

Complutum

ISSN: 1131-6993

<https://dx.doi.org/10.5209/cmpl.80885>EDICIONES
COMPLUTENSE

Espectroscopia de Reflectancia de Fibra Óptica (FORS) de las principales canteras de rocas silíceas de Andalucía y su aplicación a la identificación de la procedencia de artefactos líticos tallados durante la Prehistoria

Luis F. García del Moral¹; Antonio Morgado² y José A. Esquivel³

Recibido: 15/05/21 / Aceptado: 12/01/22

Resumen: La procedencia de los artefactos de sílex es muy importante en investigaciones arqueológicas, ya que permite conocer el desplazamiento de artefactos líticos, las redes de su intercambio, los patrones de movilidad, etc. Mediante Espectroscopia de Reflectancia de Fibra Óptica (FORS) se han caracterizado 16 de las principales canteras de sílex y otras rocas silíceas de Andalucía con signos evidentes de haber sido utilizadas durante la Prehistoria reciente. La aplicación de métodos estadísticos de análisis multivariante (Análisis de Componentes Principales y Análisis de Clúster) a los datos obtenidos ha permitido diferenciar 58 espectrofacies que definen una colección espectral de los principales sílex de Andalucía. Estas espectrofacies pueden identificar el origen de los artefactos arqueológicos de sílex. La validez de este método se ha contrastado estudiando 15 puntas de flecha de la necrópolis megalítica de Gorafe. Los resultados indican que 5 de ellas pueden proceder de 4 de las canteras andaluzas de sílex y 10 parecen tener un origen diferente, pero 7 con relaciones muy estrechas entre varias de ellas. Estos resultados confirman que la espectroscopia de reflectancia y el análisis multivariante, proporcionan una herramienta muy útil para la identificación de la procedencia, la identificación y la clasificación de los sílex arqueológicos, así como proporcionar información sobre la diagénesis de los materiales silíceos desde los que fueron tallados.

Palabras clave: Sílex/rocas silíceas; Procedencia; Espectroscopia de reflectancia de fibra óptica; Análisis Multivariante; Espectrofacies; Puntas de flecha; Necrópolis de Gorafe.

[en] Fiber Optic Reflectance Spectroscopy (FORS) of the main siliceous rock quarries in Andalusia and its application to the identification of the origin of lithic artifacts carved during Prehistory

Abstract: The provenance of the flint artifacts is very important in archaeological investigations, since it allows knowing the displacement of lithic manufactures, the networks of their exchange, the patterns of mobility, etc. By means of Fiber Optic Reflectance Spectroscopy (FORS), 16 of the main quarries of flint and other siliceous rocks of Andalusia with obvious signs of having been used during recent Prehistory have been characterized. The application of statistical methods of multivariate analysis (Principal Component Analysis and Cluster Analysis) to the data obtained has made it possible to differentiate 58 spectrofacies that define a spectral collection of the main Andalusian flints. These spectrofacies can identify the origin of archaeological flint artifacts. The validity of this method has been verified by studying 15 arrowheads from the megalithic necropolis of Gorafe. The results indicate that 5 of them may come from 4 of the Andalusian flint quarries and 10 seem to have a different origin, but 7 with very close relationships between several of them. These results confirm that reflectance spectroscopy and multivariate analysis provide a very useful tool for identifying the provenance, identification and classification of archaeological flints, as well as providing information on the diagenesis of the siliceous materials from which they were carved.

¹ Depto. Fisiología Vegetal. Facultad de Ciencias. Instituto de Biotecnología. Universidad de Granada. Campus de Fuentenueva s/n, E- 18071. Granada. España. Teléfono 958 24 32 53.

E-mail: lfgm@ugr.es

ORCID: [0000-0002-0533-2915](https://orcid.org/0000-0002-0533-2915)

² Depto. Prehistoria y Arqueología. Universidad de Granada. Campus de Cartuja s/n, E-18071. Granada.

E-mail: morgado@ugr.es

ORCID: [0000-0002-8227-2194](https://orcid.org/0000-0002-8227-2194)

³ Depto. Prehistoria y Arqueología. Universidad de Granada. Campus de Cartuja s/n, E-18071. Granada.

E-mail: esquivel@ugr.es

ORCID: [0000-0002-4525-7489](https://orcid.org/0000-0002-4525-7489)

Keywords: Flint/siliceous rocks; Provenance; Fiber Optic Reflectance Spectroscopy; Multivariate Analysis; Spectrofacies; Arrowheads; Gorafe necropolis.

