

# CARACTERIZACIÓN Y GESTIÓN DE MATERIAS PRIMAS EN LOS ASENTAMIENTOS PLEISTOCENOS AL AIRE LIBRE DE LA SIERRA DE ATAPUERCA (BURGOS)

## RAW STONE MATERIAL SUPPLY FOR UPPER PLEISTOCENE OPEN AIR SITES IN SIERRA DE ATAPUERCA (BURGOS, SPAIN)

MARTA NAVAZO<sup>1</sup>; ALVARO COLINA<sup>2</sup>; SALVADOR DOMÍNGUEZ<sup>3</sup>, ALFONSO BENITO<sup>4</sup>

(1) Área de Prehistoria. Universidad de Burgos. Edificio I+D+i. Plaza Misael Bañuelos, s/n. 09001 Burgos

(2) Área de Química Analítica. Universidad de Burgos. Fac. de Ciencias. Plaza Misael Bañuelos, s/n. 09001 Burgos

(3) Área de Cristalografía y Mineralogía. Universidad de Cádiz. Fac. de Ciencias. 11510 Puerto Real

(4) Departamento de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. 28040 Madrid

### RESUMEN

En este artículo analizamos 415 muestras de sílex natural y arqueológico de la Sierra de Atapuerca (Burgos) mediante microscopía, espectrometría de masas y difracción de Rayos X con el objetivo de caracterizar los sílex de diferente formación existentes en la zona (neógeno y cretácico), inferir su ambiente genético y conocer las fuentes de aprovisionamiento de los cazadores-recolectores que explotan este espacio durante el Pleistoceno superior. Además se crea un modelo estadístico de clasificación mediante análisis discriminante lineal, *support vector machines* y *k-nearest neighbour* que nos permite diferenciar los sílex en función de su edad de formación.

### ABSTRACT

*Microscopy, mass spectrometry and X-ray diffraction methods were used to analyse 415 samples of natural and archaeological flint from Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain) in order to characterize the different types from Neogene and Cretaceous formations in the study area, infer their genetic context and ascertain the supply sources used by hunter-gatherers who exploited this area in the Upper Pleistocene. A statistical classification model was also designed using linear discriminatory analysis, support vector machines and k-nearest neighbour which permitted the differentiation of the flint based on their age of formation.*

**Palabras clave:** sílex, Sierra de Atapuerca, Paleolítico medio, neógeno, cretácico, microscopía, ICPMS, XRD, áreas de captación.

**Key words:** flint, Sierra de Atapuerca, Middle Palaeolithic, Neogene, Cretaceous, microscopy, ICP-MS, XRD, capture areas.

## I. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de análisis utilizadas en petrología resultan imprescindibles para caracterizar los materiales líticos, permitiendo su comparación, el estudio de su distribución regional y el reconocimiento de las fuentes (Lazareth & Mercier, 1999). Además de las técnicas clásicas, como la caracterización macroscópica y la microscópica, aparecen en los años 80 una diversidad de técnicas (activación neutrónica, fluorescencia de Rayos X, etc.), de entre las cuales el ICP asiste a un exitoso desarrollo (Potts, 1998), que lo hizo rápidamente ser utilizado en el marco de los estudios que se referían al sílex ya que puede considerarse la técnica más adecuada para el control analítico de muestras geológicas y arqueológicas (Bressy, 2003).

Durante los últimos años, la aplicación de la espectrometría de masas como técnica para la caracterización de materiales geológicos (Perkins *et al.*, 1993) y arqueológicos (Tykot, 1997) ha aumentado. Estudios recientes muestran el interés del ICP-MS en la determinación de elementos raros, y se utilizan para caracterizar los materiales arqueológicos, mediante la disolución de muestras (Gratuze *et al.*, 1993; Tykot & Young, 1996).

En este artículo estudiamos el aprovisionamiento de materias primas de los grupos de cazadores-recolectores de la Sierra de Atapuerca (Burgos) en un espacio explotado de 314 km<sup>2</sup> y proponemos un modelo de estudio a escala regional de los diferentes afloramientos de sílex y materiales arqueológicos a través de tres técnicas: observación microscópica, ICP-MS y difracción de Rayos X, con el fin de conocer la organización de estos grupos dentro del territorio que ocupan. Además se crea un modelo estadístico que permite diferenciar los sílex de diferente formación (neógeno y cretácico) existentes en la zona.

## II. CONTEXTO GEOLÓGICO Y ARQUEOLÓGICO

El área de estudio se localiza en el sector nororiental de la Cuenca cenozoica del Duero, desarrollado entre las cadenas alpinas de la Cordillera Ibérica (Sierra de la Demanda) y la Cordillera Cantábrica (Sierra de Ubierna y Sierra del Buezo) (Figura 1). En este marco geológico se ubica la Sierra de Atapuerca, constituyendo un relieve positivo de tipo *mont*, formado por una anticlinal tumbado de dirección NNW-SSE que deforma los materiales mesozoicos, en su mayoría calizas y dolomías del Turoniense-Santonense inferior (Pineda, 1997).

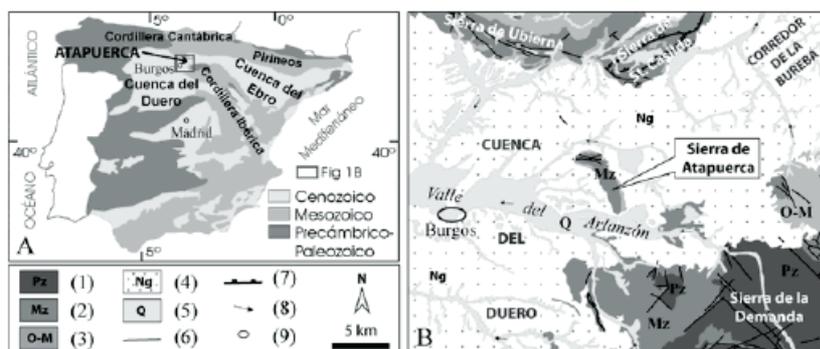


Figura 1. Situación geológica de la Sierra de Atapuerca en el contexto de la Península Ibérica (A), y en el sector NE de la Cuenca del Duero (B).

Leyenda: 1) Paleozoico; 2) Mesozoico; 3) Oligoceno-Mioceno inferior; 4) Neógeno; 5) Cuaternario; 6) Fallas; 7) Cabalgamientos; 8) Dirección de drenaje; 9) Ciudades.

