede reflejada cada fase del análisis: el fundamento teórico del método, su ejecución, los resultados y su interpretación, además del análisis de las fuentes de error del método y la problemática generada en torno a ciertas hipótesis, todo ello apoyado en el estudio de dos dataciones realizadas en la Península Ibérica y el ejemplo de otros casos prácticos en diferentes países.

Palabras clave: *pinturas rupestres, datación, calcita, series de uranio, metodología.*

Abstract: in this work is shown a comprehensive overview of the uranium-series dating method applied to cave art. It is expected to provide a guide for the researcher, where every stage of the analysis is setted out: the theoretical basis of the method, its execution, the results and its interpretation besides analysing the sources of error of the method and the issue generated by some hypotheses, all of this supported by the examination of two dates carried out on the Iberian Peninsula and the example of other case studies in several countries.

Key words: *cave art, dating, calcite, uranium-series, methodology.*

1. Introducción

Las pinturas rupestres constituyen una de las evidencias arqueológicas cuya datación entraña mayor dificultad. A lo largo del siglo pasado, múltiples investigadores establecieron cronologías en función del estilo, superposición y evolución de las pinturas, lo que daba lugar a conclusiones basadas en la subjetividad. En este sentido, encontramos trabajos como el de Henri Breuil en *“Les peintures schématiques de la Péninsule Ibérique”*, Juan Cabré Aguiló en *“El arte rupestre en España (Regiones septentrional y oriental)”* o Pilar Acosta en *“La pintura rupestre esquemática”*.

Sin embargo, en los últimos años, la aplicación de métodos de datación absoluta ha ido en aumento, permitiendo así datar de forma directa los pigmentos que constituyen las pinturas o, de forma indirecta, materiales asociados a esta, como son las costras de calcita que las cubren en ocasiones. Los tres métodos más habituales son el radiocarbono, la termoluminiscencia y las series de Uranio; el primero ha sido ampliamente utilizado, mientras que los dos restantes son más recientes. En especial, las series de uranio han ofrecido a lo largo de la última década dataciones novedosas a la vez que controvertidas.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es desgranar el método de datación por las series de Uranio y su aplicación en la datación de pinturas rupestres prehistóricas. Se pretende que el arqueólogo/a comprenda el funcionamiento del método y su aplicación de principio a fin, entendiendo sus posibilidades, pros y contras, de forma que el investigador/a conozca qué debe pedir y qué puede esperar a la hora de realizar dataciones. Para ello, se enumeran a continuación una serie de objetivos específicos:

- Definir brevemente los métodos de datación por radiocarbono y termoluminiscencia, así como las ventajas e inconvenientes que presenta cada uno.
- Explicar el fundamento teórico del método, los materiales que permite datar y el rango cronológico que abarca.
- Desarrollar la ejecución práctica del mismo, es decir, el proceso de toma de muestras, el tratamiento al que deben someterse y el análisis de las mismas.
- Analizar la fiabilidad y validez de los resultados obtenidos y desglosar las fuentes de error a tener en cuenta.

- Estudiar dos casos prácticos de dataciones realizadas en los últimos años en la Península Ibérica.
- Realizar una valoración crítica del método, su fiabilidad, y las hipótesis emitidas en base a las dataciones analizadas previamente.

3. Nociones previas

Antes comenzar la explicación de cada método, es necesario aclarar algunos conceptos generales que son comunes a los tres. A día de hoy, la datación de pinturas rupestres se puede realizar de dos modos:

1. Datación directa, analizando el pigmento con el que se realizó la pintura. Esto puede dar lugar a datos erróneos, ya que el pigmento podría tener una cronología anterior a la pintura (por ejemplo, si se trata de carbón vegetal, el árbol del que proviene puede ser cientos de años anterior a la misma). El método aplicado es el radiocarbono, por tanto, es necesario que el pigmento tenga origen orgánico o presente en su composición átomos de carbono. Los estudios se han centrado en la datación de pigmentos realizados con carbón vegetal (Valladas *et al.*, 1990, Ortega-Martínez *et al.*, 2020), aunque existen análisis en multitud de sustancias: sangre, cera de abeja, fibra integrada en el pigmento húmedo e incluso pigmentos inorgánicos diluidos en sustancias orgánicas como aceites, huevo, resinas... (Steelman y Rowe, 2012, p. 575-576).

2. Datación indirecta, analizando los espeleotemas sobre los que se realizó la pintura o que la cubrieron posteriormente. Se data la fecha en la que se formaron, obteniendo así un *terminus ante quem* y/o *post quem*, es decir, una fecha anterior y/o posterior a la ejecución de la pintura. Los métodos aplicados normalmente son el radiocarbono, la termoluminiscencia y las series de Uranio. Se han realizado estudios en costras de apenas unos milímetros de grosor (Valladas *et al.*, 2017; Pike *et al.*, 2013) y en formaciones de mayor tamaño (Plagnes *et al.*, 2003).

4. Métodos de datación habituales en pintura rupestre

4.1. Radiocarbono

El método de datación por radiocarbono, también conocido como carbono-14, fue desarrollado por Willard F. Libby en el año 1949 y, a partir de entonces, se implementó su uso en disciplinas como la geología, biología y, por supuesto, la arqueología. En la Península ibérica

se aplicó por primera vez durante los años 70 en la Cueva de los Murciélagos (Córdoba). Permite obtener fechas de hasta 50.000 años de antigüedad y analizar una gran variedad de materiales, siempre y cuando tengan origen orgánico o contengan átomos de carbono en su composición: carbón vegetal, madera, huesos, asta, cuerno, restos vegetales y animales de diverso tipo (polen, cuerdas, esparto, cuero, sangre, etc.) (Rubinos, 2013, p. 74).

El método se basa en la desintegración radiactiva del ^{14}C . En este proceso los isótopos radiactivos e inestables de los elementos (por ejemplo, el ^{238}U (uranio), ^{40}K (potasio) o el ^{14}C (carbono) se desintegran dando lugar a isótopos estables. En este caso, el ^{14}C , denominado isótopo padre, genera ^{14}N , llamado isótopo hijo. El ^{14}C se genera en la atmósfera cuando los neutrones de los rayos cósmicos impactan sobre el ^{14}N ; después, pasa a la superficie terrestre de dos formas: disuelto en las aguas marinas y continentales y en los seres vivos, en los que se integra a través de la cadena alimentaria, ya que las plantas lo utilizan en la fotosíntesis (figura 1). Los seres vivos presentan ^{14}C en su organismo mientras viven y, cuando mueren, el ^{14}C que contienen comienza a disminuir a causa de la desintegración radiactiva.

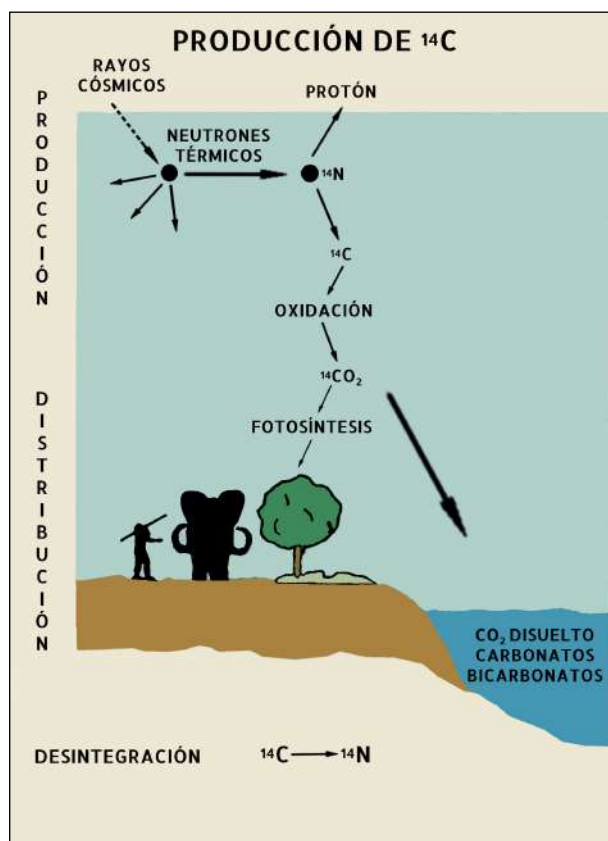


Figura 1: Producción y distribución del ^{14}C . Elaboración propia a partir de Jull y Burr, 2015, p. 670.

La velocidad a la que esto sucede se conoce gracias a la constante de desintegración (figura 2), de forma que la cuantificación del ^{14}C presente a día de hoy en los restos de un organismo, permite conocer tiempo transcurrido desde que este murió (Rubinos, 2013, p. 74-76).

Antes de analizar la muestra, es necesario someterla a una serie de tratamientos físico-químicos que persiguen, en primer lugar, eliminar la contaminación que pueda alterar los resultados y, en segundo lugar, preparar la muestra para hacer el análisis. El análisis de la muestra se basa dos tipos de técnicas (Rubinos, 2013, p. 83-84).

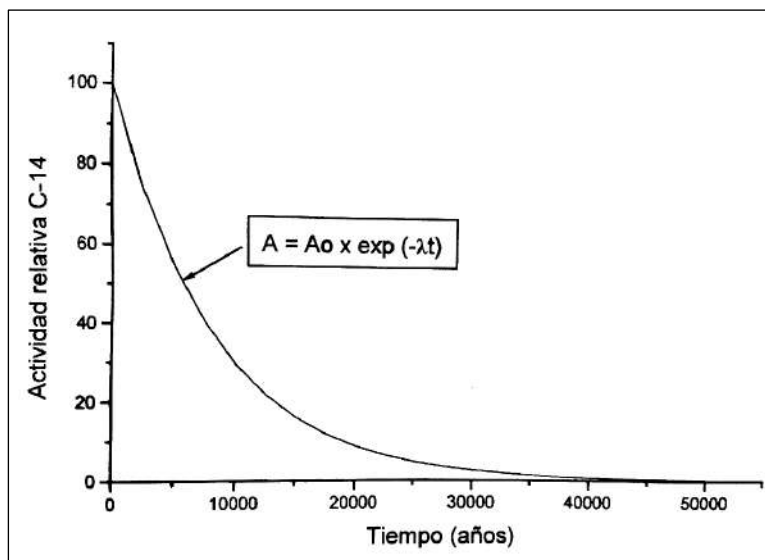


Figura 2: Curva de desintegración radiactiva del ^{14}C (Rubinos, 2013, p. 75).

- Los contadores proporcionales de gas y la espectroscopia de centelleo líquido, técnicas denominadas convencionales, que miden la radiactividad generada por la muestra en un tiempo determinado. Presentan un gran inconveniente, ya que la cantidad de muestra requerida es muy grande.
- La espectrometría de masas con acelerador (conocida como AMS), que cuantifica los átomos de ^{14}C midiendo su peso, ya que es diferente para cada átomo. Esta técnica ha permitido que la cantidad de muestra necesaria disminuya desde entre 10 y 100 gramos, hasta unos cuantos miligramos (Sauvet, 2017, p. 183-184).

Una vez se obtiene la “edad carbono-14 convencional” es necesario calibrarla, ya que a lo largo del tiempo la cantidad de ^{14}C presente en la atmósfera y, por tanto, en los seres vivos, ha variado. Se han desarrollado curvas de calibración a partir de otros métodos de datación (dendrocronología, series de uranio...) que permiten obtener la “edad carbono-14 calibrada” (ver Rubinos, 2013, p. 77-84).

Además, se debe tener presente la contaminación de la muestra, que puede producirse por carbono muerto (que envejece las fechas) y por carbono reciente (que las rejuvenece) (ver Sauvet, 2017, p. 185). En aquellos casos que lo permiten, se data la fracción húmica, que permite estimar el grado de contaminación de la muestra (Ochoa, 2011, p. 134). Por otra parte, como se menciona anteriormente, el pigmento puede provenir de material orgánico formado mucho antes de la ejecución de la pintura, en cuyo caso se obtendrían fechas más antiguas.

Las principales ventajas del método son, por una parte, la posibilidad de datar directamente el pigmento y, por otra, la disminución del peso necesario para que una muestra sea analizada, que permite aplicar el método en pinturas rupestres sin dañarlas. También es posible la datación de espeleotemas, ya que la calcita contiene carbono (formado por $\text{CaCO}_3 \rightarrow$ carbonato cálcico); por tanto, permite realizar dataciones cruzadas, un concepto que se explicará más tarde.

4.2. Termoluminiscencia

En los años 50 se establecieron las bases del fenómeno de la termoluminiscencia y se propuso por primera vez su uso como método de datación de materiales arqueológicos y geológicos (Arnold y Demuro, 2013, p. 108). Durante el final de la década de los 50 y principios de los 60 se confirmó su aplicación como método de datación, analizando cerámicas y ladrillos de época romana, aunque fue J.K. Aikten quien verdaderamente definió los procedimientos para este material. La aparición de la luminiscencia ópticamente estimulada a finales de los 70, permitió en análisis de sedimentos, lo que supuso un enorme avance en el campo de la arqueología (Zöller y Wagner, 2015, p. 417-418). En la Península Ibérica se aplicó por primera vez para la datación de calcita durante la década de los 90, en la cueva de Venta de La Perra (Madrid) (Beneitez *et al.*, 1999, p. 70). Permite datar materiales de hasta 1.000.000 años de edad (Debenham y Aikten, 1984, p. 155).

El método se basa en la luminiscencia, fenómeno por el cual ciertos materiales como los minerales, emiten luz al liberar energía. Esto sucede porque los elementos radiactivos presentes en su composición (uranio, torio, potasio...) emiten radiación al desintegrarse radiactivamente, que impacta sobre la estructura cristalina del mineral y provoca la liberación de electrones. Estos quedan atrapados en defectos o irregularidades de la estructura cristalina y se van acumulando. Se asume que, durante la formación del mineral, la cantidad de electrones atrapados es cero (Debenham y Aikten, 1984, p. 155); por tanto, al estimular el mineral mediante calor (termoluminiscencia o TL), luz (luminiscencia ópticamente estimulada o OSL) o exposición a luz infrarroja (luminiscencia estimulada por infrarrojo o IRSL) se libera la energía contenida, que es proporcional al tiempo transcurrido desde su formación (Arnold y Demuro, 2013, p. 105; Sauvet, 2017, p. 194).

Para la medición de la termoluminiscencia, la muestra se introduce en una atmósfera de nitrógeno, ya que la presencia de oxígeno podría provocar la combustión de materia orgánica

y, por tanto, luz que contaminaría los resultados. La muestra se calienta progresivamente con una placa calefactora y la luz emitida se mide con un fotomultiplicador (Fernández y Tripiet, 1992, p. 202-203). Además, para obtener la edad de la muestra es necesario realizar dos mediciones (Duller, 2015, p. 394-396):

- La dosis equivalente es la cantidad total de radiación que presenta la muestra. Para medirla, a una parte de la muestra se le aplica una cantidad de radiación determinada y conocida, y la intensidad de luz emitida se compara con la obtenida en el apartado descrito anteriormente.
- La tasa de dosis o dosis anual es la medida de la radiación que la muestra recibe del entorno y, en menor proporción, de los rayos cósmicos.

Es necesario tener en cuenta que la velocidad a la que el mineral crece es variable, y dado que la datación indica el momento de formación de la calcita, la datación que se obtiene es la media del tiempo que tardó en formarse; esto genera poca precisión en las fechas, con una desviación típica del 10% (Ochoa, 2011, p. 135).

La principal ventaja de este método reside en la posibilidad de datar pinturas en las que no se puede aplicar el radiocarbono; además, su aplicación junto a las series de uranio permite, al igual que en el radiocarbono, comparar las fechas obtenidas.

5. Series de Uranio

En sus inicios, el método fue empleado para realizar análisis y reconstrucciones paleoambientales. Con este propósito fue aplicado por primera vez en el año 1942 por Piggot y Hurry para la datación de sedimentos marinos. Durante la década de los 60, Rosholt y Antal analizaron por primera vez carbonatos terrestres (espeleotemas y travertinos). A mismo, tiempo se incorporó la datación de corales que, junto al análisis de sedimentos marinos, permitieron establecer los ciclos glaciares e interglaciares (Schwarcz, 1989, p. 7). En arqueología se comenzó datando huesos y fósiles y a partir de los años 90 se implementó su uso en la datación de pinturas rupestres (Ochoa, 2011, p. 134).

5.1. Fundamento teórico

El método se basa, al igual que el radiocarbono, en la desintegración radiactiva, aunque en este caso del uranio. Sin embargo, al contrario del ^{14}C , los isótopos ^{238}U y ^{235}U (isótopos padre) presentan cadenas de desintegración largas (dan lugar a numerosos isótopos hijo) hasta

finalizar en ^{206}Pb y ^{207}Pb respectivamente (figura 3). En función del material que se desee datar, se analizan distintos isótopos de cada cadena de desintegración; en el caso de la calcita, la del ^{238}U (Bourdon, 2015, p. 919).

Para que un material se pueda datar, es necesario que se de un desequilibrio en la cadena de desintegración, es decir, una vez formado debe estar presente el isótopo padre, pero no los isótopos hijo. La calcita es un material idóneo, ya que en el momento de su formación contiene uranio, pero no torio. Esto sucede porque el uranio es soluble en agua, mientras que el torio no, por tanto, cuando el agua y los diferentes compuestos disueltos en ella precipitan formando la calcita, no está presente el torio

(Hoffmann, 2013, p. 88-89). Se conoce la constante de desintegración de cada isótopo presente en la cadena, por tanto, en el caso de la calcita, la determinación de las abundancias isotópicas del ^{238}U , ^{234}Th , ^{234}U y ^{230}Th presentes en la muestra actual, permite conocer el tiempo transcurrido desde su formación (Rauret, 1998, p. 197).

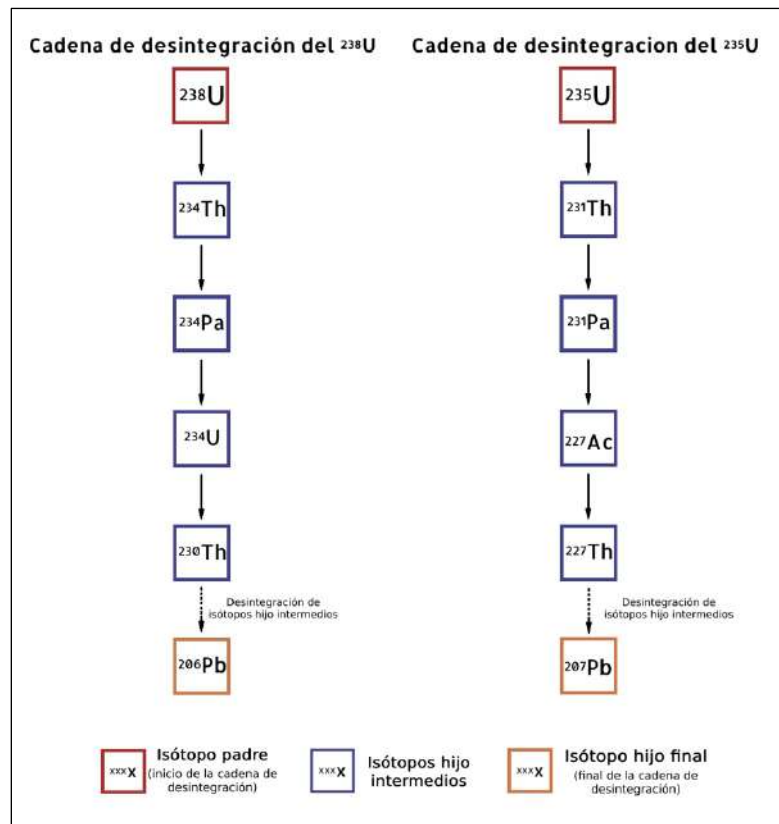


Figura 3: Cadena de desintegración del ^{238}U y ^{235}U . Elaboración propia a partir de Hoffman, 2013, p. 88.