Sumario: 1. Introducción. 2. Objetivos. 3. Material y métodos. 3.1. Localización y caracterización geológica del área de estudio. 3.3. Espectrofacies. 3.4. Análisis Multivariante. 4. Resultados. 4.1. Firmas espectrales promedio de las canteras andaluzas de sílex. 4.2. Análisis de componentes principales para el conjunto de canteras. 4.3. Espectrofacies características dentro de cada cantera. 4.4. Caracterización de espectrofacies individuales y selección de longitudes de onda relevantes. 4.5. Comparación de las diferentes espectrofacies dentro de cada cantera. 4.6 Absorción por agua y OHs. 4.7 Identificación del posible origen de 15 puntas de flecha de la necrópolis megalítica de Gorafe. 5. Discusión. 6. Conclusiones. 7. Agradecimientos. 8. Bibliografía.

Cómo citar: García del Moral, L. F.; Morgado, A.; Esquivel, J. A. (2022): Espectroscopia de Reflectancia de Fibra Óptica (FORS) de las principales canteras de rocas silíceas de Andalucía y su aplicación a la identificación de la procedencia de artefactos líticos tallados durante la Prehistoria. *Complutum*, 33(1): 35-68.

1. Introducción

El sílex (o pedernal) se define como una roca sedimentaria compuesta de 70% a 99,9% de dióxido de silicio (SiO_2) con óxidos de calcio, carbono, hierro, potasio, aluminio y magnesio fundamentalmente como sus elementos asociados (Luedtke 1992). Precisamente, la variación en estos otros minerales presentes en concentraciones menores permite distinguir las localidades de origen de las diferentes muestras. El color del sílex se debe a la presencia de materia orgánica con H, C, N y O, que inducen la formación de nódulos de sílex en los primeros procesos de su diagénesis. Casi todos los sílex utilizados en la Prehistoria han sufrido algún grado de meteorización química producida por la solubilización y reprecipitación de materiales solubles de las regiones superficiales del sílex, lo que puede dar lugar a la formación de una pátina en la superficie de algunos de los tipos de sílex (Luedtke 1992; Thiry *et al.* 2014). La alteración del sílex en condiciones naturales se debe principalmente al blanqueamiento por radiación ultravioleta y a la precipitación química de materiales solubles como el hierro (generalmente óxidos de hierro como hematites o magnetita) en el exterior de la matriz cristalina, provocando desde el enrojecimiento al amarillo intenso. Como resultado de este blanqueo o pátina, la reflectancia del material puede verse afectada, especialmente en la parte visible del espectro (400 - 700 nm). Algunos tipos de sílex son más resistentes a estos procesos naturales y parecen estar sólo ligeramente modificados, mientras que otros tipos presentan una apariencia más blanquecina (Thiry *et al.* 2014). El mayor grado de alte-

ración aparece en o cerca de la superficie del material y puede extenderse hacia el interior a diferentes profundidades. La lixiviación de materiales solubles también puede enmascarar características potencialmente diagnósticas del tipo de sílex. Por estas razones, y a diferencia de la obsidiana y otros materiales con poca variabilidad visual, el sílex de diferentes orígenes a menudo puede distinguirse visualmente y los arqueólogos que trabajan en una región geográfica particular se familiarizan rápidamente con los tipos de pedernal locales más comunes. No obstante, el aspecto visual de las muestras de sílex de la misma procedencia puede variar de color chocolate oscuro o casi negro, a gris azulado pálido en unos pocos centímetros. Esto explica que la identificación visual por sí sola sea inadecuada para cualquier estudio científico de los tipos de material de sílex (Luedtke 1979).

El conocimiento sobre el origen y la circulación de los artefactos líticos en la Península Ibérica y por extensión en Europa, es de extraordinaria importancia, ya que las evidencias de circulación cuyo soporte son los objetos materiales, tanto como materia prima o como bienes manufacturados, expresan las relaciones entre los asentamientos prehistóricos o calcolíticos. La tecnología lítica permite recomponer una parte sustancial del sistema técnico y por tanto extraer conclusiones sobre los lugares de extracción y abastecimiento, las pautas de transmisión cultural, las formas de circulación y los circuitos de intercambio; en resumen, sobre la interacción social. Así, durante el Neolítico, el centro y sur de la Península Ibérica parece conformar un área por la que circula información, objetos y, posiblemente,

personas a través de circuitos de escala, naturaleza e intensidad distintas. Este intercambio es algo más que la simple distribución de bienes manufacturados o de materias primas entre diversas clases de agentes, sino que incluye también la difusión de las ideas e innovaciones técnicas cuya materialidad se refleja en diversos aspectos de la cultura neolítica.