Este afloramiento mesozoico se encuentra rodeado discordantemente por los depósitos de la Cuenca cenozoica del Duero (Santisteban *et al.*, 1996; Alonso-Gavilán *et al.*, 2004), relacionados con el desarrollo de superficies de erosión en los relieves alpinos (Benito-Calvo y Pérez-González, 2007). Los sedimentos cenozoicos corresponden principalmente a la secuencia neógena, constituida por de sedimentos aluviales y lacustres que en el Mioceno medio incluyen un nivel de calizas con nódulos métricos de sílex (Pineda,

1997; Benito, 2004). Dicha secuencia se encuentra erosionada por la red fluvial actual (río Arlanzón y tributarios), cuya incisión ha dejado una secuencia de terrazas compuesta por 14 niveles más la llanura aluvial actual, distribuidas desde el Pleistoceno inferior hasta la actualidad (Benito-Calvo *et al.*, 2007).

La evolución de los niveles de base neógenos y cuaternarios provocó el origen y desarrollo de un sistema endokárstico de origen freático, ubicado en las calizas cretácicas del flanco sudoeste de la Sierra de Atapuerca (Ortega *et al.*, 2005), donde han sido recuperados restos de *Homo* antecesor (Carbonell *et al.*, 1995) y *Homo heidelbergensis* (Arsuaga *et al.*, 1999). Cronológicamente están representados el Pleistoceno inferior (Gran Dolina y la Sima del Elefante), Pleistoceno medio (Gran Dolina y Galería), y Holoceno (Cueva del Mirador). Sin embargo, en las cuevas en las que se trabaja actualmente, no se han encontrado restos de neandertal o cronologías del Pleistoceno superior final. Por este motivo y para saber cómo articulan el espacio que explotan en esta sierra los cazadores-recolectores que la habitaron, se decidió realizar una prospección arqueológica de cobertura total y alta intensidad, que cubriera una extensión circular —con su punto central en las cuevas— de 314 km<sup>2</sup> (Navazo y Díez, 2001). El trabajo de campo se desarrolló desde 1999 hasta 2003 y se localizaron 181 asentamientos prehistóricos al aire libre desconocidos hasta el momento. De estos sitios, 31 pertenecen al Paleolítico medio, y son los que se han seleccionado para su investigación (Díez y Navazo, 2005). Cada uno de ellos se ha estudiado desde un punto de vista geoarqueológico y se ha analizado la industria lítica, en ocho se han realizado sondeos y dos están siendo excavados en la actualidad, teniendo dataciones por TL de uno de ellos, Hundedero (Benito *et al.*, 2005) (Nivel 2: 58,788±4,904 ka; Nivel 4: 70,556±11,011).

Desde un punto de vista tecno-económico, para estudiar los desplazamientos de los grupos además de analizar el comportamiento técnico, hay que estudiar al abastecimiento de materias primas. A continuación presentamos la metodología y resultados de los análisis que hemos realizado para conocer las áreas de abastecimiento de sílex para los habitantes de la Sierra de Atapuerca y su entorno.

### III. MATERIAL Y MÉTODO

En este trabajo, hemos creado una metodología que se ha desarrollado en los siguientes puntos:

#### III.1. Prospección para la localización de sílex

El primer paso consiste en la localización y muestreo de los afloramientos y depósitos secundarios de sílex existentes en nuestra zona de estudio. De esta manera se han distinguido dos tipos de sílex, asociados a dos formaciones geológicas: una capa de caliza lacustre del Mioceno medio (Astariciense), y calizas y dolomías marinas del Cretácico superior (Turoniense-Santoniense inferior).

#### III.2. Identificación y caracterización petrológica de los materiales geológicos y arqueológicos

La identificación y caracterización petrológica de los materiales geológicos y arqueológicos se ha realizado mediante análisis de microscopía, con un microscopio de luz reflejada, y análisis geoquímicos como espectrometría de masas (ICPMS), y difracción de Rayos X.

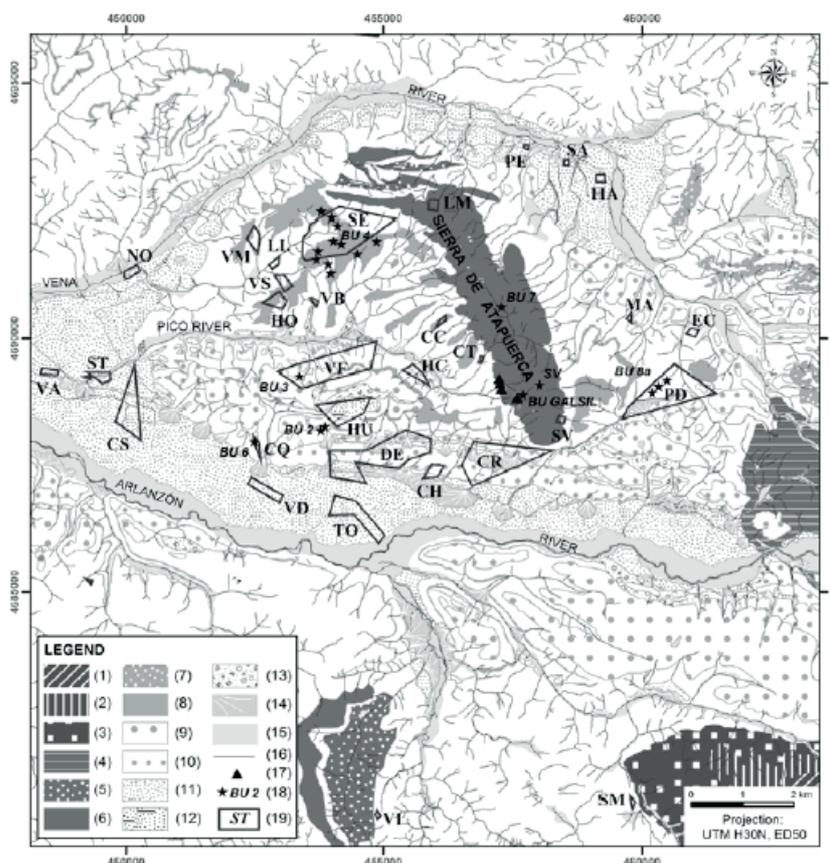
La determinación de minerales con microscopio de luz reflejada se realizó en el Área de Cristalografía y Mineralogía de la Facultad de Ciencias de Puerto Real (Cádiz) sobre 15 muestras procedentes de afloramientos; 5 de depósitos secundarios y 31 piezas arqueológicas. La metodología empleada ha sido la preparación de las muestras en lámina delgada. Estas son secciones finas de rocas o minerales montadas sobre portaobjetos de vidrio (Jones, 1987; Pozo *et al.*, 2004). En una lámina delgada, la muestra original se ha adelgazado hasta alcanzar un grosor estandarizado de 0,03 mm. Una vez preparadas las muestras se analizan con un microscopio polarizante o petrográfico. Se utilizó con luz polarizada plana (luz PP), y con luz polarizada cruzada (XP).