5.2. Materiales y rango cronológico

1. Los **sedimentos** recientes de **lagos** y **océanos** se pueden datar con un límite de 100.000 años. Para ello se miden las proporciones de los isótopos ^{226}Ra y ^{210}Pb dentro de la cadena de desintegración del ^{238}U (Bourdon, 2015, p. 924).

2. El análisis de **minerales autógenos**¹ y **biogénicos**² permite la datación de corales, conchas de moluscos, espeleotemas, travertinos, huesos, dientes, etc...

- La datación de **corales** y **moluscos**, cuyo esqueleto y concha está compuesto de aragonito (mineral de carbonato cálcico $\rightarrow \text{CaCO}_3$) permite obtener fechas de hasta 300.000 años analizando la proporción entre los isótopos $^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$, $^{235}\text{U}/^{231}\text{Pa}$ y $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (Schwarcz, 1989, p. 11; Bourdon, 2015, p. 922-923)

- El análisis de **espeleotemas**, compuestos por calcita (mineral de carbonato cálcico $\rightarrow \text{CaCO}_3$), puede arrojar fechas de hasta 600.000. Para ello se determinan las proporciones entre los isótopos $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ y $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (Schwarcz, 1989, p. 11; Bourdon, 2015, p. 922-923).

- El **travertino** es una roca formada por calcita autógena y biogénica. Permite obtener fechas de hasta 350.000 años mediante el análisis de la proporción entre los isótopos $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (Schwarcz, 1989, p. 12; Bourdon, 2015, p. 922-923).

- A través del análisis de **huesos** y **dientes**, cuyo principal componente es la apatita biogénica, se obtiene un rango cronológico de hasta 300.000 años. Para ello se determina la proporción entre los isótopos $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (Schwarcz, 1989, p. 13; Bourdon, 2015, p. 922-923).

3. La datación de **rocas volcánicas** permite obtener fechas de hasta 300.000 años. El análisis se realiza mediante la determinación de la proporción entre los isótopos $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (Bourdon, 2015, p. 922).

Además, en los últimos años se ha constatado la posibilidad de datar testigos de hielo, depósitos magmáticos e incluso la meteorización de una superficie (Bourdon, 2015, p. 924-927).

¹ Mineral formado dentro de la cuenca sedimentaria como resultado de procesos químicos o bioquímicos (*Real academia de ciencias exactas, físicas y naturales. Glosario de Geología.*). Algunos ejemplos son la calcita, el aragonito, la halita o la apatita.

² [Terrenos, roca o mineral] Producidos por la acción o la presencia de organismos vivos o de sus restos (*Real academia de ciencias exactas, físicas y naturales. Glosario de Geología.*). Algunos ejemplos son la calcita y el aragonito presentes en los esqueletos de los corales y las conchas de los moluscos, o la apatita presente en los huesos.

Esta amplia amalgama de materiales permite que el método de datación sea aplicado en numerosas disciplinas como la geología, biología, hidrología o arqueología con objetivos tan dispares como las reconstrucciones paleoclimáticas e históricas, la predicción de erupciones volcánicas o la determinación de las curvas de calibración para la datación por radiocarbono (Hoffmann *et al.*, 2013, p. 91; van Calsteren y Thomas, 2016, p. 155; Sauvet *et al.*, 2017, p. 91).

5.3. Condiciones para la aplicación del método

En primer lugar, deben cumplirse tres hipótesis básicas:

1. La muestra debe comportarse como un sistema químicamente cerrado desde el momento de su formación, es decir, no puede haber ganancia o pérdida de ningún isótopo excepto la causada por la desintegración radiactiva (Schwarcz, 1989, p.9).

2. En el momento de formación, la presencia de ^{230}Th debe ser cero. Sin embargo, en muchos casos, en el momento de formación de la calcita pudo haber intrusión de ^{230}Th a través de partículas sólidas de limos o arcillas o sales presentes en ácidos orgánicos (ácidos húmicos) que quedan integradas en la formación. La cantidad de este isótopo debe ser calculada para poder contrarrestar la contaminación a través de cálculos matemáticos.

3. La cantidad de uranio presente en la muestra debe ser mayor a 0.05 ppm (partes por millón) (Borsato *et al.*, 2005, p. 72)

Antes de proceder a la toma de muestras, es necesario además confirmar ciertos aspectos y documentar la siguiente información:

- Demostrar la relación estratigráfica entre el espeleotema y la pintura y tomar documentos fotográficos que lo confirmen (figura 4) (Hoffmann *et al.*, 2016, p. 107).

- Describir el tipo de formación que se va a analizar (estalactita, banderola, costra de calcita...), la morfología, el sentido de crecimiento y grado de suciedad y humedad, etc. (Hoffmann *et al.*, 2016, p. 107). La



Figura 4: pigmento bajo PAS 30, confirmando la relación estratigráfica entre este y la muestra. Hoffmann *et al.*, 2016, p. 109.

calidad de la muestra se determinará según el grado de cristalización y la ausencia de detritos que conlleven contaminación (Pike *et al.*, 2013, pp. 464).

- Es recomendable seleccionar formaciones en las que se pueda determinar el sentido de crecimiento de la calcita, y recoger muestras sucesivas, de forma que si las edades obtenidas crecen en coherencia con la estratigrafía de las muestras se confirme la fiabilidad de los resultados (figura 5) (Hoffmann *et al.*, 2016, p. 107-108).

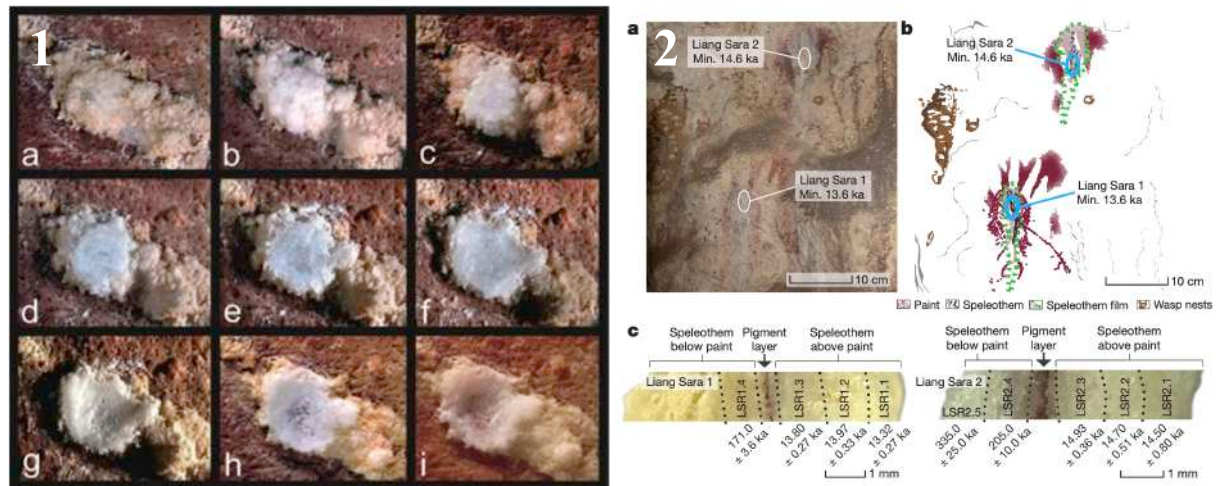


Figura 5: diferentes procedimientos para la toma de muestras. 1) recogida de sub-muestras de PAS 30 raspando con un escalpelo. Hoffmann *et al.*, 2016, p. 116; 2). Microexcavación de las muestras Liang Sara 1 y 2. Aubert *et al.*, 2018, p. 256.

- Tomar preferentemente muestras de calcita compacta, no porosa, ya que estas son más susceptibles de comportarse como un sistema abierto (Plagnes *et al.*, 2003, p. 173).
- Asegurar que no ha habido tratamientos de restauración previos ni presencia de pigmento en la muestra, ya que puedan contaminar los resultados (Hoffmann *et al.*, 2016, p. 107).
- Por último, es recomendable realizar un estudio hidrológico y geomorfológico de la cueva, para poder entender más detalladamente la historia de la formación de espeleotemas en cada sitio concreto (White *et al.*, 2019a, p. 5).

5.4. Ejecución del método

5.4.1. Toma de muestras

Todo el proceso debe ser realizado con cuidado de no tocar las paredes ni la pintura para evitar la contaminación. El polvo puede contaminar la muestra, por tanto, antes de la recogida es necesario limpiar la superficie de la misma. Para ello, se raspa la capa externa de la costra con un escalpelo, y se retiran los restos con un soplador de polvo.

En la mayor parte de los casos se datan **costras de calcita** (Hoffmann *et al.* 2016; Valladas *et al.*, 2017; Pike *et al.*, 2015; Shao *et al.*, 2021). La metodología mejor descrita es la de Hoffmann *et al.*, 2016 en La Pasiega (Puente Viesgo, Cantabria) y Fuente del Trucho (Huesca, Aragón), aunque es similar a la seguida por Valladas *et al.*, 2017 en la Cueva de Nerja (Nerja, Málaga). Se intentan tomar muestras de entre 5 y 10 miligramos, aunque en ocasiones se ha analizado menos cantidad. La superficie de la formación se raspa usando un escalpelo y el polvo cae dentro del tubo. En aquellos casos en los que la inclinación de la pared no lo permita, se puede colocar un recogedor y después verter la muestra en el tubo (figura 6). Como se menciona anteriormente, se debe intentar

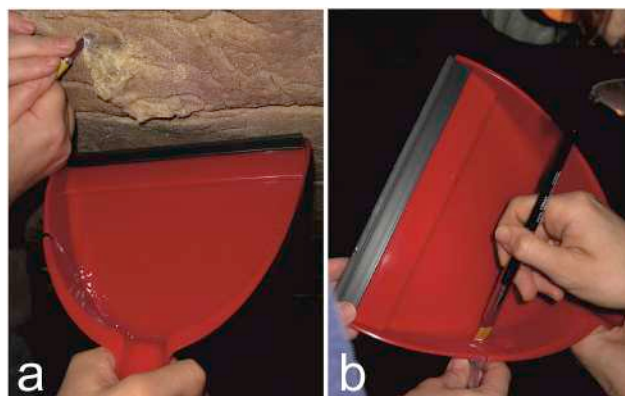


Figura 6: recogida de la muestra usando un recogedor. Hoffmann *et al.*, 2016, p. 108.

tomar varias muestras en orden estratigráfico, para después poder comprobar la coherencia de las fechas con el crecimiento de la formación; si no es posible determinar la dirección de crecimiento, se recomienda tomar igualmente muestras sucesivas. En las cuevas de Church Hole y Robin Hood (Creswell, Reino Unido) (Pike *et al.*, 2005, p. 1652), donde además se muestrearon costras de calcita más gruesas (> 2 milímetros), se usó una herramienta rotativa tipo DREMEL a la que se le incorporó una broca de corona diamantada (figura 7) para extraer un cilindro completo.



Figura 7: broca de corona de 10 milímetros diamantada. <https://www.megataller.com/corona-perforadora-diamantada-10-mm>

En el caso de pequeñas **estalagmitas**, como en la cueva La Pasiega (Hoffmann *et al.*, 2016), se debe extraer la muestra completa para estudiarla con mayor detalle en el laboratorio. Se utilizó también una herramienta rotativa tipo DREMEL, en esta ocasión añadiéndole un disco de corte de 5 milímetros recubierto de diamante (figura 8).



Figura 8: herramienta rotativa tipo DREMEL con disco de corte diamantado de 5 milímetros. Hoffmann *et al.*, 2016, p. 108.

Por último, en **formaciones de mayor tamaño**, contamos con el ejemplo de la Cueva de Guah Saleh

(Kalimantan-Timur, Borneo) (Plagnes *et al.*, 2003), donde se analizó una banderola. Se estudió el crecimiento de la banderola gracias a un corte transversal y permitiendo la planificación de la toma de muestras. En este caso se desprendió un fragmento de unos 15 centímetros de alto, del que después se extrajeron varias muestras. Tres muestras sucesivas se extrajeron de la zona más cercana a la mano superior y la pared de la cueva. Otra muestra se tomó en la zona próxima a la mano inferior y, por último, una en la zona exterior (figura A20). Se realizó datación cruzada por radiocarbono, ya que se consideró que era muy posible que la formación no cumpliera la condición de sistema cerrado (Plagnes *et al.*, 2003, p. 173).

5.4.2. Tratamiento de muestras

Los procesos a los que se somete la muestra previamente al análisis son similares en todos los casos. A continuación, se describe la metodología descrita en el artículo “*Methods for U-series dating of CaCO_3 crusts associated with Palaeolithic cave art and application to Iberian sites*” por Hoffmann *et al.*, 2016 en las cuevas de La Pasiega (Puente Viesgo, Cantabria) y Fuente del Trucho (Huesca, Aragón).

En primer lugar, es necesario realizar una inspección ocular con el microscopio para identificar las partículas de suciedad y, si es posible, retirarlas manualmente.

Si se han tomado varias muestras de la misma formación, primero se analiza una de ellas para obtener datos sobre las concentraciones de uranio presentes y así optimizar los tratamientos físico-químicos en el resto de las muestras, cuyo objetivo es eliminar las impurezas y separar los isótopos de uranio y torio de la calcita (carbonato cálcico $\rightarrow \text{CaCO}_3$) que los contiene.

En primer lugar, se pesa el tubo que contiene la muestra, se añade agua MilliQ (agua ultrapura) y se cierra de nuevo. Se agita y se traspasa a un vial de PFA (perfluoroalcóxido) limpio. Si no se ha podido transferir todo el polvo de la muestra al vial, se repite el proceso. El vial se coloca en un entorno sin polvo y se deja secar completamente la muestra para después extraerla y pesar el vial vacío para, calculando así el peso de la muestra. Después, se añade a la muestra la cantidad necesaria de 7 M HNO_3 (ácido nítrico) para que quede totalmente disuelta.

En este momento se incorpora un trazador (*spike solution*), es decir, una solución con una cantidad conocida de determinados isótopos (por ejemplo, ^{236}U y ^{229}Th), lo que permitirá comprobar durante el análisis que la medición de las abundancias isotópicas es correcta.

Se cierra herméticamente el vial y se pone a reflujo en una placa calefactora a 80°C durante unas horas para equilibrar la muestra y el trazador (si aún no se ha disuelto toda la muestra, es conveniente separarla del resto y someterla a reflujo al menos 24 horas más). Este proceso asegura que tanto la muestra como el trazador se encuentran en el mismo estado de oxidación.

La muestra se vuelve a disolver en 0,5 mililitros de 7 M HNO₃, se transfiere a tubos de micro centrifugación y se centrifuga. Si se han conseguido eliminar por completo los residuos sólidos de la muestra, la solución se devuelve al vial PFA haciendo uso de una pipeta. Para acabar totalmente con los residuos orgánicos que puedan quedar presentes, la muestra se disuelve en 50 microlitros de HNO₃ concentrado y 5 microlitros de H₂O₂ (peróxido de hidrógeno) concentrado, se cierra el vial y se calienta en una placa calefactora a 90°C durante al menos 2 horas. Después, se añaden 50 microlitros de HCl (ácido clorhídrico) concentrado y se calienta a 90°C durante al menos 12 horas. Por último, se deshidrata la solución y la muestra se disuelve de nuevo en 600 microlitros de HCl.

En este momento, la muestra está lista para hacerla pasar por la columna cromatográfica, proceso con el que se consigue separar el uranio y el torio en dos fracciones. Para ello, la muestra se pasa por una columna cromatográfica junto a varios tipos de resina; en Hoffmann *et al.*, 2016 se usan resinas BioRad™ AG 1 x8 y Eichrom™ UTEVA mientras que en Plagnes *et al.*, 2003 son resinas Eichrom™ TEVA y Eichrom™ UTEVA. Al igual que en apartados anteriores, se describe a continuación el proceso seguido por Hoffmann *et al.*, 2016.

En primer lugar, la muestra se pasa por la columna junto con resina AG 1x8, que previamente se ha limpiado con 6M HCl; de este modo se obtienen dos fracciones: una contiene torio y calcio (procedente de la matriz de carbonato cálcico) y la otra, uranio. La fracción de uranio se separa de la resina añadiéndole 1M HBr (ácido bromhídrico) y se introduce en un vial PFA. Después ambas fracciones se deshidratan. A partir de este momento, el tratamiento para la purificación de cada fracción es diferente, ya que en la fracción que contiene el torio es necesario eliminar el calcio, mientras que en la de uranio no.

La fracción con torio se disuelve en 7M HNO₃ y se vuelve pasar por la columna con resina AG 1x8 (al finalizar el proceso anterior, la resina se ha limpiado con HCl y agua MilliQ, y acondicionado con 7M HNO₃). El torio se separa de la resina con 6M HCl, se deshidrata y se vuelve a disolver en 3M HNO₃.

En este momento, ambas fracciones se pasan por las columnas con resina UTEVA. En primer lugar, la fracción de uranio se disuelve en 3M HNO₃ y se pasa por la columna con la resina previamente acondicionada con 3M HNO₃. El uranio se separa de la resina con 0'02M HCl. La resina se limpia con agua MilliQ y se acondiciona de nuevo con 3M HNO₃. En este momento la fracción de torio, previamente disuelto en 3M HNO₃, se pasa por la columna con la resina; la resina se separa con 3M HCl. Ambas fracciones se evaporan hasta quedar deshidratadas y se vuelven a diluir en 0'5M HCl, listas para el análisis.

5.4.3. Análisis de muestras

El análisis, como se menciona previamente, se basa en la cuantificación de las abundancias isotópicas de la muestra. Esta suele presentar, por su naturaleza, una cantidad muy baja de cada isótopo, por lo que las técnicas de análisis deben ser muy sensibles.

Hasta los años 90, la técnica más usada era la espectrometría nuclear; sin embargo, para isótopos de vida larga como el ²³⁴U, ²³⁰Th o ²³¹Pa no era suficientemente sensible. La incorporación de la espectrometría de masas que permite cuantificar la mayoría de elementos de la tabla periódica, hizo posible reducir el tiempo necesario para el análisis y aumentar significativamente el número de aplicaciones posibles. Existen múltiples variantes de la técnica en función de la característica adicional que posean (espectrometría de masas de ionización térmica o TIMS, espectrometría de masas con acelerador o AMS y espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente o ICP-MS (Bourdon *et al.*, 2015, p. 921).