Dado que la determinación de la procedencia (o fuente) de un material geológico utilizado por la humanidad prehistórica es de primordial importancia en el campo de la arqueología, como se ha comentado, su estudio ha conducido a la aplicación interdisciplinar de diversas técnicas analíticas, tanto cualitativas como cuantitativas. En especial, en los estudios del origen del sílex, se han utilizado tanto la teoría como las técnicas de la geología, la química, la física nuclear, la teledetección, la biología, la física y las matemáticas (Ciberto y Spoto 2000; Olivares *et al.* 2009; Parish 2011, 2016; Newlander y Lin 2017; Ten Bruggen-*et al.* 2017), si bien hasta hace poco, las técnicas analíticas para la caracterización de los objetos de sílex prehistóricos y para la identificación de las canteras de donde procedían, se han basado fundamentalmente en métodos petrológicos y geoquímicos (Church 1994). Los métodos petrológicos utilizan la microscopía petrográfica (lámina delgada, LD) y el análisis mineralógico, que incluye la Difracción de Rayos-X (DRX) y la Termogravimetría (TG). El análisis geoquímico incluye métodos como la Espectrometría de Fluorescencia de Rayos-X (EXRF), la Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (EI-TF), la Espectroscopia Raman, la Espectrometría de masas/óptico con plasma acoplado inductivamente (EM/OP-AI) y el Análisis Elemental por Fluorescencia de Rayos X Dispersivos de Energía (AEFRXDE). Algunas de estas técnicas cuentan en la actualidad con equipos portátiles y en ocasiones han sido aplicadas a industrias líticas de yacimientos arqueológicos peninsulares (Navazo *et al.* 2008; Tarrío *et al.* 2008; Bustillo *et al.* 2009; Hernández *et al.* 2012; Fernández Eraso y García-Rojas 2013; Tarrío y Terradas 2013; Capel Ferrón *et al.* 2015; Ortega *et al.* 2016; Roldán *et al.* 2016). Estas técnicas presentan el inconveniente de ser costosas, laboriosas, requerir mucho tiempo y ser destructivas, o alguna combinación de las mismas. En la Península Ibérica, la caracterización petrológica de los sílex arqueológicos se ha basado principalmente en su composición

mineralógica, textura, contenido fósil y ambiente donde se formaron (Domínguez-Bella y Morata 1995; Domínguez-Bella 2008; Morgado *et al.* 2008, 2011; Bustillo *et al.* 2009). Para la identificación y caracterización de minerales y rocas ha comenzado a usarse cada vez con mayor frecuencia, sobre todo en el ámbito internacional desde 1999, la espectroscopia de reflectancia (Parish 2016).

El estudio de la interacción entre la radiación y la materia se conoce como espectroscopia y el estudio de la radiación reflejada después de su interacción con la materia como espectroscopia de reflectancia. La luz reflejada por un material siempre tiene dos componentes, llamados reflectancia especular y reflectancia difusa. En la primera, los rayos que inciden paralelos a la superficie también se reflejan paralelos entre sí –sin interactuar con la muestra–, como en la superficie plana de un espejo, donde el ángulo incidente es igual al ángulo reflejado. En la reflectancia difusa, parte de los rayos incidentes interactúan con los componentes de la muestra y se absorben y difunden según la intensidad y la composición espectral de la radiación, por lo que se reflejan en diferentes direcciones. Solo la reflectancia difusa es relevante para la espectroscopia de reflectancia, ya que cada muestra, dependiendo de su composición química y propiedades ópticas, devolverá una curva de reflectancia característica llamada firma o huella espectral en función de la absorción y reflexión debida a la composición de la muestra. Los espectros de reflectancia visible e infrarrojo cercano contienen una gran cantidad de información sobre la composición física y molecular de un material como el sílex, ya que detectan moléculas que absorben estas longitudes de onda, como agua, hidroxilos, fosfatos, nitratos, carbonatos, sulfatos y óxidos e hidróxidos metálicos. Por ello, la espectroscopia de reflectancia suministra una información mucho más completa que la ofrecida por los colorímetros tipo Minolta o por el espacio de color CIELAB (CIE $L^*a^*b^*$). De hecho, la espectroscopia infrarroja se ha propuesto como una nueva técnica para detectar los efectos inducidos por el calor dentro de los artefactos líticos y para cuantificar los iones OHs y agua en sílex arqueológicos (Schmidt *et al.* 2013).

Actualmente, se conocen en Andalucía una serie de canteras de roca silíceas vinculadas a la producción de láminas de sílex especializadas, agrupadas en cuatro grandes áreas pter-

necientes a la Cordillera Bética y al Macizo Ibérico (Morgado *et al.* 2008; Morgado y Lozano 2014): a) El Cinturón pirítico de Huelva, donde hay explotaciones de rocas silíceas de origen volcánico (riolitas y riolacitas, principalmente) del Paleozoico y, específicamente del Ordovícico (Linares *et al.* 1998); b) Las explotaciones del Sub-Bético Medio de las Áreas Externas, centradas en la provincia de Granada, siendo el sílex característico de la Formación Milanos del Jurásico Superior (Morgado *et al.* 2011); c) Las explotaciones incluidas en el Complejo del Campo de Gibraltar en la provincia de Málaga y relacionadas con el desmantelamiento de la piedra caliza con sílex de las Unidades Frontales de las Áreas Internas (Lozano *et al.* 2010; Rodríguez-Tovar *et al.* 2010a, 2010b); y d) Las canteras de sílex de la Formación Malaver (Ronda, Málaga), que constituyen un contexto restringido de Edad Terciaria con sílex jurásico y provienen de la degradación de las formaciones penibéticas adyacentes.