Con el ICPMS del Parque Científico y Tecnológico de la Universidad de Burgos, se analizaron un total de 104 muestras de sílex procedentes de los afloramientos, 116 muestras geológicas de depósitos secundarios, y 135 arqueológicas. Se intenta recuperar muestras de cada una de las zonas en donde afloran las calizas astarienses que contienen el sílex neógeno, y de las calizas y dolomías de Turoniense-Santoniense inferior, que albergan los nódulos de sílex cretácico (Figura 2).

La gran sensibilidad de nuestro equipo, unido a su bajo límite de detección para la mayoría de los elementos de la tabla periódica, permite realizar análisis con muestras muy pequeñas. Por ejemplo, en el presente trabajo las muestras utilizadas han pesado en todos los casos entre 0,0120 y 0,0170 mg, es decir, es una técnica muy poco destructiva. El equipo utilizado ha sido un Agilent 7500 i, con recirculador de agua de nessler y muestreador automático. Se midieron 67 elementos. Las muestras se disolvieron en mezcla de ácido fluorhídrico y ácido nítrico, siendo neutralizado el ácido fluorhídrico con ácido bórico saturado con el fin de que no se produzca el ataque del equipo de ICP-MS con el HF.

La gran cantidad de elementos medidos en cada muestra hace necesario el uso de herramientas estadísticas para el análisis de los resultados. Aunque en ocasiones la evolución de una sola variable (análisis univariante) puede ser suficiente para clasificar muestras de diferente procedencia geográfica o temporal, en el caso de nuestras muestras se hace necesario el empleo de herramientas multivariantes. La diferenciación de sílex de diferentes asentamientos de procedencia geográfica muy lejana puede resultar bastante sencillo y unos pocos elementos pueden ser suficientes para realizar la clasificación, pero cuando, como en nuestro caso, la proximidad geográfica de las muestras es evidente, deben considerarse todos los elementos medidos para realizar la clasificación de las muestras y, por lo tanto, debemos utilizar métodos multivariantes para extraer la información contenida por las muestras.

**Figura 2.** Mapa geomorfológico de la zona de estudio. Legenda: 1) Cámbrico (metareniscas y pizarras; 2) Carbonífero (conglomerados, areniscas y pizarras); 3) Triásico (conglomerados y areniscas); 4) Cretácico inferior (calizas y conglomerados de cuarcita); 5) Sedimentos detríticos siliciclásticos del Cretácico inferior; 6) Cretácico superior (calizas y dolomías); 7) Sedimentos del Mioceno medio con conglomerados cuarcíticos; 8) Calizas del Mioceno medio con nódulos de sílex; 9) Terrazas del Pleistoceno inferior; 10) Terrazas del Pleistoceno medio; 11) Terrazas del Pleistoceno superior; 12) Depósitos aluviales de Hundidero; 13) Coluviones; 14) Conos; 15) Llanura de inundación y fondos de valle de valle; 16) Red de drenaje; 17) Asentamientos en cueva de la Sierra de Atapuerca; 18) Muestreo afloramientos de sílex; 19) Asentamientos al aire libre de Paleolítico medio.



En principio los datos se han recopilado en una única matriz que contiene en cada fila una muestra y en las columnas la respuesta del detector (Cuentas) para cada uno de los 67 elementos medidos excepto el silicio debido a su alta volatilidad en presencia de ácido fluorhídrico. La respuesta de cada muestra ha sido normalizada dividiendo por el número total de cuentas para todos los elementos, de modo que eliminamos la influencia de la cantidad de piedra disuelta.

La difracción de Rayos X se utilizó como complemento en la identificación de minerales y del análisis petrográfico. Se han realizado, también en Puerto Real, difractogramas de Rayos X, mediante el método de polvo policristalino, triturando y tamizando muestras de sílex, tanto de origen geológico como arqueológico. Las muestras molidas se colocaron en un portamuestras y se introdujeron en el difractómetro de Rayos X donde se someten a la acción de la radiación que incide de forma continua con distintos ángulos. El análisis mediante difracción de Rayos X se ha realizado sobre nueve muestras de las estudiadas con lámina delgada y con ICP-MS. Los difractogramas se procesaron con el paquete de programas Diffract-Plus y Eva, ambos de Bruker.

## IV. RESULTADOS

### IV.1. Muestreo y cartografía del sílex de la zona de estudio

Una vez localizados los afloramientos y depósitos secundarios de sílex neógeno y cretácico, hemos cartografiado y muestreado cada uno de ellos para su posterior análisis (Figura 2).

### IV.2. Caracterización sílex natural

Realizados los muestreos del sílex neógeno y cretácico del espacio objeto de estudio, se caracteriza el material según las analíticas ya mencionadas. Se trabaja con sílex procedentes tanto de los afloramientos como de los depósitos secundarios.

#### IV.2.1. Sílex neógeno

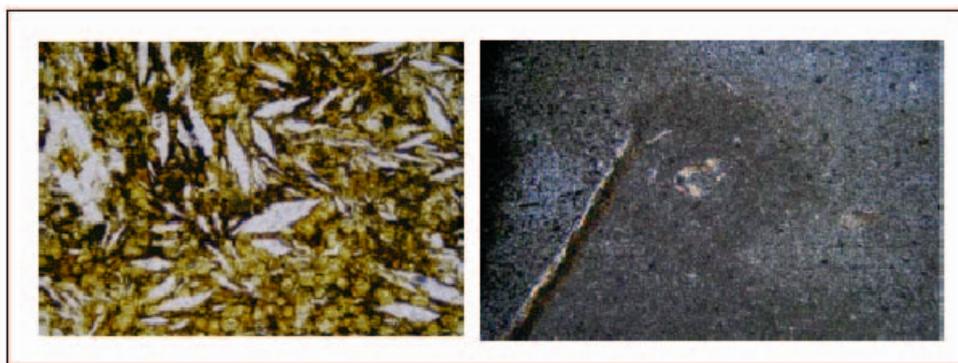
Los afloramientos de sílex neógeno consisten en nódulos de tamaño métrico. La capa caliza aparece en las plataformas estructurales. Los procesos de erosión son los causantes de la existencia de depósitos secundarios de sílex, relacionados con procesos gravitacionales y aluviales. En este último caso, el sílex aparece en terrazas fluviales pleistocenas y holocenas, en abanicos aluviales, etc.