En gran parte de los casos, la técnica escogida es la espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente o ICP-MS (Pike *et al.*, 2013; Fontugne *at al.*, 2013; Aubert *et al.*, 2014; Hoffmann *et al.*, 2016; García-Diez *et al.*, 2016; Pike *et al.*, 2016; Valladas *et al.*, 2017; Shao *et al.*, 2017; Hoffmann *et al.*, 2018a), aunque en el caso de muestras sólidas, se aplica espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente con ablación láser (LA-ICP-MS) (Taçon *et al.*, 2012, p. 492; <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis/espectrometria-de-masas-por-plasma-de-acoplamiento-inductivo.html>).

Para el análisis mediante ICP-MS, la muestra debe estar en estado líquido; a través de una bomba peristáltica se transporta hasta el sistema nebulizador que, usando gas Argón, la transforma en aerosol. La muestra, ya en forma de gas, se transporta a la zona de ionización: allí se somete el gas Argón a la acción de un campo magnético cuyo objetivo es ionizar la

muestra. Mediante un filtro cuadrupolar se separan los iones según su carga/masa y el detector determina la abundancia de cada tipo de isótopo (<https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis/espectrometria-de-masas-por-plasma-de-acoplamiento-inductivo.html>).

5.5. Fuentes de error

5.5.1. Causas provocan la sobreestimación de las fechas

Si la muestra se comporta como un **sistema abierto**, puede haber pérdida de uranio. En espeleotemas de gran tamaño no constituye un gran problema; sin embargo, cuando las dataciones se realizan sobre finas costras de calcita o formaciones porosas, es más habitual. Esto puede suceder cuando las condiciones climáticas en las que se formó el espeleotema cambian, lo que da lugar a recristalizaciones (el mineral aragonito recristaliza en calcita [White *et al.*, 2019b, p. 22]) o a la circulación de agua por la superficie de la muestra y, por tanto, su disolución (Borsato *et al.*, 2005, p. 72). La constatación de este hecho entraña dificultades, aunque existen ciertos valores que pueden indicar la posibilidad de que se esté dando un sistema abierto (Pons-Branchu *et al.*, 2014, p. 213-214; Sauvet *et al.*, 2017, p. 87; Sauvet, 2017, p. 188):

- La proporción entre los isótopos $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ debe aproximarse a 1 (Sauvet *et al.*, 2017, p. 87).
- La proporción entre los isótopos $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ debe aproximarse también a 1 (Pons-Branchu *et al.*, p. 213-214).

Si los valores de las proporciones de estos isótopos se encuentran muy por encima de este valor, lo más probable es que la formación de calcita se comporte como un sistema abierto y, por tanto, las fechas obtenidas en su datación sean erróneas.

La recogida de muestras sucesivas también puede dar pistas. En el caso de La Pasiega (Hoffmann *et al.*, 2016, p. 114) se observa cómo al obtener los resultados de las sub-muestras recogidas estratigráficamente, se produce una inversión de la edad (las edades son mayores en la parte más externa de la calcita).

La muestra puede presentar **contaminación por ^{230}Th detrítico**. Como se menciona anteriormente, este tipo de contaminación se puede determinar y contrarrestar.

- Para ello, se calcula la cantidad de ^{232}Th presente en la muestra y, si la proporción entre $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ es superior a 20, la contaminación se considera despreciable y puede ser corregida (Pons-Branchu *et al.*, 2014, p. 213-214; Sauvet, 2017, p. 188; Sauvet *et al.*, 2017, p. 87).

- La proporción entre los isótopos $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ también puede indicar la contaminación por ^{230}Th . Un estudio realizado en 28 cuevas de los Alpes italianos, en las que se tomaron un total de 130 muestras, demostró que en el 33% de los casos esta proporción era mayor que 1. Dado que la cantidad de uranio en las diferentes muestras era homogénea, la única explicación posible de esta variabilidad es la contaminación por ^{230}Th (Borsato *et al.*, 2005, p. 75; Sauvet *et al.*, 2017, p. 87)

Por último, la constatación de la **relación estratigráfica entre la pintura y la muestra** entraña cierta problemática. Encontramos el caso de Sulawesi, donde una formación que aparentemente se situaba sobre la pintura, en realidad presentaba restos de pintura en su superficie, por lo que ya estaba presente en el momento de ejecución de la representación.

5.5.2. Causas que provocan la infraestimación de las fechas

A pesar de que la formación de espeleotemas depende de las condiciones de cada cueva, se han observado ciertas generalidades que la determinan. El crecimiento de estos depende de las condiciones climáticas existentes y, por tanto, de la temperatura, las precipitaciones, la vegetación y otros factores medioambientales. Por tanto, en periodos como el Paleolítico superior, más fríos y secos, la formación de espeleotemas se frenó en numerosas cuevas; sin embargo, con la llegada del interestadio templado Bölling-Alleröd y el inicio del Holoceno y, por tanto, unas condiciones climáticas mucho más húmedas, la formación de espeleotemas incrementó notablemente (Sauvet *et al.*, 2017, p. 87). Es por ello que en numerosas ocasiones se obtienen fechas anormalmente recientes que no dan información alguna acerca de la posible cronología de las pinturas.

5.5.3. Errores de interpretación

En las cuevas afloran **coloraciones** rojas que pueden ser **interpretadas erróneamente como pinturas rupestres**, aunque en realidad son causadas por microorganismos u óxidos. Es conveniente realizar análisis físico-químicos para determinar la composición química de estas manchas, su estructura y su micromorfología, para poder comprobar que se trata de una pintura

rupestre y no de un fenómeno natural (Aubert, Brumm y Huntley, 2018, p. 2). Por otra parte, algunos investigadores también contemplan la posibilidad de que los individuos que transitaban la cueva vistiesen prendas impregnadas de ocre o cubriesen sus cuerpos con él, de forma que las manchas quedasen fijadas de forma accidental y no por una voluntad artística (Medina-Alcaide *et al.*, 2018, p. 74-76).

Por último, es necesario señalar que, de **no confirmarse correctamente la relación estratigráfica entre la pintura y la muestra** tomada, las fechas obtenidas carecen de significado alguno. En “*Early dates for ‘Neanderthal cave art’ may be wrong*” (Aubert, Brumm y Huntley, 2018, p. 1) señalan posibles errores en “*U-Th dating of carbonate crusts reveals Neandertal origin of Iberian Cave Art*” (Hoffmann *et al.*, 2018a), aunque se tratarán posteriormente.

6. Casos de estudio

6.1. Las cuevas de La Pasiega, Maltravieso y Ardales (Hoffmann *et al.*, 2018a)

En el artículo publicado en 2018 por Hoffmann *et al.* titulado “*U-Th dating of carbonate crusts reveals Neandertal origin of Iberian Cave Art*” se exponen los resultados de las muestras tomadas en las cuevas de La Pasiega, Maltravieso y Ardales (figura A1).

6.1.1. Las cuevas y sus representaciones

La **Cueva de La Pasiega** (figura A2) pertenece a un conjunto de cinco cuevas situadas en Monte Castillo, Cantabria. Se incluye en el sitio declarado Patrimonio de la Humanidad por la Unesco “*Cueva de Altamira y arte rupestre paleolítico del norte de España*”. Está compuesta por tres galerías principales, a lo largo de las cuales se distribuyen numerosas pinturas, principalmente rojas y negras (diferentes tipos de animales, signos lineales y claviformes, puntos y posibles antropomorfos), además de grabados con representaciones animales y formas lineales. A lo largo de los años se han tomado un total de treinta muestras, algunas de ellas publicadas en Pike *et al.*, 2012; Hoffmann *et al.*, 2016 y Pike *et al.*, 2017.

La **Cueva de Maltravieso** (figura A6) se sitúa dentro de la ciudad de Cáceres, en Extremadura. Presenta numerosas pinturas y grabados con representaciones de animales (caballos, toros e íbex), puntos, triángulos, discos rojos, líneas, espeleotemas con manchas de color rojo y alrededor de 60 manos en negativo. Se tomaron 5 muestras de la mano GS3b situada

en la Galería de la Serpiente, descubierta recientemente gracias a la herramienta de análisis de imagen DStretch.

La **Cueva de Ardales** (figura A9) se localiza en la localidad homónima, perteneciente a la provincia de Málaga, Andalucía. A lo largo de su recorrido, presenta alrededor de 1000 pinturas y grabados con representaciones de animales (caballos, ciervos, pájaros), puntos, discos, líneas y manos. Además, numerosas cortinas estalagmíticas presentan pigmentos rojos a los que no se ha podido adjudicar tipología alguna.

6.1.2. La toma de muestras

Antes del muestreo, en los tres casos se documentaron las características de las formaciones y se limpió la superficie para eliminar la posible contaminación. En aquellas ocasiones en las que después de la limpieza superficial no se pudo recoger más de una muestra, se analizó también la capa de limpieza. Además, antes, durante y después del muestreo se confirmó la relación estratigráfica entre las costras de calcita y el pigmento.

Los resultados de la **Cueva de La Pasiega** reflejados en este artículo corresponden a las muestras PAS 33, PAS 34, PAS 35 PAS 36, PAS 37, PAS 38 y PAS 39, aunque la interpretación de los mismos se centra en la muestra PAS 34 y sus sub-muestras. Todas son costras de calcita de tipo coliflor.

Las muestras PAS 33, 34 (34a, 34b y 34c), 35 y 38 se tomaron en el panel 78, sobre el motivo denominado “*La Trampa*” por Breuil, compuesto por un escaleriforme, zoomorfos incompletos, puntos rojos y un símbolo. Las dos primeras se tomaron sobre la figura escaleriforme, PAS 35 se tomó sobre el ciervo rojo situado a la izquierda de los puntos rojos, y la muestra PAS 38 sobre los propios puntos (figuras A3, A4 y A5)

La muestra PAS 36 se tomo sobre un zoomorfo rojo en el Panel 82, PAS 37 sobre una representación tectiforme en el Panel 76 y PAS 39 también sobre un tectiforme situado en el Panel 72 (figura A5).

En la **Cueva de Maltravieso** se tomaron 5 muestras situadas sobre la mano GS3b, descubierta recientemente en la Galería de la Serpiente gracias a la herramienta de análisis de imagen DStretch (figura A7). La muestra MAL 13 consta de dos sub-muestras (MAL 13a y 13b), MAL 14 de tres (MAL 14a, 14b y 14c), MAL 15 de seis (MAL 15a, 15b, 15c, 15d, 15e y

15f), MAL 17 de cuatro (MAL 17a, 17b, 17c y 17d) y MAL 19 de dos (MAL 19a y 19b) (figura A8).

Además, se tomaron muestras de sedimento cerca de los paneles III y IV y una sección de 30 milímetros de una estalagmita para controlar la cantidad de contaminación por torio detrítico presente.

En **Ardales** se tomaron un total de 13 muestras (ARD 6, ARD 7, ARD 8, ARD 9, ARD 10, ARD 12, ARD 13, ARD 14, ARD 15, ARD 16, ARD 26, ARD 27, ARD 28) en los paneles II-A-3, III-C-8 y entre los paneles III-C-2 y III-C-3 (figura A9). Todas corresponden a fragmentos de cortinas estalagmíticas con manchas rojas.

Las muestras tomadas en el Panel II-C-8 son ARD 6, 7, 8 y 9 y 10. ARD 6, 7 y 10 se situaban bajo la pintura, mientras que ARD 8 y 9 estaban sobre ella (figuras A10 y A11).

En el Panel II-A-3 se tomaron las muestras ARD 12, 13, 14, 15 y 16 (figuras A12 y A13).

- Las muestras ARD 12 (ARD 12a, 12b, 12c y 12d) y ARD 13 /ARD 13a y 13b) se tomaron en la cortina 8 y corresponden a calcita situada sobre la pintura.
- ARD 14 y ARD 15 (ARD 15a y 15b) se localizan en la cortina 4. La formación estaba partida, por lo que la primera muestra se tomó bajo la pintura y la segunda sobre ella.
- La muestra ARD 16 (ARD 16 a, 16b y 16c) corresponde a la cortina 5.

Las muestras ARD 26, ARD 27 y ARD 28 se tomaron en una cortina situada entre los Paneles III-C-2 y III-C-3, bajo la pintura y sobre ella (figuras A14 y A15).

6.1.3. Resultados e interpretación

Se han obtenido resultados de un total de 25 muestras (sin detallar las sub-muestras), 6 en La Pasiega, 6 en Maltravieso (a los que hay que añadir 3 más procedentes del sedimento recogido y 1 de la estalagmita) y 13 en Ardales. Los autores se han centrado en las muestras expuestas en la figura 9, ya que estas fechas son las más interesantes y novedosas. Para calcular las edades mínimas y máximas, se ha sumado el error a la edad máxima y restado a la edad mínima (ej. Cortina 4: edad máxima [ARD 14a] $\rightarrow 47.640 + 1.070 = 48.710$ años; edad mínima [ARD 15b] $\rightarrow 44.250 - 1.770 = 42.480$ años).

Para **La Pasiega**, la sub-muestra PAS 34c (la más cercana al pigmento) situada sobre la representación escaleriforme, proporciona una edad mínima de 64.760 años.

En el caso de **Maltravieso**, la muestra MAL 13 (proveniente de la limpieza de la superficie de la calcita) ofrece una edad mínima de 39.390 años, mientras que la muestra MAL 13a proporciona una edad mínima de 66.710 años.

Por último, en **Ardales** se exponen los resultados de 6 muestras. En los casos en que se pudo tomar muestras bajo y sobre la pintura, se obtuvo una horquilla de fechas que representa la edad mínima y máxima en la que se pudo realizar la pintura.

Spl ID	Site and description	^{238}U (ng/g)	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ uncorrected	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ uncorrected	Age uncorrected (ka)	Age corrected (ka)
PAS 34a	Pasiega C, no. 78, cauliflower-type carbonate on top of red line of scalariform motif, minimum age	289.29 ± 9.06	32.82 ± 0.21	1.5149 ± 0.0106	3.7694 ± 0.0082	52.52 ± 0.47	51.56 ± 1.09
PAS 34b	As above	215.56 ± 7.43	28.28 ± 0.19	1.5453 ± 0.0121	3.6744 ± 0.0094	55.53 ± 0.56	54.36 ± 1.39
PAS 34c	As above	178.31 ± 8.31	7.25 ± 0.07	2.0348 ± 0.0213	3.4591 ± 0.0092	85.79 ± 1.28	79.66 ± 14.90
MAL 13	Maltravieso, cauliflower-type surface cleaning fraction carbonate layer overlying hand stencil GS3b, minimum age	117.2 ± 1.99	12.47 ± 0.16	0.4639 ± 0.0068	1.1872 ± 0.0328	53.32 ± 2.30 or - 2.13	41.68 ± 2.44 or - 2.29
MAL 13A	As above	142.69 ± 3.39	37.50 ± 0.57	0.6067 ± 0.0123	1.2024 ± 0.0305	74.86 ± 3.78 or - 3.41	70.08 ± 3.82 or - 3.37
ARD 6	Ardales, red paint on curtain formation, II-C-8, carbonate from underlying curtain, maximum age	511.42 ± 6.38	34.95 ± 0.14	0.4661 ± 0.0021	1.0459 ± 0.0021	64.09 ± 0.44	62.97 ± 0.69
ARD 8	Ardales, red paint on curtain formation, II-C-8, carbonate from overlying curtain, minimum age	297.21 ± 2.89	145.58 ± 1.06	0.2703 ± 0.0018	1.0477 ± 0.0024	32.51 ± 0.26	32.35 ± 0.27
ARD 13A	Ardales, red paint on curtain formation, II-A-3 curtain 8, minimum age	1229.61 ± 25.84	152.83 ± 1.14	0.3661 ± 0.0033	1.0385 ± 0.0033	47.33 ± 0.57 or - 0.56	47.13 ± 0.56 or - 0.57
ARD 13B	As above	331.54 ± 13.53	42.59 ± 0.58	0.4878 ± 0.0073	1.0369 ± 0.0234	69.09 ± 2.93 or - 2.62	68.13 ± 2.96 or - 2.62
ARD 14A	Ardales, red paint on curtain formation, II-A-3 curtain 6, carbonate from underlying curtain, maximum age	684.76 ± 13.29	395.03 ± 4.91	0.3683 ± 0.0063	1.0379 ± 0.0029	47.72 ± 1.05 or - 1.02	47.64 ± 1.07 or - 1.03
ARD 15A	Ardales, red paint on curtain formation, II-A-3 curtain 6, carbonate from overlying curtain, minimum age	1696.03 ± 53.88	337.14 ± 3.63	0.3584 ± 0.0050	1.0374 ± 0.0025	46.15 ± 0.81 or - 0.82	46.06 ± 0.81 or - 0.77
ARD 15B	As above	667.98 ± 37.85	152.07 ± 3.27	0.3467 ± 0.0110	1.0347 ± 0.0061	44.45 ± 1.79 or - 1.82	44.25 ± 1.78 or - 1.77
ARD 16A	Ardales, red paint on curtain formation, II-A-3 curtain 5, carbonate from overlying curtain, minimum age	313.84 ± 5.88	58.92 ± 0.74	0.3317 ± 0.0044	1.0323 ± 0.0051	42.23 ± 0.74 or - 0.72	41.75 ± 0.77 or - 0.72
ARD 16B	As above	250.2 ± 4.29	84.25 ± 0.84	0.3628 ± 0.0050	1.0314 ± 0.0051	47.23 ± 0.85 or - 0.83	46.86 ± 0.85 or - 0.92
ARD 16C	As above	227.59 ± 28.55	56.70 ± 2.84	0.3690 ± 0.0213	1.0227 ± 0.0342	48.79 ± 4.26 or - 4.00	48.23 ± 4.43 or - 4.10
ARD 26A	Ardales, red paint visible as a line on cross section of a broken curtain, between III-C-3 and III-C-2, carbonate from overlying curtain, minimum age	564.64 ± 13.56	1004.53 ± 20.81	0.3243 ± 0.0099	1.0502 ± 0.0203	40.20 ± 1.84 or - 1.69	40.17 ± 1.73 or - 1.77
ARD 26B	As above	532.37 ± 14.02	985.93 ± 24.33	0.3258 ± 0.0112	1.0496 ± 0.0113	40.45 ± 1.82 or - 1.70	40.42 ± 1.79 or - 1.78
ARD 28A	Ardales, red paint visible as a line on cross section of a broken curtain, between III-C-3 and III-C-2, carbonate from underlying curtain, maximum age	520.54 ± 8.11	4626.61 ± 188.57	0.3379 ± 0.0192	1.0458 ± 0.0124	42.48 ± 3.09 or - 2.91	42.47 ± 3.07 or - 2.97

Figura 9: Tabla de resultados para las cuevas de La Pasiega, Maltravieso y Ardales. Hoffmann et al., 2018, p. 3.

Las sub-muestras ARD 6 proporcionan una edad máxima de 63.660 años y la muestra ARD 8 una edad mínima de 32.323 años. Por tanto, se obtiene una horquilla entre 63.660 y 32.323 para la ejecución de la pintura.