Por lo que se refiere a los sílex en depósitos secundarios, hemos diferenciado entre:

1. Depósitos secundarios cercanos al afloramiento (depósitos de vertiente): Aquellos que proceden de la erosión inmediata del afloramiento, debido principalmente a procesos gravitacionales (Plataforma VR, Valdefrades, Castrillo del Val).
2. Depósitos secundarios distantes al afloramiento (depósitos fluviales): Es el caso de la mayoría de los sílex encontrados en terraza, procedentes de la erosión directa de la capa caliza asturacienense, o del desmantelamiento de antiguas terrazas y depósitos cuaternarios que ya contenían sílex erosionado.

*IV.2.1.1. Análisis microscópico:* Se trata de un sílex muy heterogéneo, poroso sobre todo en las zonas de córtex; en general con cierta cantidad de yeso, que suele tener morfología lenticular (Figura 3 izda); estas

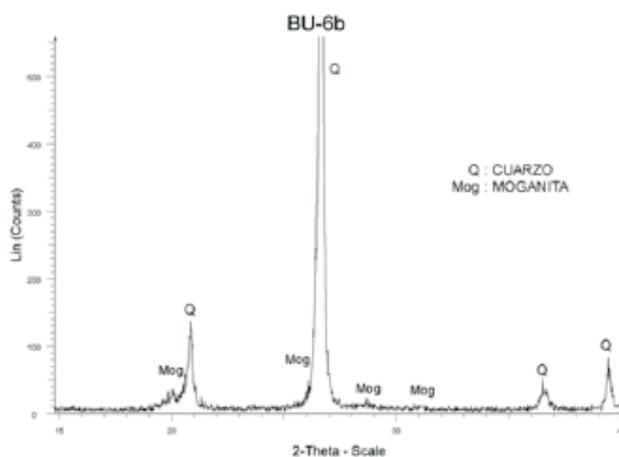
lenticulas pueden estar silicificadas en mayor o menor grado. Ocasionalmente pueden aparecer impurezas de pequeño tamaño de grano de terrígenos o pequeñas formas concéntricas fibroso radiadas (esférulos) de minerales opacos, posiblemente pirita u óxidos de Fe. Presencia de algunos poros rellenos con cemento de calcita esparítica.



**Figura 3.** Detalle de lenticulas PP 100 (BU8c) (izda) y BU 7c XP 100 en la que se aprecia un fósil (dcha).

*IV.2.1.2. Análisis geoquímicos:* La tabla 1 (izda) recoge los análisis mediante ICP-MS de las muestras neógenas. Los elementos mayoritarios de la muestra, silicio y oxígeno, no se recogen en la tabla. Las cuentas registradas por el espectrómetro para cada elemento han sido normalizadas con fines comparativos dividiendo su valor entre la suma de las cuentas totales de todos los elementos. La tabla muestra los valores de las cuentas normalizadas medias, medianas, máximas y mínimas. Como puede observarse, el elemento mayoritario es el aluminio, seguido por el sodio, potasio, magnesio, y calcio.

Difracción de Rayos X: Podemos caracterizar el sílex neógeno como sílex con cuarzo y ciertas cantidades de moganita, un polimorfo del SiO<sub>2</sub>, (Kingma y Hemley, 1994) que aparece en ciertos ambientes sedimentarios (Bustillo y García, 2001). Estos resultados (Figura 4) son perfectamente concordantes con las observaciones hechas mediante microscopía óptica de luz transmitida.