Las sub-muestras ARD 13a y 13b devuelven una edad mínima de 46.560 y 65.510 años respectivamente.

Las sub-muestras ARD 14a (tomada bajo el pigmento) tiene una edad máxima de 48.710 años y ARD 15a y 15b, una edad mínima de 45.250 y 42.480 años respectivamente. En este caso se obtiene una horquilla entre 48.710 y 42.480 año. Es interesante señalar en este caso que las sub-muestras ARD 15a y 15b presentan edades invertidas según su posición estratigráfica.

Las sub-muestras ARD 16a, 16b y 16c devuelven edades mínimas de 40.980, 45.940 y 44.130 años. De nuevo, la muestra más cercana al pigmento (ARD 16c) ofrece una edad más reciente que situada la muestra inmediatamente anterior (ARD 16b). Las submuestras ARD 26a y 26b reflejan una edad mínima de 38.400 y 38.640, mientras que la muestra ARD 28a representa una edad máxima de 45.440 años. En este caso se obtiene una horquilla entre 38.640 y 45.440 años.

Según los autores, este conjunto de fechas permite obtener las siguientes conclusiones:

- El motivo escaleriforme de La Pasiega debió realizarse en una fecha anterior a 64.760 años.
- En Maltravieso, la mano en negativo presenta una cronología mínima de 66.710 años.
- En Ardales, se establecerían uno o más periodos de ejecución de las pinturas: entre 63.660 y 32.323 (ARD 6 y ARD 8), entre 48.710 y 42.480 (ARD 14a y ARD 15a y 15b) y entre 38.640 y 45.440 años (ARD 26 y ARD 28).
- Todas las fechas, situadas antes o durante el proceso de llegada a la Península Ibérica del *Homo Sapiens*, indican que las representaciones debieron ser ejecutadas por Neandertales. Esta afirmación se apoya en las fechas obtenidas en la Cueva de los Aviones, donde se dataron también mediante Series de uranio las coladas formadas sobre el sedimento que contenía conchas de *Spondylus*, *Acanthocardia* y *Glycymeris* con residuos de pigmento, obteniendo una edad mínima de 114.000 años (Hoffmann *et al.*, 2018b, p. 1-3).

6.2. Cueva de Nerja (Valladas *et al.*, 2016)

En el año 2016 se publicaron en el artículo “*U/Th and ^{14}C crossdating of parietal calcite deposits: application to Nerja Cave (Andalusia, Spain) and future perspectives*” los resultados de la datación cruzada realizada sobre costras de calcita aplicando los métodos de Series de Uranio y ^{14}C en la Cueva de Nerja.

6.2.1. La cueva y sus representaciones

La cueva de Nerja se localiza en la localidad de Nerja (Málaga, Andalucía) (figura A16). Está compuesta por numerosas galerías, presentando una superficie total de 35.484 m² y 4843 metros de longitud (figura A17). En ella se localizan gran cantidad de pinturas: 32 zoomorfos (caballos, ciervos, íbex y cuadrúpedos indefinidos), 254 signos y 283 espeleotemas con manchas rojas.

6.2.2. La toma de muestra

Antes, durante y tras la toma de las muestras se verificó la relación estratigráfica entre las costras de calcita y la pintura. Además, se documentaron las características de cada formación. El muestreo se realizó en costras de calcita que habían crecido sobre manchas rojas realizadas en los espeleotemas.

La marca 1 se localiza en el Balcón de Cascada, situado en las Galerías Bajas. Se trata de tres puntos rojos en ocre, con unas dimensiones de 2 x 1'5 centímetros, realizados sobre una formación de tipo cortina. Los tres están alineados y se encuentran a una altura de 160 centímetros, justo en el centro de la formación. Sobre la pintura se formó una fina costra de calcita, de la que se tomó la muestra 4 (muestra GN14-17) (figura A18).

La marca 2 se localiza en la Sala del Fantasma. Se trata de puntos rojos de mayor tamaño realizados sobre una formación de tipo colada. En este caso se diferenciaron dos costras de calcita superpuestas (figura A19):

- La muestra 3a (GN12-25) se tomó de una costra de calcita de color más amarillento, localizada estratigráficamente sobre la pintura.
- La muestra 3b (GN12-27) se tomó de una costra de calcita de color gris, localizada sobre la muestra 3a. Para el análisis mediante Series de Uranio, esta muestra se dividió en tres partes, que se analizaron por separado (GN12-27 a, GN12-27 b y GN12-27 c).

Además, se tomaron dos muestras recientes para controlar los niveles de contaminación de la calcita.

- La muestra 1 (GN12-29) se tomó de una estalactita fistulosa aún activa, a la que ya se le habían realizado análisis por ^{14}C previamente.
- La muestra 2 (GN12-24) se tomó de un depósito formado sobre un cuenco colocado para recoger el agua que goteaba del techo.

6.2.3. Resultados e interpretación

Las fechas obtenidas mediante ^{14}C se corrigieron en función del contenido de carbono muerto (dcp: *dead carbon percentage* en inglés) que se asuma (0, 5, 10, 20 y 50%). Las edades son más recientes cuanto más alto es el valor de contaminación por carbono muerto, por tanto, se expresan las fechas en horquillas temporales, siendo la edad máxima aquella en la que el valor de la contaminación por carbono muerto es 0% y la edad mínima aquella en la que el valor asciende al 50% (figura 10).

Las fechas obtenidas mediante series de Uranio han sido corregidas asumiendo dos valores diferentes de contaminación, uno de ellos calculado gracias al análisis de una de las muestras recientes (GN12-24) (figura 11).

Ref. on map (Figure 1)	Lab code	Sample nr	Percent modern carbon (%)		^{14}C BP age		Calibrated interval range cal BP–0% dcp	Calibrated interval range cal BP–5% dcp	Calibrated interval range cal BP–10% dcp	Calibrated interval range cal BP–20% dcp	Calibrated interval range cal BP–50% dcp
1	SacA 34253*	GN12-29*	97.73	0.31	185	30	300, modern	Modern	Modern	Modern	Out of range
3a	SacA 34251	GN12-25	2.67	0.07	29,110	200	33,769–32,821	33,476–32,108	32,648–31,469	31,496–31,030	27,860–27,491
3b	SacA 34252	GN12-27	17.81	0.13	13,860	60	17,024–16,522	16,431–15,999	15,786–15,323	14,068–13,769	9,426–9,142
4	GifA15552 SacA 43953	GN14-17	7.46	0.08	20,850	30	25,374–25,002	25,018–24,351	24,300–23,819	23,301–22,716	18,709–18,430

Figura 10: tabla de resultados de la datación por ^{14}C en la Cueva de Nerja. Valladas et al., 2017, p. 1961.

Ref. on map (Figure 1)	Sample	^{238}U (ppm)		^{232}Th (ppb)		$\delta^{234}\text{U}_\text{M}$ (‰)		$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$		$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$		Age (yr BP)	$\delta^{234}\text{U}_\text{T}$ (‰)		Cor. age* yr BP, error	Cor. age** yr BP/yr AD, error		
1	GN12-29	19.600	0.043	11.73	0.12	31.5	0.6	0.0048	0.0001	24.70	0.41	446	9	31.5	0.6	415 ± 25	339	15
2	GN12-24	1.398	0.001	4.08	0.01	−6.0	1.09	0.005	0.0001	5.16	0.14	475	15	−6.0	1.1	475	15	1992
4	GN14-17	4.454	0.002	42.36	0.06	−14.9	1.1	0.2160	0.0006	68.93	0.18	26982	113	−16	1.1	26462	371	25189
3a	GN12-25	1.489	0.0004	56.54	0.16	12.5	1.0	0.4400	0.0016	38.18	0.14	62113	394	14.7	1.2	60276	1300	55848
3b	GN12-27 a	1.712	0.001	56.60	0.216	13.82	0.85	0.2547	0.0015	25.35	0.15	31500	243	14.87	0.92	29899	1037	26024
3b	GN12-27 b	2.319	0.001	78.05	0.142	1.33	1.83	0.2700	0.0013	25.41	0.12	34174	276	1.44	1.98	32460	1122	28321
3b	GN12-27 c	2.158	0.001	44.81	0.121	8.86	0.64	0.2513	0.001	38.31	0.14	31200	160	9.58	0.69	30144	685	27572

Figura 11: tabla de resultados de la datación por Series de Uranio en la Cueva de Nerja. Valladas et al., 2017, p. 1961.

Para la muestra 1 (GN12-29) las fechas por ^{14}C y Series de Uranio coinciden, indicando que la formación tiene una cronología reciente.

Las fechas otorgadas a las muestras 3a (GN12-25) y 3b (GN12-27 en el análisis por ^{14}C y GN12-27a, b y c mediante Series de Uranio), son coherentes de acuerdo a su posición estratigráfica, aunque las fechas para la misma muestra difieren en ambos análisis:

- Para la muestra 3a (GN12-25) las fechas de ^{14}C se sitúan entre 33.769 y 27.491 años, mientras que para las Series de Uranio es 55.848 ± 716 años.

- La muestra 3b (GN12-27) devuelve una horquilla de 17.024 a 9.148 años por ^{14}C , mientras que las tres muestras analizadas por series de Uranio ofrecen fechas muy distintas:

– GN12-27a: 26.024 ± 534 años.	– GN12-27b: 28.321 ± 579 años.	– GN12-27c: 27.572 ± 358 años.
---------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------

Por último, para la muestra 4 (GN14-17) las fechas sí coinciden, ya que se establece una horquilla de 25.374 a 18.430 años por ^{14}C y 25.189 ± 212 años para las Series de Uranio.

Atendiendo a los resultados, los autores concluyen que, para la muestra 4 (GN14-17) la coincidencia entre las fechas valida los resultados obtenidos mediante ambos métodos; sin embargo, la discrepancia entre los resultados de las muestras 3a y 3b, han de deberse al comportamiento de la costra de calcita como un sistema abierto, con la consiguiente pérdida de Uranio que conlleva.

7. Discusión

Desde hace más de una década y especialmente a partir de la publicación de las fechas que adjudican diversas pinturas rupestres a los Neandertales (Hoffmann *et al.*, 2018a), la comunidad científica ha mantenido un amplio debate acerca su veracidad. Muchos aspectos del método han sido sujeto de crítica, desde los resultados físico-químicos de la datación hasta la interpretación de los mismos. A continuación, se detallan los aspectos más controvertidos del método, en algunos casos ejemplificados con los dos artículos analizados previamente.

7.1. Datación cruzada

El uso de otros métodos de datación combinados con las Series de Uranio permite la contrastación de los resultados; de esta forma se puede constatar la fiabilidad de los dos métodos en el caso de que las fechas coincidan (como afirma Sauvet: “*en una datación cruzada, la coherencia entre ambas fechas es una forma de confirmación recíproca*” [Sauvet, 2017, p.

194]), mientras que la discrepancia de estas indica posibles alteraciones químicas en la muestra (contaminación, sistema abierto...) y, por tanto, los resultados de uno de los métodos (o ambos) no serían válidos (Pons-Branchu, 2014, p. 215).

El método más utilizado es el radiocarbono. Aunque entraña ciertos problemas para la datación de calcita derivados de su alto contenido en carbono muerto (que envejece las edades), esta contaminación puede ser estimada, y las fechas, corregidas. En el caso analizado previamente, en la Cueva de Nerja, la aplicación de los dos métodos ha permitido validar las fechas coincidentes en ambos métodos (GN12-29 [fechas recientes en ambos métodos] y GN14-17 [25.374 a 18.430 años por ^{14}C y 25.189 ± 212 años para las Series de Uranio]) y descartar aquellas que discrepan, detectando la causa posible (GN12-25 y GN12-27) (Valladas *et al.*, 2017, p. 1964-1965). La datación cruzada también ha sido aplicada de forma satisfactoria en Indonesia (Plagnes *et al.*, 2003) o en Brasil (Fontugne *et al.*, 2013).

7.2. ¿Pintura rupestre, manchas no intencionales o coloraciones naturales?

El origen antropogénico de las manchas rojas sobre los espeleotemas de la Cueva de Ardales ha sido cuestionado por numerosos investigadores (Slimak *et al.*, 2018, p. 2; White *et al.*, 2019a, p. 3; Aubert *et al.*, 2018, p. 1-2). Como se menciona anteriormente, pueden ser provocadas por la actividad de microorganismos u óxidos o por el roce de individuos (con pigmento impregnado sobre las prendas de ropa o sobre la piel) con los espeleotemas.

En el supuesto de que las pinturas no sean intencionales sino fruto procesos naturales, las implicaciones para las fechas de La Pasiega, Maltravieso y Ardales serían graves, ya que la afirmación de que los Neandertales tenían un comportamiento simbólico (Hoffmann *et al.*, 2018a; García-Diez *et al.*, 2018) perdería toda la validez.

En el caso de la Cueva de Nerja, se acepta que las marcas rojas son intencionales porque, en la Sala de los Órganos, otras manchas en espeleotemas están asociadas a representaciones animales (White *et al.*, 2019a, p. 3). La localización de los puntos que constituyen la marca 1, en el centro de la cortina y alineados (aparentemente deliberado), también parece apoyar esta hipótesis.

7.3. Contradicciones con el conocimiento arqueológico previo

En el caso de Maltravieso, la horquilla de edades obtenida en la mano GS3b se sitúa entre los 12.780 años (MAL 17a) a 66.710 años (MAL 13a). Este tipo de representaciones se

habían encuadrado en el periodo Gravetiense mediante la datación de manos en otras cuevas (entre 25.000 y 31.500 años) y otros objetos asociados; sin embargo, las dataciones de Maltravieso contradicen esta información (White *et al.*, 2019a, p. 5). Los investigadores además indican que en la Cueva de Maltravieso se localizan manos escorzadas, característica que también se identifica en las cuevas de Gargar y Tibiran en el Pirineo francés y Fuente del Trucho y Cudón en España, de cronología Gravetiense.

El símbolo escaleriforme de La Pasiega (edad mínima de 64.760 años para la muestra PAS 34c) es el que más críticas ha generado. En otras cuevas cercanas se han localizado símbolos parecidos (representaciones cuadrangulares divididas en tres partes) que sí han podido ser datados de forma directa, obteniendo una edad de 18.699 ± 219 años en la Cueva de Altamira y 16.899 ± 231 años en la Cueva de Las Chimeneas. Además, estos símbolos suelen estar asociados a zoomorfos (figura 11) (White *et al.*, 2019a, p. 3-6) que han podido ser datados en

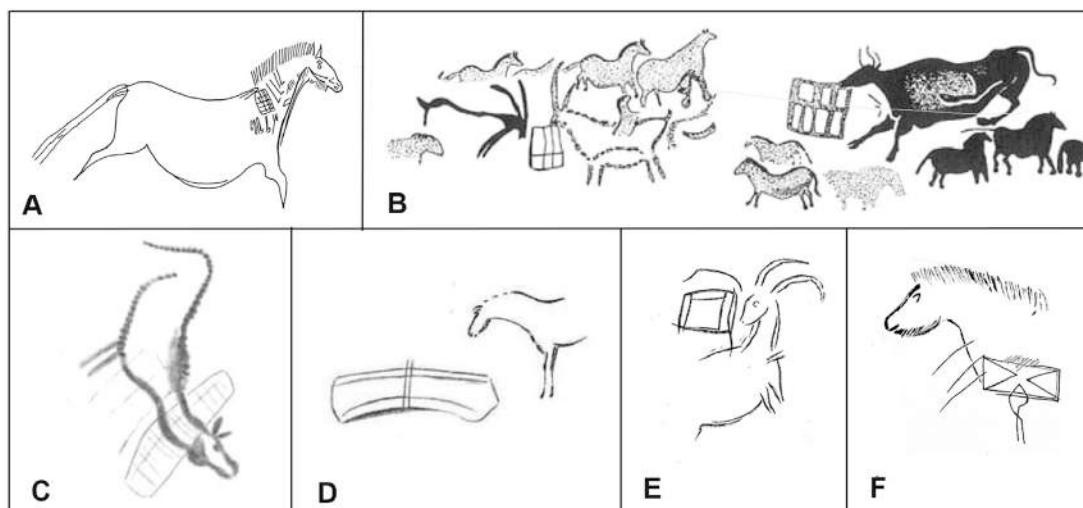


Figura 11: ejemplos de zoomorfos asociados a signos rectangulares. A) Lascaux; B) Lascaux; D) La Pasiega A; E) Gabillou; F) Cosquer. White *et al.*, 2019a.

la propia Cueva de La Pasiega, ofreciendo fechas de 14.626 ± 308 años para un bisonte y 16.600 ± 211 años para un íbex. Señalan que sería conveniente realizar un análisis de los paneles para determinar qué representaciones se realizaron primero, ya que según las afirmaciones de Breuil, en el Panel 78 las figuras de zoomorfos serían previas al símbolo escaleriforme. De ser así, los Neandertales también serían los autores de las representaciones zoomorfas y, por tanto, la afirmación de que “los neandertales realizaron un conjunto de representaciones limitado y no figurativo” (Hoffmann *et al.*, 2018a, p. 914) sería falsa.

Aunque la cronología estilística no es válida *per se* para rechazar las fechas de La Pasiega y Maltravieso, numerosos investigadores inciden en la necesidad de combinar los

resultados de las dataciones con todo el conocimiento previo disponible (información proveniente de las excavaciones arqueológicas, otras dataciones...) (White *et al.*, 2019b, p. 20), algo que muchos investigadores piensan que no se ha hecho en “*U-Th dating of carbonate crusts reveals Neandertal origin of Iberian Cave Art*” y así ha sido reflejado: “este anuncio, que solo se apoyaba en mediciones físico-químicas de la proporción torio-uranio conservada en las concreciones de carbonatos formadas sobre las pinturas, desdeñaba los conocimientos adquiridos a lo largo de más de un siglo de investigaciones arqueológicas y de muy numerosas dataciones obtenidas mediante la aplicación de otros métodos, como la termoluminiscencia o el C14” (White *et al.*, 2019b, p. 20).

7.4. Relación entre el pigmento y la muestra

Han surgido dudas acerca de la fiabilidad a la hora de atestiguar la relación entre el espeleotema y la pintura en aquellas ocasiones en que el muestreo se realiza por raspado, de forma que no se llega a alcanzar el pigmento (metodología seguida en Hoffmann *et al.*, 2018a; figura 5). En una cueva de Sulawesi

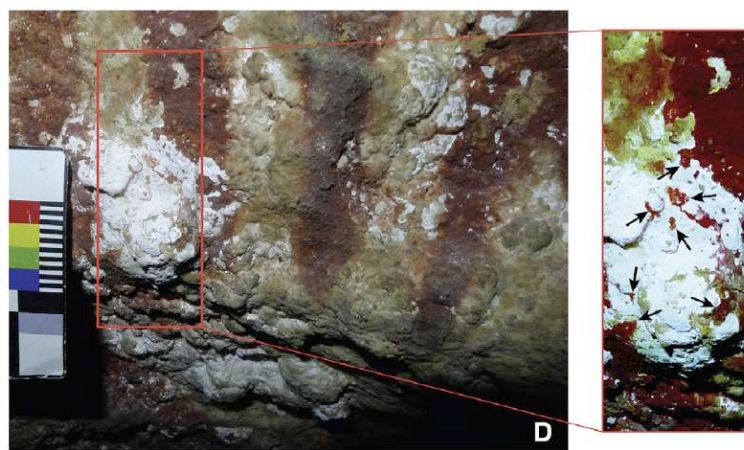


Figura 13: restos de pigmento en la superficie de la calcita; a la derecha aplicación de la herramienta de análisis de imagen DStretch. Aubert Brumm y Huntley, 2018.