**Figura 4.** Espectro de difracción de Rayos X de la muestra de Camino Quintanilla (BU 6b).

SÍLEX NEÓGENO				SÍLEX CRETÁCICO				
Elemento	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Media	Mediana	Máximo	Mínimo
Na	1.6E-01	1.4E+01	4.2E01	2.2E02	1.6E01	1.7E-01	2.2E-01	3.7E02
Mg	1.0E-01	4.8E02	8.6E01	6.6E03	2.3E02	1.8E02	1.3E-01	5.5E03
Al	4.4E-01	4.8E01	8.3E01	7.6E03	5.2E01	5.7E-01	6.5E-01	1.6E01
K	1.1E-01	9.7E02	2.8E01	3.7E03	1.3E01	1.4E-01	2.2E-01	3.6E02
Ca	8.5E-02	7.7E02	5.3E01	7.4E03	1.0E01	3.7E02	6.5E-01	1.0E02
Sc	2.4E-02	2.3E02	6.6E02	6.1E04	1.0E02	9.7E03	2.4E-02	1.9E03
Ti	4.1E-03	3.7E03	1.2E02	1.3E04	1.6E03	1.5E-03	3.6E-03	4.2E04
V	3.4E-02	8.3E03	2.1E01	2.4E04	1.2E02	5.9E03	5.1E-02	1.3E03
Mn	7.3E-03	2.2E03	8.7E02	5.2E04	3.5E02	2.1E-03	4.6E-01	2.5E04
Ni	1.6E-04	1.2E-04	1.7E03	7.7E06	1.3E04	8.5E-05	7.9E-04	2.3E05
Cu	4.0E-04	1.9E04	4.7E03	2.9E05	2.3E03	2.0E-04	3.8E-02	1.5E05
Zn	2.1E-03	1.7E03	7.7E03	7.1E05	9.7E04	6.6E-04	2.6E-03	1.3E04
Ge	2.2E-04	2.0E04	1.3E03	6.1E06	7.1E05	6.5E-05	1.8E-04	6.7E06
As	7.8E-05	4.1E05	8.0E04	1.3E06	3.5E05	2.2E-05	1.2E-04	6.8E06
Se	3.7E-05	2.3E05	1.7E04	2.4E06	1.5E05	1.1E-05	5.0E-05	2.7E06
Rb	1.1E-04	8.0E05	8.4E04	3.3E06	2.1E04	1.8E-04	4.7E-04	4.5E05
Sr	1.3E-02	3.7E03	4.4E01	3.5E04	2.7E03	1.7E-03	2.1E-02	3.4E04
Y	1.5E-04	7.3E05	3.1E03	2.6E06	6.2E05	5.2E-05	3.0E-04	1.2E05
Ru	2.6E-05	3.4E06	1.7E04	0.0E+00	7.9E06	1.7E05	4.5E-05	0.0E+00
Sn	8.5E-05	5.0E05	4.7E04	3.5E06	4.2E05	2.9E-05	1.7E-04	2.7E06
Sb	1.0E-04	5.3E05	1.0E03	1.6E06	2.6E05	1.7E-05	1.6E-04	2.3E06
Cs	1.4E-05	7.1E06	8.7E05	3.1E07	2.1E05	1.4E-05	7.4E-05	3.7E06
Ba	7.2E-03	1.6E03	2.0E01	9.3E05	1.3E03	1.2E-03	3.3E-03	2.0E04
La	1.9E-04	6.3E05	5.1E03	3.3E06	9.0E05	7.1E-05	3.0E-04	9.3E06
Pr	5.5E-05	1.9E05	2.0E03	8.7E07	2.7E05	1.8E-05	9.6E-05	3.0E06
Nd	3.4E-05	1.2E05	1.3E03	5.0E07	2.0E05	1.2E-05	8.1E-05	2.2E06
Hg	4.6E-05	2.9E05	2.7E04	2.2E06	2.0E05	1.5E-05	6.9E-05	1.3E06
Bi	1.6E-05	1.1E05	8.4E05	1.9E07	5.3E06	1.5E-05	2.4E-05	3.0E07
Tl	3.3E-05	1.7E05	2.6E04	2.6E07	1.2E05	1.8E-05	1.2E-04	1.3E07
U	1.1E-02	4.6E03	1.2E01	2.6E04	1.4E03	3.5E-04	1.6E-02	4.5E05

Tabla 1. Composición de las muestras de sílex neógeno (izda) y cretácico (dcha) mediante ICP-MS.

#### IV.2.2. Sílex cretácico

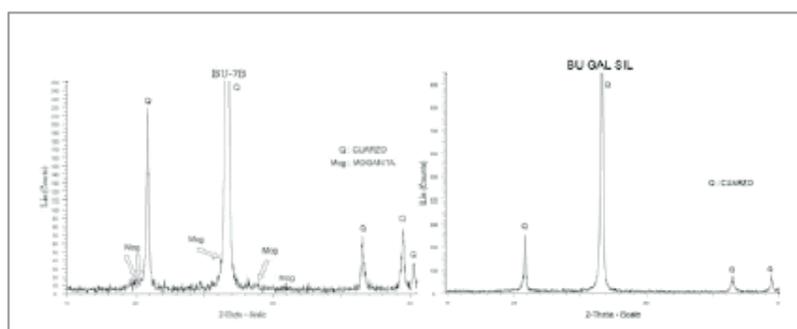
El sílex cretácico se documenta en la superficie más alta de la Sierra de Atapuerca. Este altiplano se corresponde a una superficie de erosión intraterciaria (Benito-Calvo y Pérez-González, 2007). Otro afloramiento de sílex cretácico se localiza en el interior de la Galería del Sílex (Mallol, 1999). Los depósitos secundarios de este sílex se encuentran en la ladera sur de la Sierra de Atapuerca, debido a procesos gravitacionales y tractivos.

*VI.2.2.1. Análisis microscópico:* Se trata de un sílex masivo, poco poroso y con cristales de pequeño tamaño. Es de grano fino, con pequeñas inclusiones de opacos, restos de fósiles (crinoides) (Figura 3 dcha), y alguna zona recristalizada con cuarzo policristalino.

*IV.2.2.2. Análisis geoquímicos:* La tabla 1 (dcha) recoge los análisis de las muestras cretácicas realizados mediante ICP-MS. De nuevo se recogen los valores de las cuentas normalizadas medias, medianas, máximas y mínimas. La composición de los sílex neógenos y cretácicos es bastante parecida. Si excluimos la sílice, el elemento mayoritario en los sílex es el aluminio, seguido del sodio, potasio y calcio.

El manganeso aparece en mayor proporción en valores medios debido a las muestras de Galería del Sílex, y por lo tanto, la proporción de este elemento en valores medianos es menor. A primera vista, la composición de ambos tipos de muestras no permite su separación y clasificación en grupos diferentes. Como se verá más adelante, mediante tratamiento estadístico ambos tipos de muestras pueden ser clasificadas correctamente basándonos en su composición.

Difracción de Rayos X: Se trata de sílex con presencia exclusiva de cuarzo como fase mineral dominante (Figura 5).



**Figura 5.** Espectros de difracción de Rayos X de la muestra del Valle de las Orquídeas (BU 7b) (izqda) y de la muestra de la Galería del Sílex (BU GALSIL) (dcha).

### IV.3. Caracterización sílex arqueológico

La materia prima más utilizada en los 31 asentamientos estudiados es el sílex neógeno. Las piezas arqueológicas de sílex, neógenos y cretácicos, presentan la misma caracterización que los geológicos con las siguientes salvedades:

- En Valdemazo (VM) no se ve casi ninguna lenticula y se presenta muy fresco. Esto puede significar que los que tienen más yeso se alteran más rápido.
- En Vega de Abajo (VD) se observan algunos poros rellenos de carbonato, y lenticulas muy grandes sustituidas por calcita.
- El sílex neógeno de Santillana (SA) no presenta ni lenticulas ni esferulitos, siendo el material menos parecido al resto, lo que pudiera indicar que o es un material alóctono, o bien se trata de un depósito secundario poco agregado o de baja densidad. Esta segunda opción parece más probable, ya que el escaso material natural ha sido recuperado sobre la terraza en la que se localiza el asentamiento.

#### IV.4. Contrastación de los datos

La caracterización de los sílex arqueológicos mediante los análisis microscópicos y geoquímicos revela una captación de materia prima local.

El análisis microscópico nos permite diferenciar las dos variedades de sílex:

- Sílex neógeno que presenta, en general, una anisotropía en sus texturas, con multitud de sombras de cristales lenticulares, de tamaños variables entre 0'10 y 1 mm., que se corresponderían con cristales de yeso que han sido silicificados.
- Sílex cretácico que presenta generalmente unas texturas homogéneas, microcristalinas y con restos de fósiles (bioclastos), muy fragmentados y no identificables.

Muestras particularmente interesantes son las que presentan una mayor proporción de Mn en su composición. Tres sitios arqueológicos como son Valaña Bajera (VB), Los Pedernales (PD) y El Charco (CH) y un afloramiento en cueva, Galería del Sílex (Figura 2), presentan este elemento en su composición. Planteamos la hipótesis de que puede deberse a la situación de estos sitios ya que el sílex de Valaña Bajera, Pedernales y de El Charco puede venir arrastrado por los arroyos que tienen al O el primero, al S y O del segundo y al N el tercero, que nacen ambos en plataformas estructurales. Además sabemos que los óxidos de Mn son frecuentes en suelos húmedos y que están sometidos a repetidos y frecuentes procesos de humectación y desecación, y planteamos en este trabajo la posibilidad de que asociados a estos suelos los sílex absorban manganeso. Es una hipótesis de cara a comprobar con futuros estudios.

#### IV.5. Métodos de clasificación de los sílex en función de su edad de formación

Con el fin de clasificar los sílex en función de los tipos neógeno y cretácico, se realizaron tratamientos estadísticos con las muestras procedentes de los afloramientos. La clasificación de las muestras a partir de su composición no era posible con métodos no supervisados (análisis mediante componentes principales, clustering). Con estos tipos de técnicas estadísticas no se observaban grupos de muestras relacionados con el tipo de sílex. Sin embargo, la clasificación utilizando métodos supervisados, como análisis discriminante lineal (LDA), *support vector machines* (SVM), o *k-nearest neighbour* (KNN) proporcionaba buenos resultados.

Los métodos de clasificación utilizados en este trabajo permiten trabajar con datos multidimensionales, como son los obtenidos a partir de la composición elemental de las muestras. Las representaciones bidimensionales son fácilmente visualizables pero en muchas ocasiones no proporcionan información sobre el agrupamiento de las muestras. Los datos multidimensionales son difícilmente visualizables pero proporcionan mucha información sobre la separación de los grupos. En los métodos de clasificación multidimensionales, todos los elementos (variables) se utilizan para crear el modelo de clasificación.

La figura 6A muestra el modelo de clasificación obtenido con LDA a partir de las muestras procedentes de afloramientos naturales primarias.

Puede observarse una perfecta clasificación en dos grupos diferentes que está totalmente correlacionada con el tipo de sílex. Similares resultados se alcanzaban con SVM y con KNN. Esto abre una puerta a una fácil clasificación de los sílex. Sin embargo, cuando hemos intentado predecir con el modelo calculado las muestras procedentes de los depósitos secundarios, y sobre todo, las arqueológicas, los resultados son pobres. Esto quiere decir que las muestras procedentes de los afloramientos no son, en principio, representativas de las muestras arqueológicas.

Cuando se ha realizado el modelo partiendo tanto de muestras naturales de afloramientos como secundarias, la separación no es tan prometedora como en el modelo utilizando únicamente las muestras pri-

marías, pero la predicción es mucho mejor. Los resultados de mayor calidad se obtienen con SVM y LDA, siendo peores los resultados obtenidos con KNN.

La figura 6B muestra los grupos neógenos y cretácicos formados a partir de las dos primeras variables discriminantes.

La reducción de variables mediante análisis de la varianza y análisis de correlaciones, de los 66 elementos iniciales a los 30 finales, permite mejorar los resultados (Figura 6C) aunque el modelo no predice con la fiabilidad deseada. Puede observarse que principalmente se produce una rotación de los datos correspondientes al conjunto de entrenamiento del modelo.

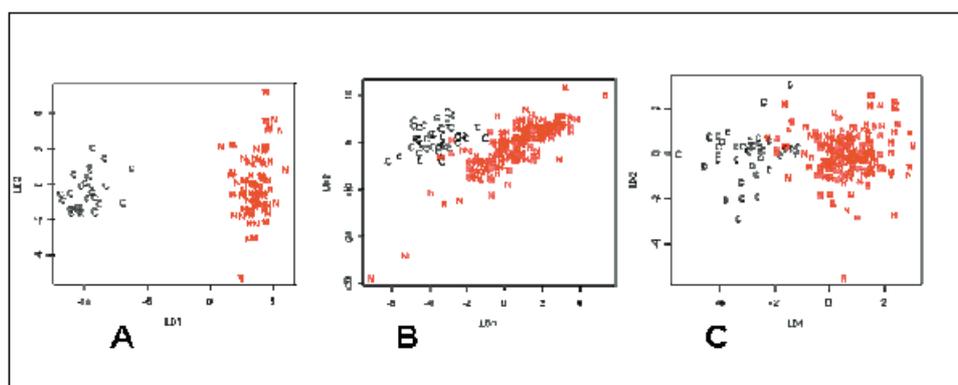
Se ha realizado un nuevo modelo seleccionando las muestras más representativas. Para ello se construye un primer modelo, tanto con LDA como con SVM, utilizando las muestras de afloramientos y se predicen las muestras de depósitos secundarios de una en una. Si la predicción de LDA y de SVM coincide, la muestra se introduce en el modelo, construyéndose un nuevo modelo que predice de nuevo otra muestra. Si no existe concordancia entre los métodos de predicción la muestra no se utiliza para construir el modelo. Con esta metodología para la selección de muestras conseguimos una fiabilidad mucho mayor. El modelo final demuestra que una única variable discriminante es suficiente para separar los sílex neógenos de los cretácicos.

El peso de los diferentes elementos en la única variable discriminante lineal muestra que los elementos minoritarios son determinantes en la separación de los grupos neógenos y cretácicos. En particular, Selenio, Cesio y Torio son muy importantes en el grupo neógeno, y el Rubidio parece que tiene mayor importancia en los sílex cretácicos.

El modelo construido con SVM predice correctamente el 94.5% de las muestras. El modelo construido con LDA predice correctamente el 84.4% de las muestras. Una de las características del modelo es que no se producen falsos neógenos aunque sí existen falsos cretácicos. Como puede observarse el modelo SVM es ligeramente mejor.