(Indonesia) se comprobó mediante la herramienta de análisis de imagen DStretch, que la costra de calcita que aparentemente cubría una mano en negativo, en realidad estaba presente antes de su ejecución y el pigmento había desaparecido por el discurrir del agua (figura 13). Señalan que esto pudo suceder en las muestras que corresponden a las fechas más antiguas de La Pasiega, Maltravieso y Ardales (Aubert, Brumm y Huntley, 2018, p. 3).

7.5. Coherencia entre las edades y la estratigrafía de las muestras

Al igual que en el anterior caso, diversos investigadores indican que la técnica de muestreo usada por el equipo de La Pasiega, Ardales y Maltravieso (raspando la formación para obtener sub-muestras) no permite controlar la estratigrafía de la muestra. Esta situación es bastante problemática, ya que el equipo investigador de dichas cuevas asegura que la forma de verificar la hipótesis del sistema cerrado, es comprobar la coherencia de las fechas con la

estratigrafía de las muestras (Hoffmann *et al.*, 2016, p. 117), afirmación que ellos mismos parecen contradecir: “*the chronological homogeneity of the sample is unknown and cannot be assumed, as is the case with most, if not all of our samples*” (Pike *et al.*, 2017, p. 44) (figura 14), traducido: la homogeneidad cronológica de la muestra se desconoce y no puede ser asumida, como es el caso de la mayoría de nuestras muestras, sino todas.

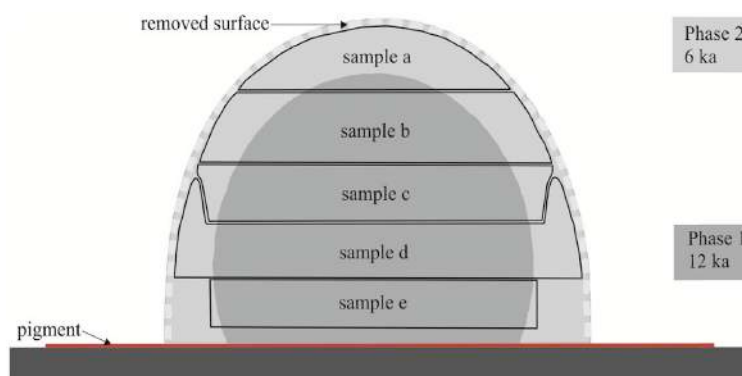


Figura 14: esquema de crecimiento de una formación de tipo coliflor, donde se aprecian dos fases y la toma de muestras en la que se mezclan. Hoffmann *et al.*, 2016.

7.6. Destrucción del patrimonio

La mejor forma de confirmar la relación directa entre la pintura y el espeleotema que la cubre y además controlar la estratigrafía de la formación es obtener una muestra que comprenda la base donde se realizó la pintura, el propio pigmento y la formación que la recubre (Aubert, Brumm y Huntley, 2018, p. 2). Sin embargo, en muchos casos este tipo de muestreo ha provocado la destrucción irreversible del patrimonio.

En las Cuevas de Church Hole y Robin Hood (Creswell Crags, Reino Unido) (Pike *et al.*, 2005) se utilizó una herramienta rotativa tipo DREMEL con una broca de corona (figura



Figura 15: toma de muestras en una cueva de Sulawesi. Aubert Brumm y Huntley, 2018.

7), lo que implica la extracción de un cilindro. En múltiples cuevas localizadas en las islas de Borneo y Sulawesi (Indonesia) (Aubert *et al.*, 2018), se utilizó una herramienta rotativa tipo DREMEL con un disco de corte diamantado (figura 8) para extraer piezas con una superficie de 200 mm²; si entendemos que la muestra presenta forma cuadrangular, debió medir aproximadamente 1'5 centímetros de lado (figura 15). En el abrigo de Baiyunwan (Yunnan, China) (Taçon *et al.*, 2012) también se extrajo una muestra de grandes dimensiones. Por último, en diversas cuevas situadas en el

área de Cangyuan (Yunnan, China) (Shao *et al.*, 2021) y en las cuevas de Bastiana, Serrote de Moendas y Gameleirinha (Serra da Capivara, Brasil) (Fontugne *et al.*, 2013) se utilizó un martillo y un destornillador o cincel.

La comisión francesa de Monumentos históricos (CNMH “*Commission Nationale des Monuments Historiques*”) ya ha prohibido la toma de muestras de calcita para realizar dataciones en las inmediaciones de las zonas con representaciones (Sauvet *et al.*, 2017, p. 89). En los casos analizados en la Península Ibérica no se aprecian daños tan graves como los mencionados anteriormente, ya que la toma de muestras cesó antes de exponer totalmente el pigmento; sin embargo, sin una legislación que intervenga, corremos el riesgo de que se den situaciones similares a las de Reino Unido, China, Brasil o Indonesia.

7.7. Rango de fechas

Múltiples investigadores señalan que el abanico de fechas obtenidas en las cuevas de La Pasiega, Maltravieso y Ardales (las publicadas en Hoffmann *et al.*, 2018a pero también en artículos previos: Pike *et al.*, 2013; Pike *et al.*, 2016; Hoffmann *et al.*, 2016) es muy amplio y, además, la mayor parte de las edades se concentran en periodos muy recientes, mientras que las

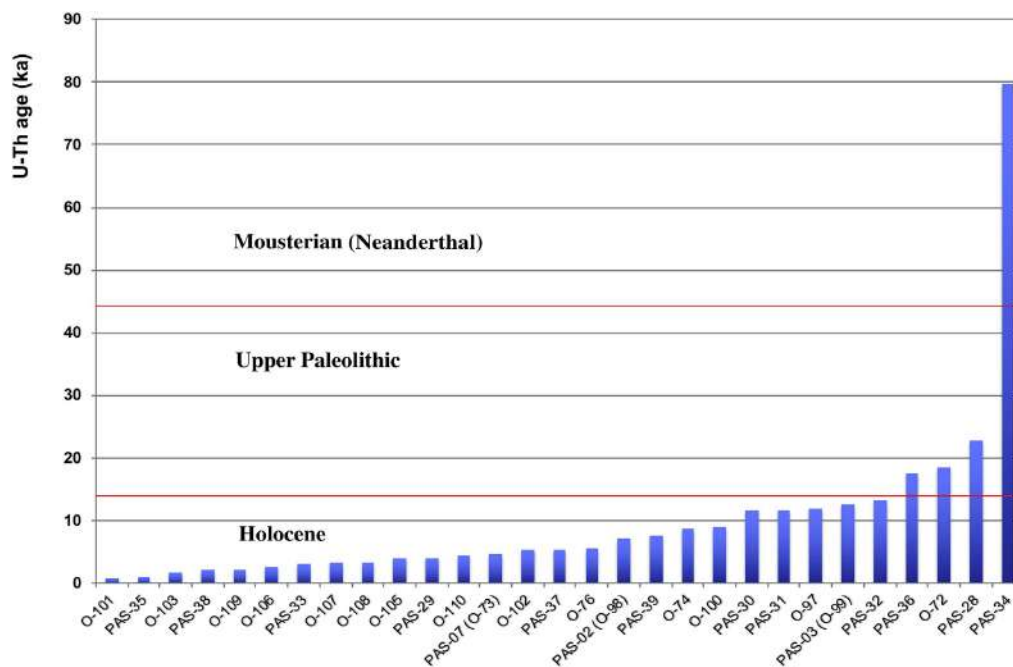


Figura 16: gráfico con las edades de todas las muestras tomadas en la Cueva de La Pasiega. La edad más temprana (PAS 34c: 79.660 ± 14.900 años = edad mínima de 64.760 años) es una excepción. White *et al.*, 2019a, p. 4.

fechas más antiguas son la excepción (Sauvet *et al.*, 2017, p. 89; White *et al.*, 2019a, p.2; Pearce y Bonneau, 2018, p. 925-926) (figura 16).

Este hecho no afecta en sí mismo a la fiabilidad de las fechas y, como los propios autores afirman, en un conjunto de fechas que establecen una edad mínima, es lógico que las edades más relevantes sean las más tempranas (García-Díez *et al.*, 2018, p. 1). Sin embargo, estos valores anómalos necesitan ser contrastados (usando la datación cruzada, datando más muestras de calcita cercanas...), ya que podrían ser fruto de errores previamente descritos como contaminación de la calcita, su comportamiento como sistema abierto o incluso una interpretación errónea de la relación entre el espeleotema y la pintura.

8. Conclusión

A lo largo de este trabajo, se ha podido observar cómo la comunidad científica está dividida en dos “facciones” y mantiene un clima de confrontación constante. Se suceden decenas de artículos en los que, en ocasiones, la crítica parece no estar suficientemente fundamentada, mientras que el equipo a cargo de las dataciones de cronología Neandertal, parece rechazar cualquier argumento que contradiga sus hipótesis, presentando además una actitud beligerante. Mientras los segundos afirman que los investigadores más críticos no están dispuestos a aceptar nuevas hipótesis contrarias a las creencias “tradicionales” y los acusan de tener una actitud “contraria al avance científico” (Pike *et al.*, 2017, p. 48), ellos mismos se niegan a reconocer posibles errores del método y además se aventuran a realizar interpretaciones “escasamente fundamentadas”: “*Certainly, there seems to be no reason to accept only the oldest dates rather than the full range — this needs to be problematized in future research.*” (Pearce y Bonneau, 2018, p. 926)

La aplicación de las Series de Uranio a la datación de pinturas rupestres parece prometedora, pero en vista de los diversos problemas tanto metodológicos como interpretativos que afectan al método, será necesaria una actitud colaborativa entre los investigadores que permita avances en pos de una metodología común y consensuada.

9. Bibliografía

Arnold, L.J y Demuro, M. (2013): “La datación por luminiscencia de sedimentos arqueológicos”, en García-Diez, M., y Zapata, L. (edit.): *Métodos y técnicas de análisis y estudio en arqueología prehistórica: De lo técnico a la reconstrucción de los grupos humanos*. Universidad del País Vasco, pp. 103-111.

Aubert, M.; Brumm, A. y Huntley, J. (2018): “Early dates for ‘Neanderthal cave art’ may be wrong”. *Journal of Human Evolution*, 125: 215-217.

Aubert, M.; Brumm, A.; Ramli, M.; Sutikna, T.; Saptomo, E.W.; Hakim, B.; Morwood, M.J.; van den Bergh, G.D.; Kinsley, L. y Dosseto, A. (2014): “Pleistocene cave art from Sulawesi, Indonesia. *Nature*, 514: 223-227

Aubert, M.; Setiawan, P.; Oktaviana, A.; Brumm, A.; Sulistyarto, P.H.; Saptomo, E.W.; Istiawan, B.; Ma’rifat, T.A.; Wahyuono, V.N.; Atmoko, F.T.; Huntley, J.; Taçon, P.S.C.; Howard, D.L. y Brand, H.E.A. (2018): “Palaeolithic cave art in Borneo”. *Nature*, 564: 254-271.

Beneitez, P.; Calderon, T.; Millán, A.; Arias, P.; Otañón, R.; González, C. y Moure, A. (1999): “Nuevas aplicaciones de la termoluminiscencia a la datación absoluta arte rupestre”, en Congreso Nacional de Arqueometría (3º. 1999. Sevilla), Sevilla: Universidad de Sevilla, pp. 69-78.

Borsato, A.; Quinif, Y.; Bini, A. y Dublyansky, Y. (2005): “Open-system alpine speleothems: implications for U-series dating and palaeoclimate reconstructions”. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.*, 80: 71-83

Bourdon B. (2015): “U-Series Dating” en Jack Rink W., Thompson J.W. (edit.): *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht, pp. poner páginas.

Debenham, N.D. y Aikten, M.J. (1984): “Thermoluminescence dating of stalagmitic calcite”. *Radiocarbon*, 26 (2): 155-170.

Duller G.A.T. (2015): “Luminescence Dating”, en Jack Rink W., Thompson J.W. (edit.): *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht, pp. 390-404.

Fernández, F. y Tripier, J. (1992): “La datación por termoluminiscencia” en Rodá de Llanza (edit.): *Ciencias, metodologías y técnicas aplicadas a la arqueología*. Universidad Autònoma de Barcelona, pp. 201-213.

Fontugne, M.; Shao, Q.; Frank, N.; Thil, F.; Guidon, N y Boeda, E. (2013): “Cross-dating (Th/U-¹⁴C) of calcite covering prehistoric paintings at Serra da Capivara National Park, Piaui, Brazil”. *Radiocarbon*, 55 (2-3): 1191-1198.

García-Diez, M. y Zapata, L. (eds) (2013). *Métodos y Técnicas de análisis y estudio en arqueología prehistórica*. Universidad del País Vasco.

García-Diez, M.; Hoffmann, D.; Pike, A. y Zilhão, J. (2016): “Datación por series de Uranio del grafismo de estilo pre-magdaleniense en Cantabria” en Sanz Palomera (edit.): *Actuaciones arqueológicas en Cantabria (2004-2011)*. Gobierno de Cantabria, Consejería de Educación, Cultura y Deporte, pp.65-71.

García-Diez, M.; Hoffmann, D.; Pike, A.; Standish, C. D.; Pettitt, P.; Angelucci, D.; Villaverde, v; Zapata, J.; Milton, J.; Alcolea-González, J.J.; Collado, H.; Cantalejo, P.; de Balbín, R.; Lorblanchet, M.; Ramos, J.; Weniger, G. y Zilhao, J. (2018): “Dates for Neanderthal art and symbolic behaviour are reliable”. *Nature Ecology & Evolution*, 2: 1-2.

Hoffmann, D. L. (2013): “La datación por las series de Uranio”, en García-Diez, M., y Zapata, L. (edit.): *Métodos y técnicas de análisis y estudio en arqueología prehistórica: De lo técnico a la reconstrucción de los grupos humanos*. Universidad del País Vasco, pp. 87-92.

Hoffmann, D., Pike, A., García-Diez, M., Pettitt, P. y Zilhao, J. (2016): “Methods for U-series dating of CaCO₃ crusts associated with Palaeolithic cave art and application to Iberian sites”. *Quaternary Geochronology*, 36: 104-119.

Hoffmann, D., Standish, C. D., García-Diez, M., Pettitt, P., Milton, J. A., Zilhão, J., Alcolea-González, J., Cantalejo-Duarte, P., Collado, H., de Balbín, R., Lorblanchet, M., Ramos-Muñoz, J., Weniger, G. y Pike, A. (2018a): “U-Th dating of carbonate crusts reveals Neandertal origin of Iberian cave art”. *Science*, 359: 912-915.

Hoffmann, D.; Angelucci, D.; Villaverde, V.; Zapata, J. y Zilhao, J. (2018b): “Symbolic use of marine shells and mineral pigments by Iberian Neandertals 115,000 years ago”. *Science Advances*, 4 (2): 1-6.

Jull A.J.T. y Burr G.S. (2015): “Radiocarbon Dating” en Jack Rink W., Thompson J.W. (edit.): *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht, pp. 669-676.

Lozano-Francisco, M.C.; Vera-Peláez, J.L.; Simón, M.D. y Costés, M. (2004): “Nuevos datos sobre el registro malacológico del Pleistoceno Superior-Holoceno de la Cueva de Nerja (Málaga, España)”. *Revista Española de Paleontología*, 19: 215-228.

Medina-Alcaide, M.A.; Garate, D. y Sanchidrián, J.L. (2018): “Painted in red: In search of alternative explanations for European Palaeolithic cave art”. *Quaternary International*, 491: 65-77.

Ochoa, B. (2011): “La datación absoluta del arte rupestre cantábrico: estado de la cuestión y valoración crítica”. *CKQ (Estudios de Cuaternario)*, 1: 133-150.

Pearce, D. y Bonneau, A. (2018): “Trouble on dating scene”. *Nature Ecology & Evolution*, 2: 925-926.

Pike, A. W.; Hoffmann, D. L.; Pettitt, P. B.; García-Diez, M. y Zilhao, J. (2017): “Dating Palaeolithic cave art: Why U–Th is the way to go”. *Quaternary International*, 432: 41-49.

Pike, A. W.; Hoffmann, D. L.; Taylor, C.; García-Diez, M. y Zilhao, J. (2016): “Datación por la serie del uranio de formaciones de calcita asociadas a pinturas rupestres paleolíticas en la cueva de Las Aguas” en Lasheras, J.A. (edit.): *Proyecto de investigación. Los tiempos de Altamira. Actuaciones arqueológicas en las cuevas de Cualventi, El Linar y las Aguas (Alfoz de Lloredo, Cantabria, España)*, 26: 775-790.

Pike, A., Hoffmann, D., García-Diez, M., Pettitt, P., Alcolea, J., Balbín, R., González-Sainz, C., de las Heras, C., Lasheras, J.A., Montes, R. y Zilhão, J. (2013): “U-series dating of Paleolithic art in 11 caves in Spain” U-series dating of Paleolithic art in 11 caves in Spain. *Science*, 336: 1409-1413.

- Pike, A.; Gilmour, M.; Pettitt, P.; Jacobi, R.; Ripoll, S.; Bahn, P. y Muñoz, F. (2005): “Verification of the age of the Palaeolithic cave art at Creswell Crags, UK”. *Journal of Archaeological Sciences*, 32: 1649-1655.
- Plagnes, V.; Causse, C.; Fontugne, M.; Valladas, H.; Chazine, J.M. y Fage, L.H. (2003): “Cross dating (Th/U-¹⁴C) of calcite covering prehistoric paintings in Borneo”. *Quaternary Research*, 60: 172-179.
- Pons-Branchu, E.; Bourrillon, R.; Conkey, M.; Fontugne, M.; Fritz, C.; Gárate, D.; Quiles, A.; Rivero, O.; Sauvet, G.; Tosello, G.; Valladas, H. y White, R. (2014): “Uranium-series dating of carbonate formations overlying Paleolithic art: interest and limitations”. *Bulletin de la Société préhistorique française*, 111 (2): 211-224.
- Rauret, G. (1992): “Métodos físico-químicos de datación absoluta” en Rodá de Llanza (edit.): *Ciencias, metodologías y técnicas aplicadas a la arqueología*. Universidad Autònoma de Barcelona, pp. 187-200.
- Rink, W. J. y Thompson, J. W. (2015). *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. Dordrecht, Springer.
- Rodá de Llanza, I. (eds) (1992). *Ciencias, metodologías y técnicas aplicadas a la arqueología*. Universidad Autònoma de Barcelona.
- Rubinos, A. (2013): “La datación por carbono-14”, en García-Diez, M., y Zapata, L. (edit.): *Métodos y técnicas de análisis y estudio en arqueología prehistórica: De lo técnico a la reconstrucción de los grupos humanos*. Universidad del País Vasco, pp. 73-86.
- Sauvet, G. (2017): "Arqueología y cronología: un trabajo en progreso". *Kobie*, 16: 181-196.
- Sauvet, G.; Bourrillon, R.; Conkey, M.; Fritz, C.; Gárate-Maidagan, D.; Rivero, O.; Tosello, G. y White, R. (2017): “Uranium–thorium dating method and Palaeolithic rock art”. *Quaternary International*, 432: 86-92.
- Schwarcz, H. P. (1989): “Uranium series dating of Quaternary deposits”. *Quaternary International*, 1: 7-17.