La misma metodología se intentó para determinar la procedencia de las muestras arqueológicas. De igual modo que hemos visto en la clasificación anterior, el modelo propuesto a partir de las muestras procedentes de los afloramientos separa los diferentes grupos claramente. Pero la predicción no es buena.

Por lo tanto, intentar realizar una predicción de las muestras arqueológicas según su procedencia primaria (afloramiento) o secundaria es una tarea casi imposible a partir de la composición. Hemos realizado un modelo en el que las muestras de los depósitos secundarios iban siendo asignadas a las áreas primarias si coincidía la predicción con SVM y con LDA, entrando a formar parte de un nuevo modelo.



**Figura 6.** A: Modelo de clasificación LDA de los afloramientos de sílex cretácico (C) y neógeno (N). B: Modelo de clasificación del sílex de afloramientos y depósitos secundarios. C: Modelo de clasificación del sílex mediante análisis de varianza y de correlaciones.

El modelo final viene a predecir que la mayoría de las muestras neógenas tienen su origen en lo que hemos denominado Plataforma VR (Figura 2), que es un afloramiento de sílex neógeno que domina la Sierra de Atapuerca, o en Castrillo del Val que es la misma formación que Plataforma VR. En el caso de las muestras cretácicas la procedencia es el plano de San Vicente o la zona denominada valle de las Orquídeas, que también se trata de la misma formación cretácica.

## V. CONCLUSIONES

Del análisis de todos los resultados realizados a lo largo de este trabajo, se pueden deducir una serie de conclusiones sobre clasificación de muestras:

- Las muestras de los depósitos secundarios tienen diferente composición que las de los afloramientos aun cuando provengan de ellos. Los procesos geomorfológicos y edáficos sufridos por el sílex con el paso del tiempo, una vez disgregados de la formación primaria, implican un cambio de su composición.
- Por lo tanto, las piezas arqueológicas han experimentado también ese cambio de composición a lo largo del tiempo, lo que dificulta su clasificación. No se pueden clasificar correctamente utilizando solamente afloramientos.
- Las piezas arqueológicas encontradas donde existen depósitos secundarios de sílex, generalmente, se parecen mucho en composición a éstas últimas.
- Además de la localización geográfica de las piezas, la historia de la pieza, es decir, los procesos geomorfológicos y edáficos con el paso del tiempo son una variable fundamental a la hora de intentar predecir más exactamente la procedencia de las muestras arqueológicas.
- El análisis discriminante lineal de los sílex en función de su procedencia de afloramientos o áreas de captación primaria, depósitos secundarios o arqueológicas, muestra que, aunque obviamente no se pueden separar, sí que existe una cierta tendencia a su diferenciación, que únicamente puede ser debida al entorno geológico en el que ha estado situada la muestra a lo largo de la historia.
- Hemos visto que las diferencias más claras entre el sílex neógeno y cretácico son las de tipo textural, además de que se puede considerar como criterio diferenciador la cantidad de moganita presente en las muestras, que en los neógenos es muy superior a la que aparece en los cretácicos. La moganita es imposible de caracterizar mediante microscopía ya que no tiene ni texturas ni formas de aparición precisas, y además se asemeja totalmente a las texturas microcristalinas y fibrosas del cuarzo (calcedonias) (Bustillo y García, 2001).
- La moganita y el cuarzo comparten los picos más intensos en los difractogramas que hemos presentado en las figuras 4 y 6. Debido a la pequeña proporción en la que aparece con respecto al cuarzo, la moganita siempre queda enmascarada por el cuarzo. Cuando aparece en proporciones pequeñas, como en nuestro caso, la identificación es difícil y la cuantificación con difracción sólo es posible con el refinamiento de Rietvel (Heaney y Post, 1992).
- El parecido entre las muestras de afloramientos y de los depósitos secundarios, demostrado por las analíticas, sumado a las observaciones de campo nos permiten concluir que en 27 de los 31 asentamientos arqueológicos aparece materia prima (sílex casi siempre) en el mismo sitio de la ocupación. Sin embargo, en cuatro sitios no se ha documentado la fuente de captación, San Vicente, Las Machorras, Viborita (en Viborita no aparece sílex neógeno en las inmediaciones del sitio, sin embargo sílex cretácico sí; utilizándose sólo el primero para la talla) y Salmuera (Figura 2). Las tres primeras se localizan en altiplanos o superficies de erosión, y la cuarta al pie de un sustrato rocoso. Se trata de zonas altas en las que se ha recuperado un escaso conjunto arqueológico.

Aunque en Salmuera la materia prima más utilizada es la cuarcita, que aflora en las inmediaciones del asentamiento, el sílex neógeno es aportado como en los otros tres casos, San Vicente, Las Machorras y Viborita. Cerca de San Vicente, al N, se encuentra el lapiaz en el que aflora sílex cretácico que no se recoge por los visitantes de este lugar, lo que refuerza la idea de que estos lugares fueron frecuentados de manera ocasional, llevando la materia prima sus portadores.

En el resto de los sitios arqueológicos se encuentra la materia prima sobre el propio asentamiento, siendo en la gran mayoría de los casos afloramientos o depósitos secundarios cercanos.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Carlos Díez la ayuda prestada para la realización de este trabajo y sus comentarios para mejorarlo; M.N. es becaria postdoctoral de la Cátedra Atapuerca (Fundación Atapuerca-Fundación Duques de Soria). Este artículo se redacta dentro del proyecto de investigación “El Pleistoceno y el Holoceno de la Sierra de Atapuerca: Paleobiología y Paleoconomía de las poblaciones humanas del Pleistoceno y Holoceno III” CGL2006-13532-C03-03 de la Dirección General de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia, y del proyecto BU 01-04 “Gestión del territorio en el Paleolítico medio del área centrorienta de Castilla y León por medio del estudio de fuentes y productos líticos” de la Consejería de Educación y Cultura de la Junta de Castilla y León.

## BIBLIOGRAFÍA

ALONSO-GAVILÁN, G.; ARMENTEROS, I.; CARBALLEIRA, J.; CORROCHANO, A.; HUERTA, P. y RODRÍGUEZ, J.M. 2004: “Cuenca del Duero”. En Vera, J.A. (ed.): *Geología de España*. Soc. Geol. España, IGME. Madrid: 550-556.

ARSUAGA, J.L.; LORENZO, C.; CARRETERO, J.M.; GRACIA, A.; MARTÍNEZ, I.; GARCÍA, N.; BERMÚDEZ DE CASTRO, J.M. y CARBONELL, E. 1999: “A complete human pelvis from the Middle Pleistocene of Spain”. *Nature* 399: 255-258.

BENITO CALVO, A., 2004: *Análisis geomorfológico y reconstrucción de paleopaisajes neógenos y cuaternarios en la Sierra de Atapuerca y el valle medio del río Arlanzón*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense. Madrid. España. ISBN 84-669-2585-6, 381 pp.

BENITO, A.; CARBONELL, E.; DÍEZ, C.; NAVAZO, M. y PÉREZ-GONZÁLEZ, A. 2005: “Gestión del territorio y uso del espacio en la Sierra de Atapuerca a través de un asentamiento Pleistoceno al aire libre: Hundidero (Burgos)”. *VI Iberian Quaternary meeting: The Iberian Peninsula and its Peopling by Hominids*. (26-28 septiembre 2005). Gibraltar: 102-103.

BENITO-CALVO, A. y PÉREZ-GONZÁLEZ, A. 2007: “Erosion surfaces and Neogene landscape evolution in the NE Duero Basin (north-central Spain)”. *Geomorphology*, 88: 226-241.

BENITO-CALVO, A.; PÉREZ-GONZÁLEZ, A. y PARÉS, J.P. 2007: “Quantitative reconstruction of late Cenozoic landscapes: a case study in the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain)”. *Earth Surface Processes and Landforms* (In press). DOI: 10.1002/esp.1534.

BEST, M.G. 2003: *Igneous and metamorphic petrology*. 2ª ed. Blackwell. Oxford.

BRESSY, C. 2003: *Caractérisation et gestion du silex des sites mésolithiques et néolithiques du Nord-Ouest de l'arc alpin: une approche pétrographique et géochimique* Archaeopress-BAR. Oxford.

BUSTILLO, M.A. y GARCÍA, R. 2001: "Técnicas de identificación de moganita, un nuevo polimorfo de la sílice de amplia distribución". *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 24-A: 25-26.

CARBONELL, E.; BERMÚDEZ DE CASTRO, J.M.; ARSUAGA, J.L.; DÍEZ, J.C.; ROSAS, A.; CUENCA-BESCOS, G.; SALA, R.; MOSQUERA, M. y RODRIGUEZ, X.P. 1995: "Lower Pleistocene Hominids and Artifacts from Atapuerca-TD6 (Spain)". *Science* 269: 826-832.

DÍEZ, J.C. y NAVAZO, M. 2005: "Apuntes sociales y geográficos a partir de los yacimientos del Paleolítico medio en la zona nororiental de la Meseta castellano leonesa". *Monografías 20*. Museo de Altamira. Santander: 39-54

GRATUZE, B.; BARRANDON, J.-N.; AL ISA, K. y CAUVIN, M.-C. 1993: "Non-destructive analysis of obsidian artefacts using nuclear techniques. Investigation of provenance Near Eastern artefacts". *Archaeometry* 25 (1): 11-21.

HEANEY, P. y POST, J.E. 1992: "The widespread distribution of a novel silica polymorph in microcrystalline quartz varieties". *Science*, 255: 441-443.

JONES, M.P. 1987: *Applied Mineralogy*. Graham & Trotman. 259 pp.

KINGMA, K. y HEMLEY, R. 1994: "Raman spectroscopic study of microcrystalline silica". *American mineralogist*, 79: 269-273.

LAZARETH, C.E. y MERCIER, J.C.C. 1999: "Geochemistry of ballast granites from Brouage and La Rochelle, France: evidence for medieval to post-medieval trade with Falmouth, Cornwall, and Donegal, Ireland". Pollard, A.M. (Ed.): *Geoarchaeology: exploration, environments, resources*. Geological Society, London. Special Publications: 165.

MALLOL, C. 1999: "The selection of lithic raw materials in the Lower and Middle Pleistocene levels TD6 and TD10A of Gran Dolina (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain)". *Journal of Anthropological Research* 55: 385-407.

NAVAZO, M. y DÍEZ, J.C. 2001: "Patrones de asentamiento y uso del territorio en la Sierra de Atapuerca". *Revista Atlántica-Mediterránea de Prehistoria y Arqueología Social*, IV: 7-42.

ORTEGA MARTÍNEZ, A.I.; PÉREZ-GONZÁLEZ, A.; MARTÍN MERINO, M.A.; CARRETERO DÍAZ, J.M. y ARSUAGA FERRERAS, J.L. 2005: "El Sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo. Un estudio morfológico del endokarst de la Sierra de Atapuerca (Burgos, España)". En M. Santonja y A. Pérez-González (eds): *Geoarqueología y Patrimonio en la Península Ibérica y el entorno Mediterráneo*: 161- 179.

PERKINS, W.T.; PEARCE, N.J.G. y JEFFREIS, T.E. 1993: "Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry: a new technique for the determination of trace and ultra-trace elements in silicates". *Geochemica and Cosmochimica Acta* 57: 475-482.

PINEDA, A., 1997: *Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000*. Burgos (200). Segunda Serie. Primera Edición. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

POTTS, P.J. 1998: "A perspective of the evolution of geoanalytical techniques for silicate rocks". *Geostandars Newsletter* 22: 57-68.

POZO, M.; GONZÁLEZ, J. y GINER, J. 2004: *Geología práctica. Introducción al reconocimiento de materiales y análisis de mapas*. Pearson. Prentice Hall.

SANTISTEBAN, J.I.; MEDIAVILLA, R.; MARTÍN-SERRANO, A. y DABRIO, C.J. 1996: "The Duero Basin: a general overview". En *Tertiary basins of Spain: the stratigraphic record of crustal kinematics*. Friend, P.F. y Dabrio C.J. (Eds). Cambridge University Press. Cambridge: 183-187.

TYKOT, R.H. 1997: "Characterisation of the Monte Arci (Sardinia) obsidian sources". *Journal of Archaeological Science* 24: 467-479.

TYKOT, R.H. y YOUNG, S.M. 1996: "Archaeological applications of inductively coupled plasma-mass spectrometry". Orna, M.V. (Ed) *ACS Symposium Series. Archaeological chemistry. Organic inorganic and biochemical analysis*. American Chemical Society. Washington DC: 116-130.