Shao, Q.F.; Pons-Branchu, E.; Zhu, Q.P.; Wang, W.; Valladas, H. y Fontugne, M. (2017): “High precision U/Th dating of the rock paintings at Mt. Huashan, Guangxi, southern China”. *Quaternary Research*, 88: 1-13.

Slimak, L.; Fietzke, J.; Geneste, J.M. y Ontañón, R. (2018): “Comment on “U-Th dating of carbonate crusts reveals Neandertal origin of Iberian cave art””. *Science*, 361: 1-3.

Steelman, K. y Rowe, M. (2012): “Radiocarbon Dating of Rock Paintings: Incorporating Pictographs into the Archaeological Record” en McDonald, J. y Veth, P. (edit.): *A Companion to Rock Art*. Willey-Blackwell, pp. 563–582.

Taçon, P.; Aubert, M.; Gang, L.; Decong, Y.; Hong, L.; May, S.; Fallon, S.; Xueping, J.; Curnoe, D. y Herries, A. (2012): “Uranium-series age estimates for rock art in southwest China”. *Journal of Archaeological Sciences*, 39: 492-499.

Valladas, H.; Cachier, H.; Maurice, P.; Bernaldo de Quirós, F.; Clottes, J.; Cabrera, V.; Uzquiano, P. y Arnold, M. (1992): “Direct radiocarbon dates for prehistoric paintings at Altamira, el Castillo and Niaux caves”, *Nature*, 357: (68-70)

Valladas, H.; Pons-Branchu, E.; Dumoulin, J. P.; Quiles, A.; Sanchidrián, J. L. y Medina-Alcaide, M. A. (2017): “U/Th and ^{14}C crossdating of parietal calcite deposits: application to Nerja cave (Andalusia, Spain) and future perspectives”. *Radiocarbon*, 59 (6): 1955-1967.

van Calsteren, P. y Thomas, L. (2006): “Uranium-series dating applications in Natural Environmental Science”. *Earth-Science Reviews*, 75: 155-175.

White, R.; Bosinski, G.; Bourrillon, R.; Clottes, J.; Conkey M.; Corchón, S.; Cortés-Sánchez, M.; de la Rasilla, M.; Delluc, B.; Delluc, G.; Feruglio, V.; Floss, H.; Foucher, P.; Fritz, C.; Fuentes, O.; Gárate, D.; González, J.; González-Morales, M.R.; González-Pumariega, M.; Groenen, M.; Jaubert, J.; Man-Estier, E.; Aránzazu, M.; Medina, M.A.; Moro, O., Ontañón, R., Paillet-Man-Estier, E., Paillet, P., Petrognani, S., Pigeaud, R., Pinçon, G.; Plassard, F.; Ripoll, S.; Rivero, O.; Robert, E.; Ruiz-Redondo, A.; Ruiz, J.F.; San Juan-Foucher, C.; Sanchidrián, J.L.; Sauvet, G.; Simón-Vallejo, M.D.; Tosello, G.; Utrilla, P.; Vialou, D.; Vilhena, A. y Willis, M.D. (2019a): “Still no archaeological evidence that Neanderthals created Iberian cave art”. *Journal of Human Evolution*, 144: 1-24.

White, R.; Bosinski, G.; Bourrillon, R.; Clottes, J.; Conkey M.; Corchón, S.; Cortés, M.; de la Rasilla, M.; Delluc, B.; Delluc, G.; Feruglio, V.; Floss, H.; Foucher, P.; Fritz, C.; Fuentes, O.; Gárate, D.; González, J.; González, M.; González-Pumariega, M.R.; Groenen, M.; Jaubert, J.; Man-Estier, E.; Aránzazu, M.; Paillet, P.; Petrognani, S.; Pigeaud, R.; Pinçon, G.; Plassard, F.; Ripoll, S.; Rivero, O.; Robert, E.; Ruiz, JF.; San Juan, C.; Sanchidrián, JL.; Sauvet, G.; Simón, MD.; Tosello, G.; Vialou, D.; Vilhena, A. y Willis, M.D. (2019b): “Unas fechas antiguas no hacen una nueva arqueología: la necesidad de integrar métodos arqueométricos y arqueológicos en los estudios de arte rupestre”. *Nailos*, 6: 17-28.

Zöller L. y Wagner G.A. (2015): “Luminescence Dating, History”, en Jack Rink W., Thompson J.W. (edit.): *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht, pp. 417-422.

10. Webgrafía

<https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis/espectrometria-de-masas-por-plasma-de-acoplamiento-inductivo.html>

Anexo I

Material gráfico

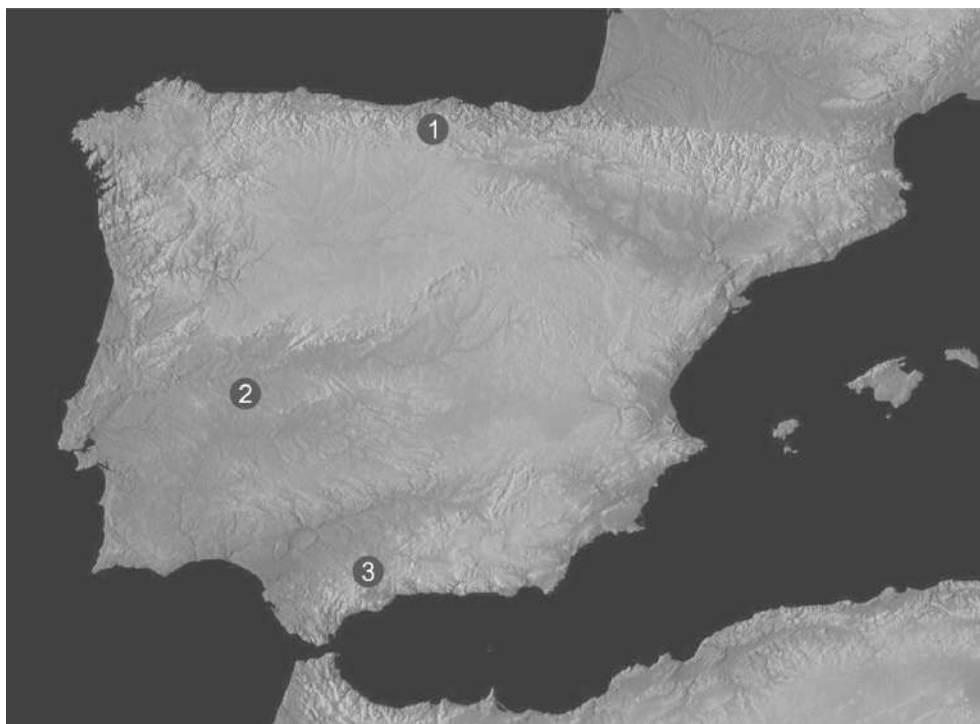
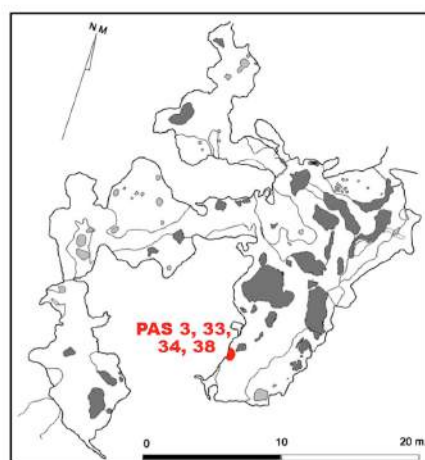
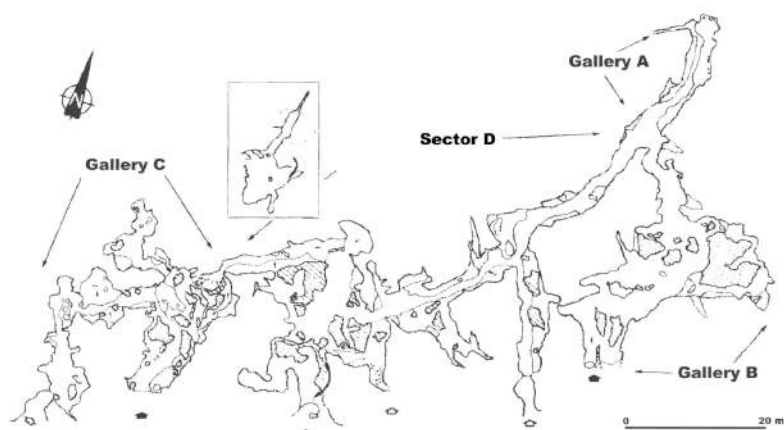


Figura A1: Localización de las cuevas. 1. La Pasiëga; 2. Maltravieso; 3. Ardales. Hoffmann et al., 2018a.



Gallery C and location of samples

Figura A2: Mapa de La Pasiëga, indicando la localización de las muestras PAS 3, 33, 34 y 38. Hoffmann et al., 2018a.



Figura A3: Panel 78 en La Pasiega C. A la izquierda una fotografía; a la derecha, un dibujo realizado por Breuil. Hoffmann et al., 2018a.

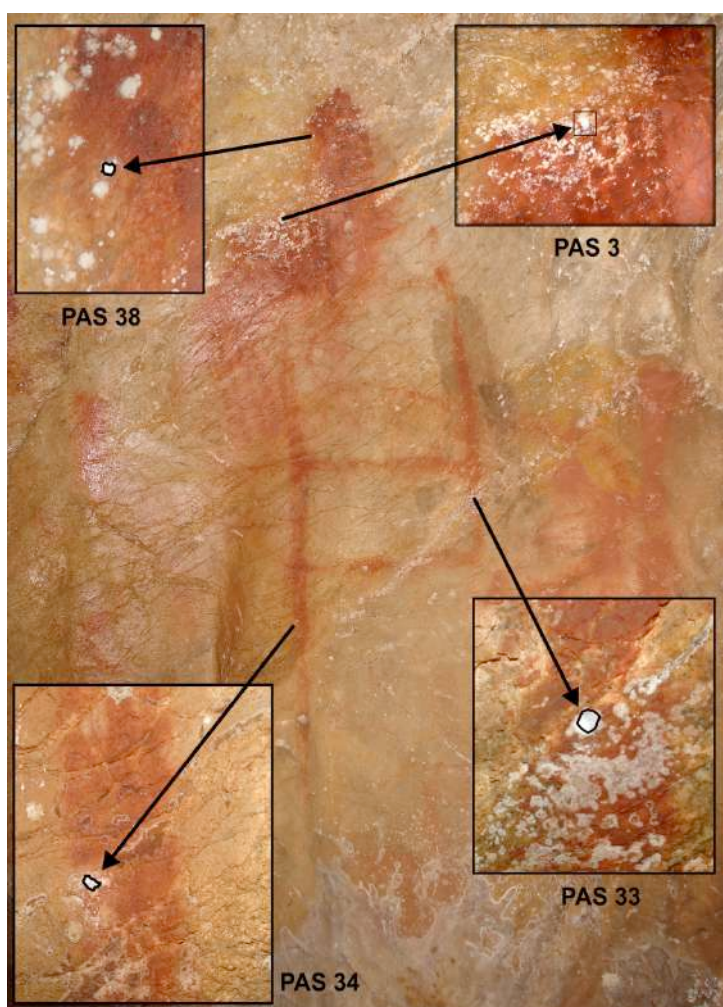


Figura A4: Localización de las muestras PAS 3, 33, 34 y 38 en el Panel 78. Hoffmann et al., 2018a.

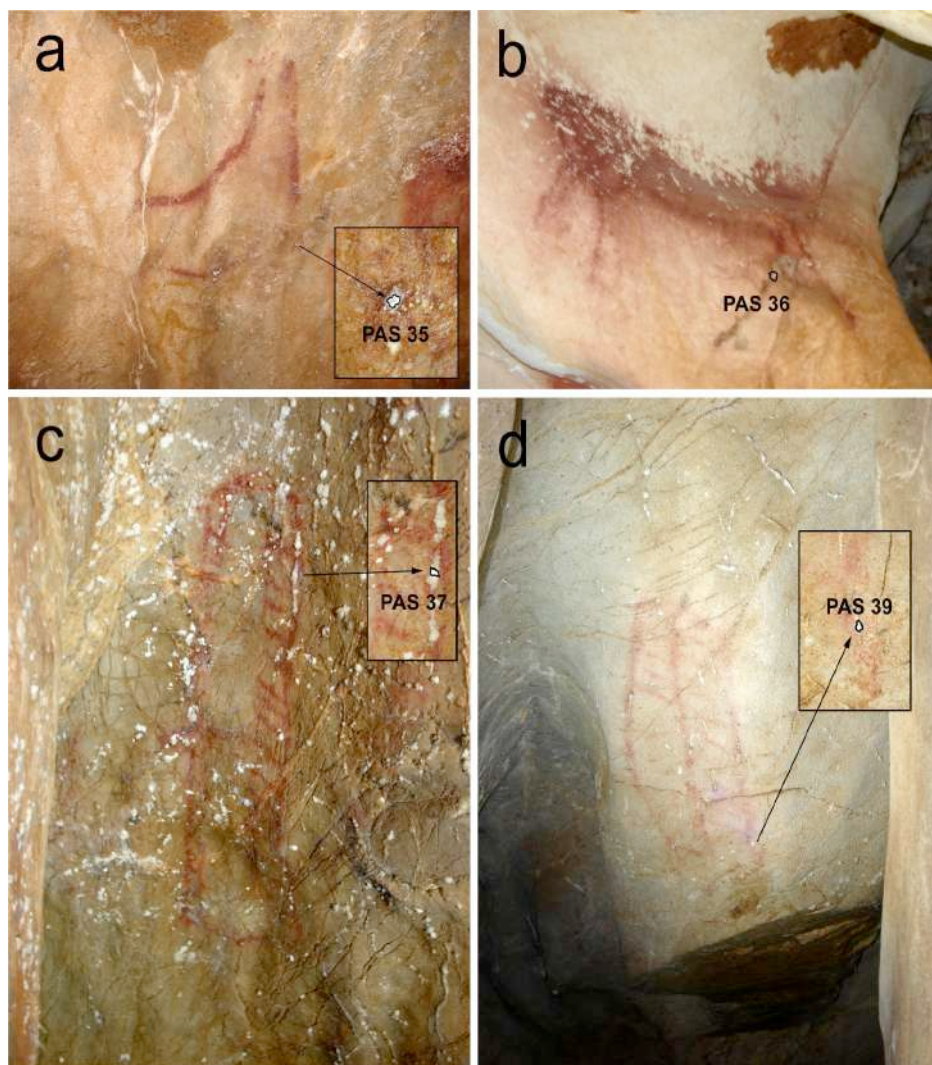


Figura A5: Representaciones y localización de las muestras PAS 35, 36, 37 y 39. **a)** PAS 35 sobre ciervo incompleto en el Panel 78; **b)** PAS 36 sobre zoomorfo en el Panel 82; **c)** PAS 37 sobre tectiforme en el panel 76; **d)** PAS 39 sobre tectiforme en el Panel 72. Hoffmann et al., 2018a.

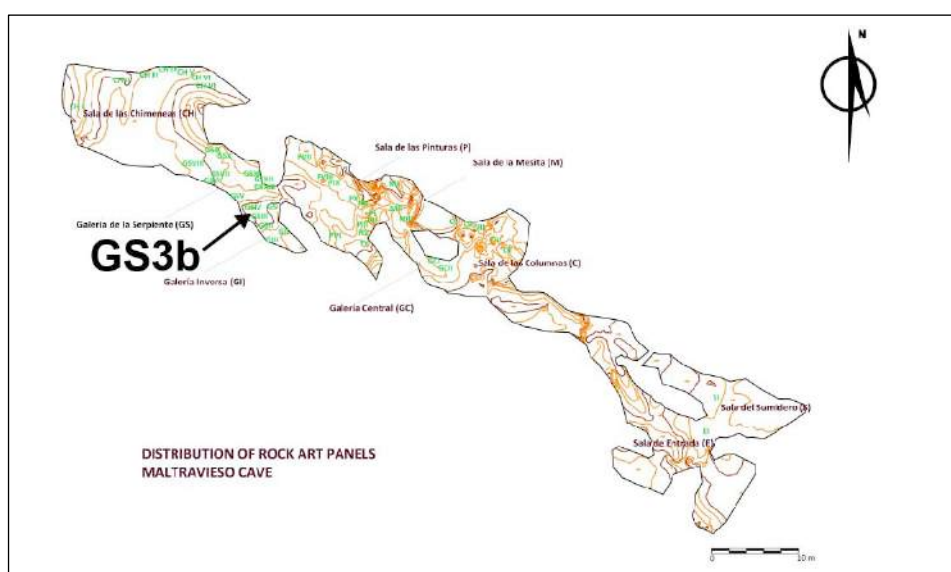


Figura A6: Mapa de Maltravieso, indicando la localización de la mano GS3b en la Galería de la Serpiente. Hoffmann et al., 2018a.

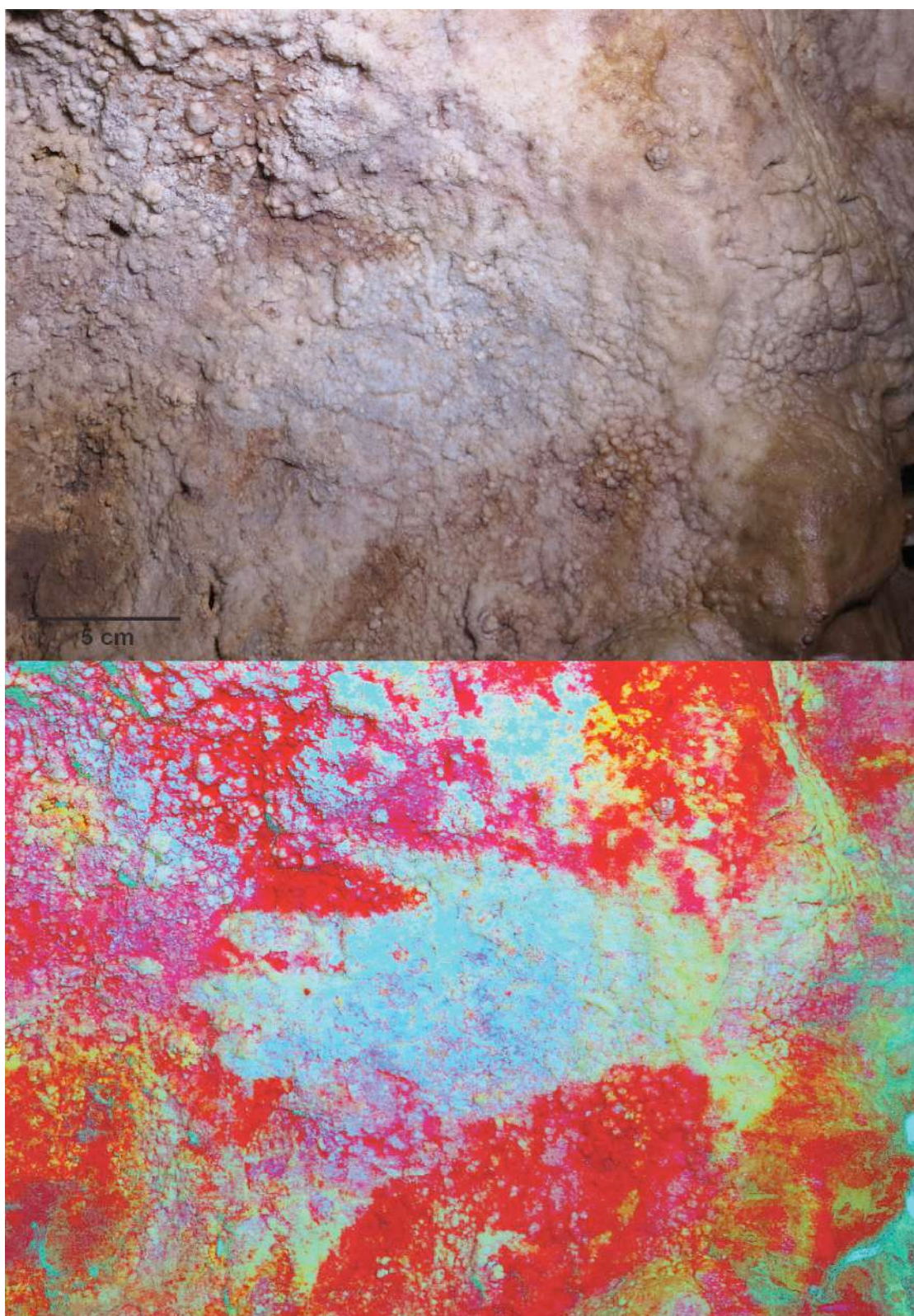


Figura A7: mano en negativo GS3b en Maltravieso. En la zona superior, fotografía; en la zona inferior, la misma fotografía aplicando DStretch. Hoffmann et al., 2018a.

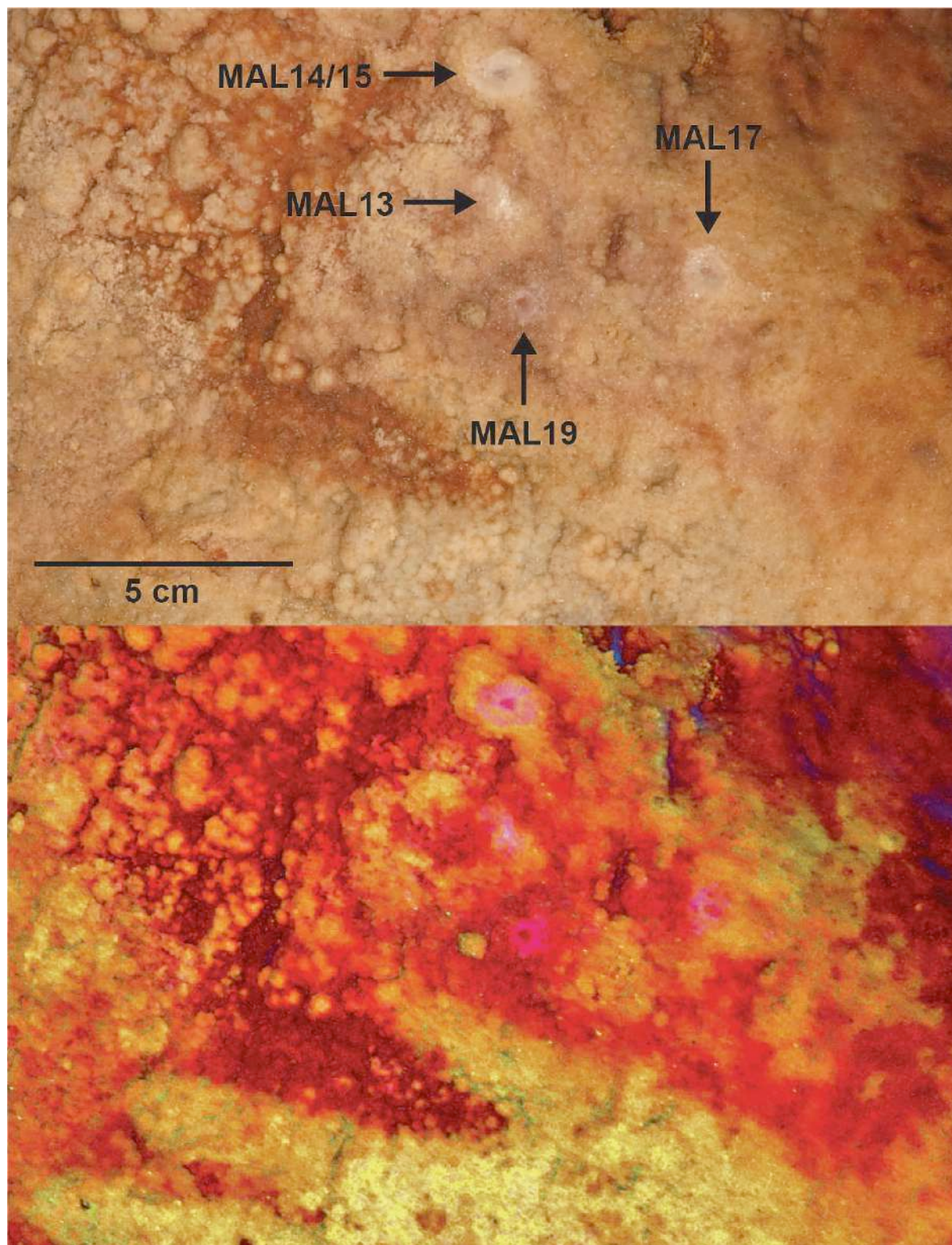


Figura A8: Localización de las muestras MAL 13, 14, 15, 17 y 19 en la mano GS3b. En la zona superior, fotografía; en la zona inferior, la misma fotografía aplicando DSStrech. Hoffmann et al., 2018a.

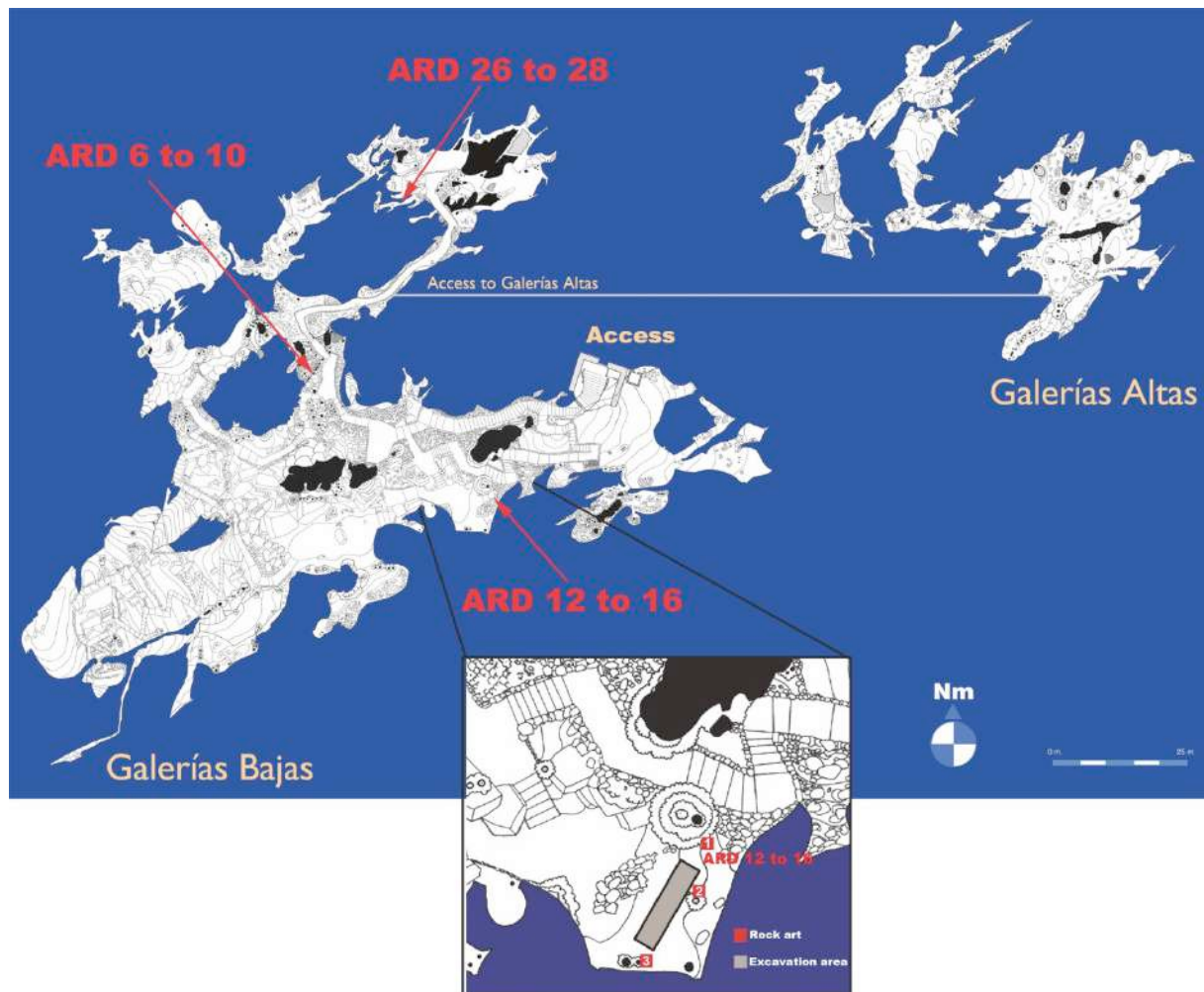


Figura A9: Mapa de Ardales, indicando la localización de las muestras. ARD 6 a 10 en panel II-C-8; ARD 12 a 16 en Panel II-A-3; ARD 26 a 28 entre panel III-C-2 y III-C-3. Hoffmann et al., 2018a.



Figura A10: Sección partida de cortina en Panel II-C-8 y localización de las muestras ARD 6, 7, 8, 9 y 10. Hoffmann et al., 2018a.

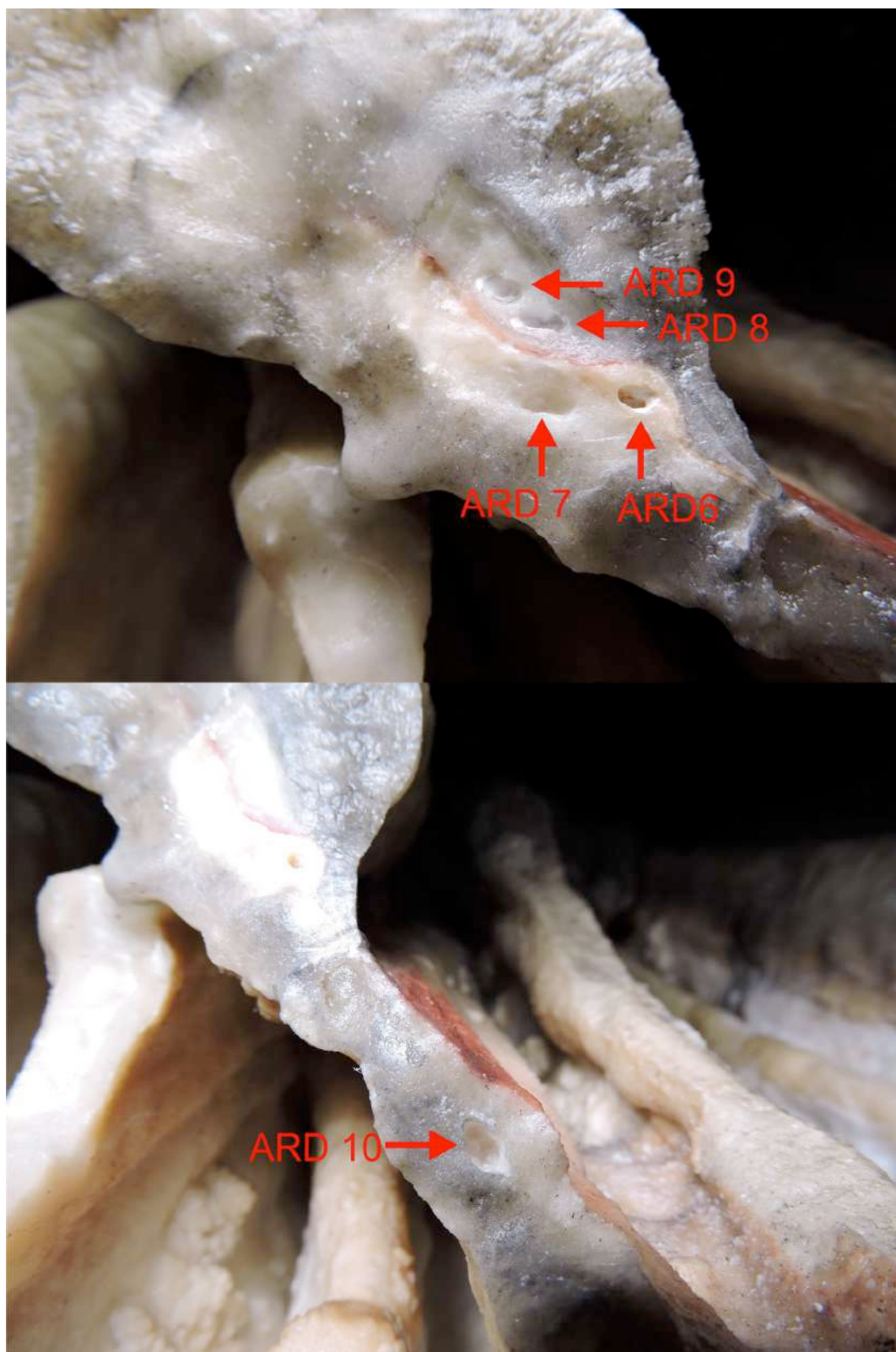


Figura A11: Detalle de la localización de las muestras ARD 6, 7, 8, 9 y 10 en Panel II-C-8. Hoffmann et al., 2018a.

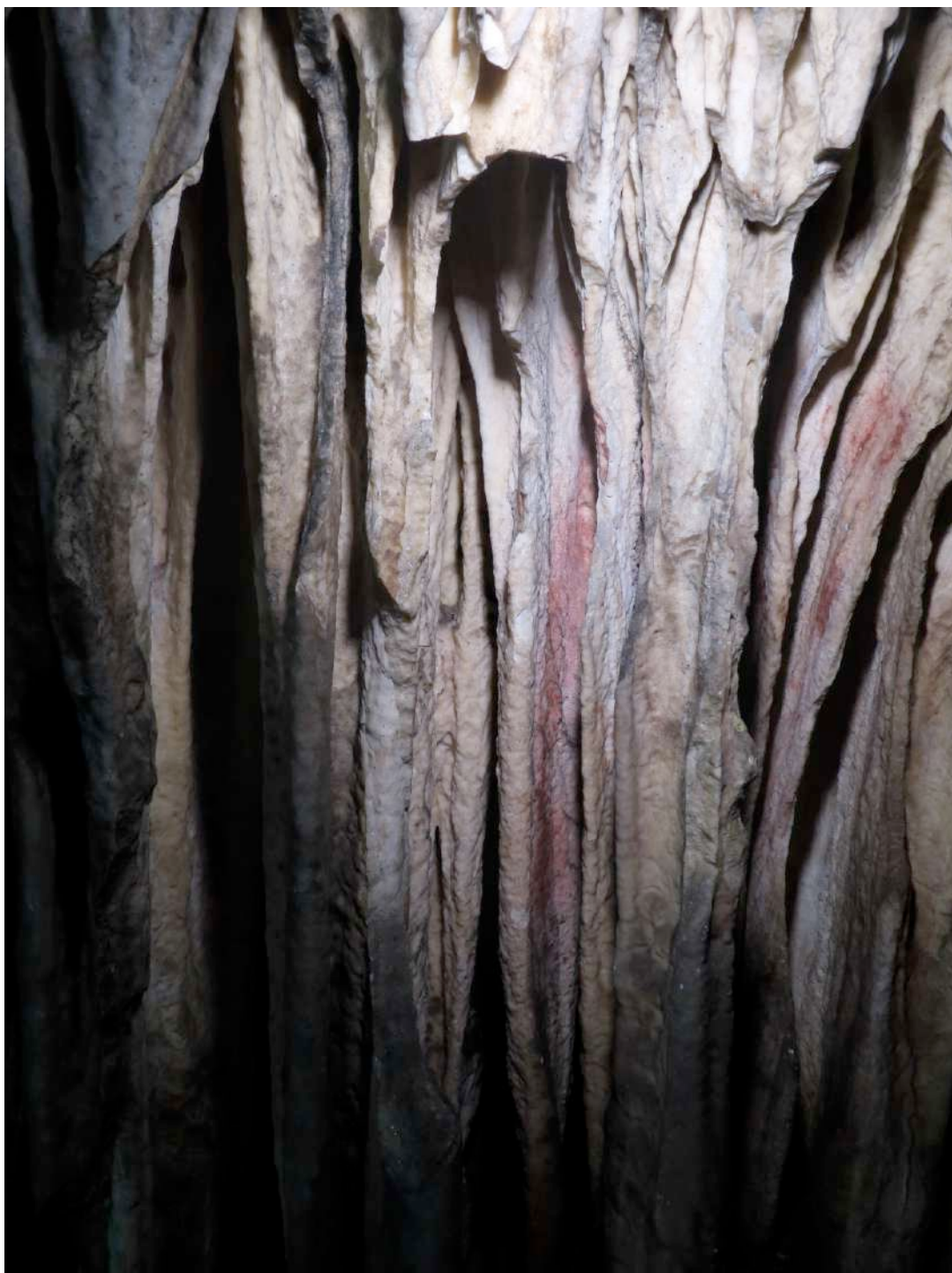


Figura A12: Cortina en el Panel III-A-3, en la que se tomaron las muestras ARD 12, 13, 14 15 y 16. Hoffmann et al., 2018a.

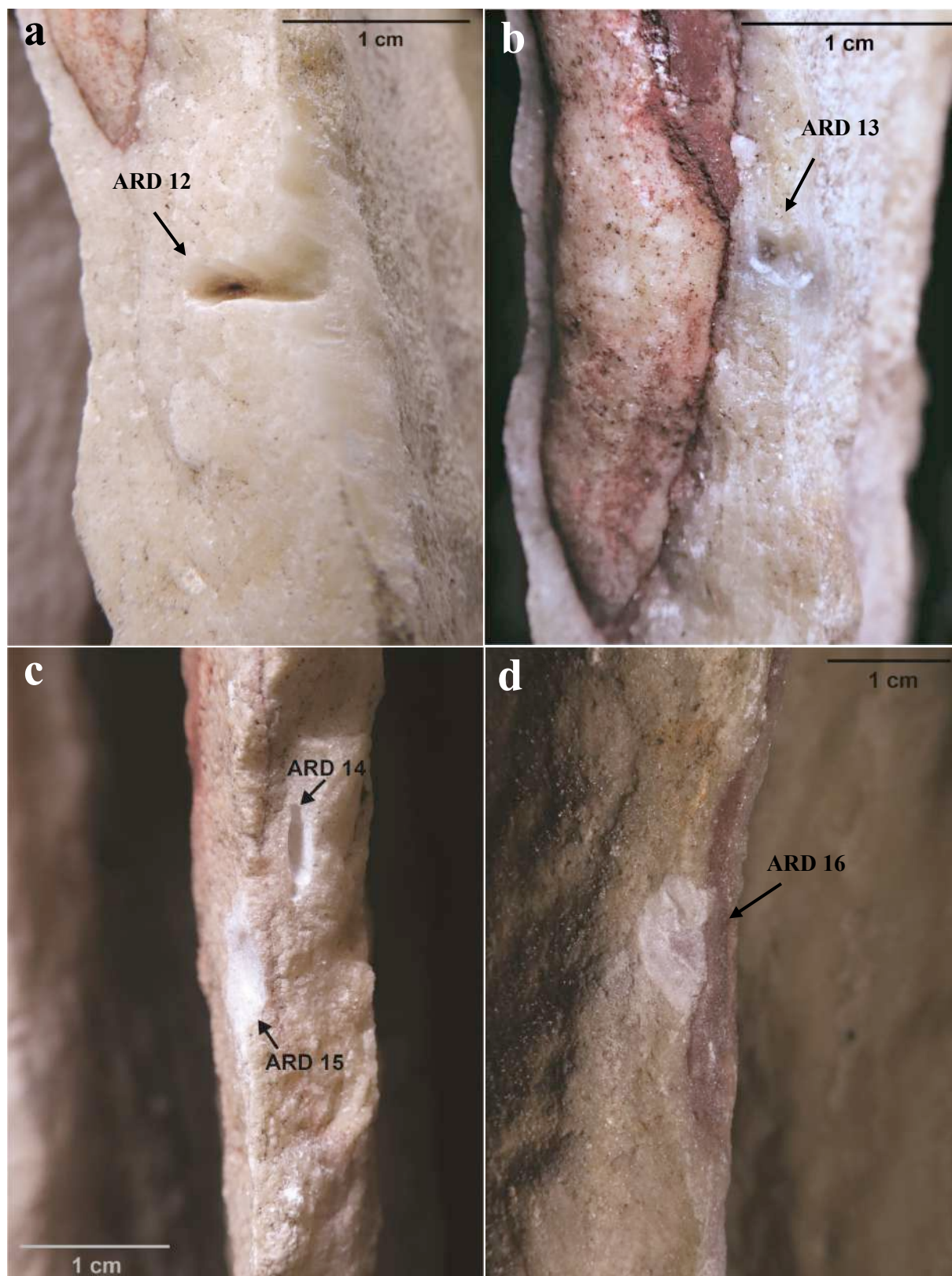


Figura A13: localización de las muestras ARD 12, 13, 14, 15 y 16 en Panel III-A-3. **a)** ARD 12 en cortina 8; **b)** ARD 13 en cortina 8; **c)** ARD 14 y 15 en cortina 4; **d)** ARD 16 en cortina 5. Hoffmann et al., 2018a.



*Figura A14: cortina partida entre el Panel III-C-2 y III-C-3, en la que se tomaron las muestras ARD 26, 27 y 28.
Hoffmann et al., 2018a.*

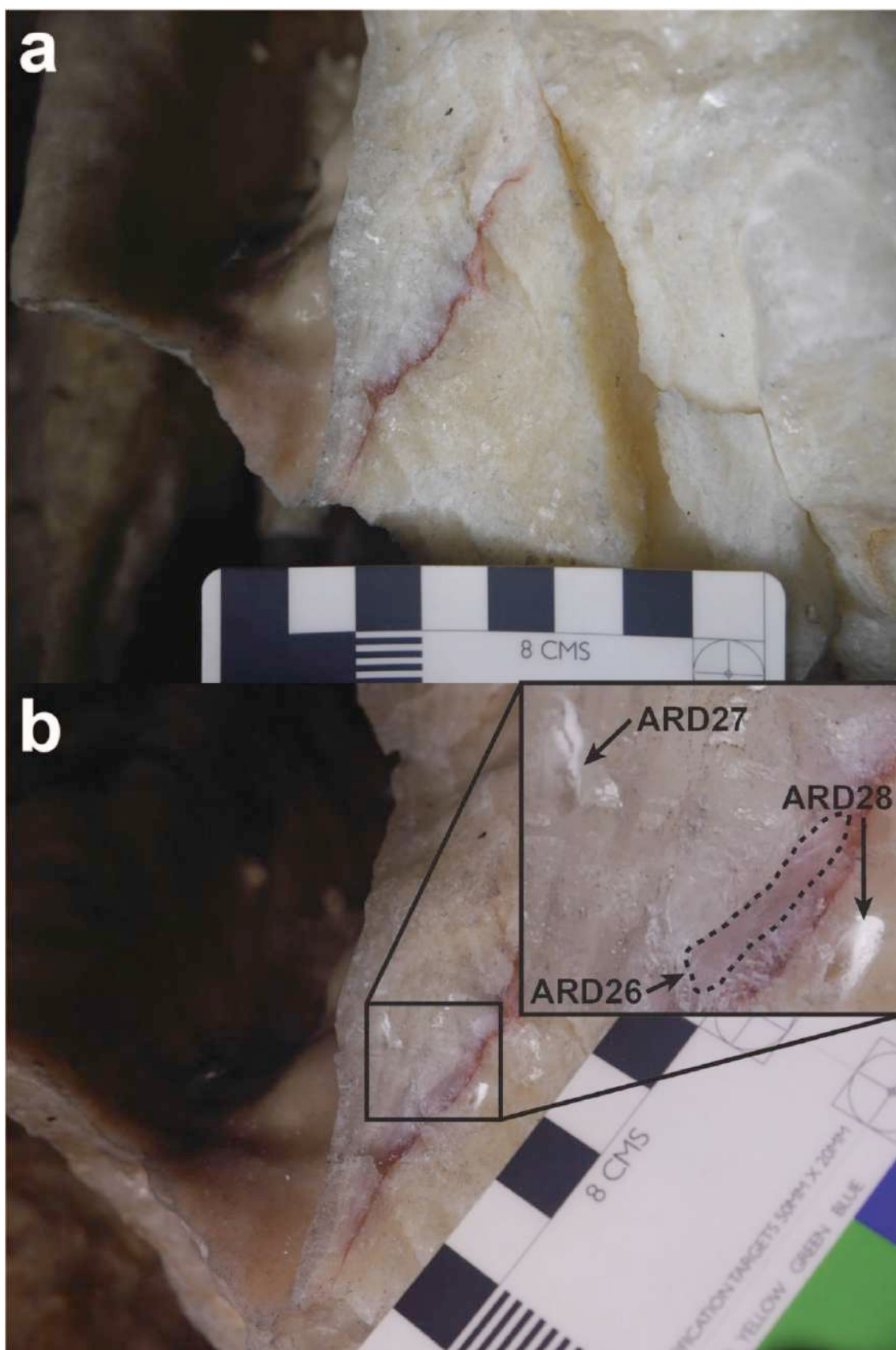


Figura A15: localización de las muestras ARD 26, 27 y 28 en la cortina situada entre el Panel III-C-2 y III-C-3. Hoffmann et al., 2018a.



Figura A16: localización de la Cueva de Nerja en el mapa de la Península Ibérica. Lozano-Francisco et al., 2004.

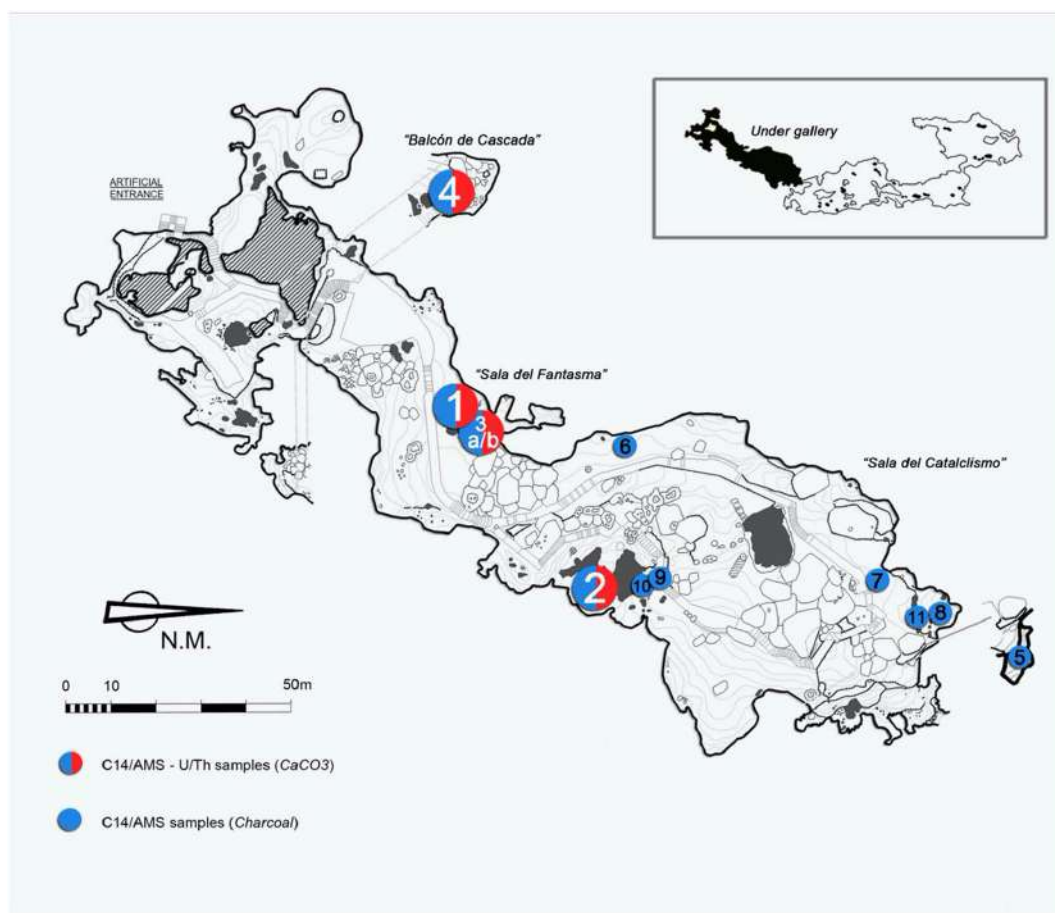


Figura A17: mapa de la cueva de Nerja, indicando la localización de las muestras 1, 2, 3 a y 4. Valladas et al., 2017.



Figura A18: situación de la marca 1, en el Balcón de Cascada y localización de la muestra 4. Valladas et al., 2017.

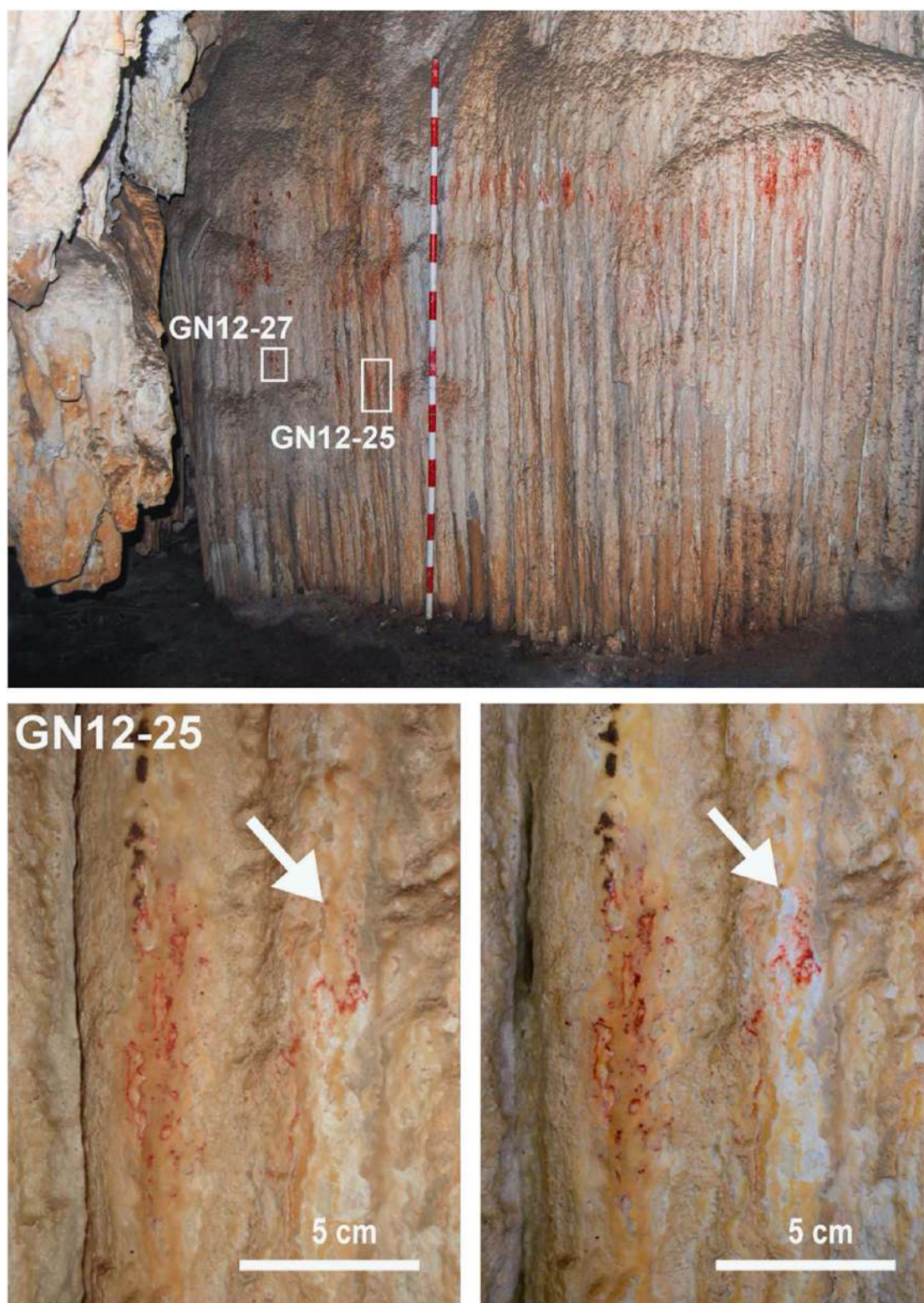


Figura A19: situación de la marca 2, en la Sala del Fantasma y localización de las muestras 3a y 3b. Valladas et al., 2017.

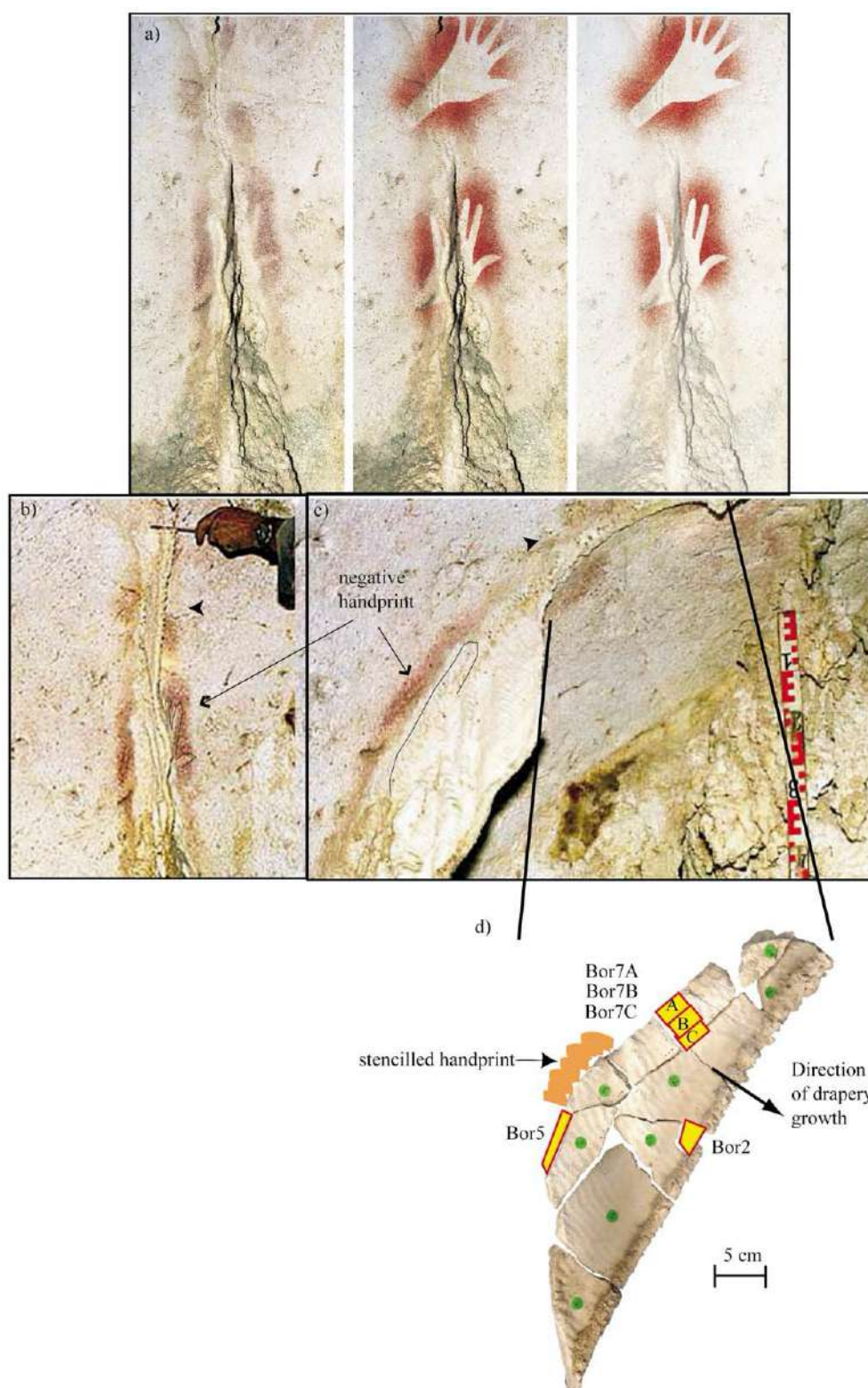


Figura A20: a) localización de la banderola analizada en Gua Saleh; b) banderola antes del muestreo; c) después del muestreo; d) localización de las muestras analizadas y dirección de crecimiento de la banderola. Plagnes et al., 2003.