2. Objetivos

El primer objetivo de este trabajo ha sido caracterizar mediante Espectroscopia de Reflexancia de Fibra Óptica (FORS) complementada con el Análisis Estadístico Multivariante, el material de sílex y otras rocas silíceas de las 16 principales canteras de Andalucía, todas incluidas en la clasificación geológica anterior, y crear un catálogo de firmas espectrales o espectrofacies. Esta información puede ser útil para relacionar un artefacto de sílex encontrado en excavaciones arqueológicas con el área de procedencia de donde originalmente se extrajo. El segundo objetivo ha consistido en validar la efectividad de la técnica mediante su aplicación a 15 puntas de flecha recuperadas en la necrópolis de Gorafe (García Sánchez y Spahni 1959) para tratar de averiguar si proceden o no de las canteras andaluzas caracterizadas en este trabajo. Dado que la técnica FORS es rápida, portátil, precisa y no destructiva, tiene ventajas sobre otros métodos de estudio, como los basados en análisis macroscópicos, que a menudo son de utilidad cuestionable con respecto a tipos similares de sílex (Ray 2007).

3. Material y métodos

3.1. Localización y caracterización geológica del área de estudio.

Andalucía se encuentra en el sur de la Península Ibérica, en el suroeste de Europa, siendo la única región europea con costas mediterráneas y atlánticas (Fig. 1). Para este trabajo se han usado 207 muestras tanto de sílex como de otros materiales silíceos (en adelante se usará genéricamente sílex para todas las muestras) obtenidas de 16 canteras representativas de la región de Andalucía, con evidencias de posible explotación durante el Neolítico y Calcolítico para fabricar herramientas líticas especializadas (Morgado *et al.* 2008, 2011; Lozano *et al.* 2010). La tabla 1 reúne el período geológico, la provincia, el nombre, las siglas utilizadas y las coordenadas UTM de las canteras muestreadas y la figura 1 las sitúa en el mapa de la región de Andalucía.

El origen de las canteras de Los Gallumbares (I), Puerto del Zegrí (O) y Loma de los Pedernales (L) puede atribuirse al final del Período Jurásico Secundario, con un dominio geológico principal de turbiditas calcáreas. Malaver (M) pertenece al período Cretáceo Terciario inferior con un dominio geológico predominante de *facies flysh*. Ardite (C), La Galeota (K), Castillo del Turón (G), Guaro (J), Puerto de los Martínez (N), Espíldora (H), Canchal de las Herrizas (F) y Los Reconcos (P) pertenecen al Período Terciario Eoceno-Oligoceno con un dominio geológico principal de *facies flysh*. Alcolea (A) pertenece al período Terciario-Oligoceno-Mioceno también con un dominio geológico principal de *facies flysh*. Calañas (E), Andévalo (B) y Aznalcollar (D) pertenecen al Paleozoico (Linares *et al.* 1998), localizándose en el cinturón pirítico de Huelva. La naturaleza y génesis de estas últimas rocas es diferente al sílex, ya que se trata de rocas silíceas subvolcánicas, riolitas y riolacitas principalmente y, por tanto, distinguibles de los materiales de las explotaciones de la Cordillera Bética, aunque todas ellas fueron utilizadas para producir artefactos tallados durante la Prehistoria Reciente. La petrología, mineralogía, geoquímica y paragénesis de esta especial formación geológica se describen en Mitjavila *et al.* (1997).

Dependiendo del tamaño y el grado de heterogeneidad visual debido a la meteorización en cada cantera, se ha tomado un número variable de muestras de sílex para el análisis espectroscópico, que varía desde 3 muestras para la cantera CAL (la más homogénea y de bastante

menor extensión) hasta 40 muestras para MAL (Tabla 1), con un número total de 207 muestras. El material de sílex se recolectó mediante una serie de transectos geo-arqueológicos de los afloramientos en toda la superficie de la cantera para abarcar las posibles espectrofacies.

Tabla 1

Periodo Geológico	Provincia	Denominación	Sigla	Letra	Nº de Muestras	X_UTM	Y_UTM
Paleozoico	Huelva	Calañas	CAL	E	3	149380	4186014
	Huelva	Andévalo	AND	B	7	172700	4169354
	Huelva						
Devónico Superior	Sevilla	Aznalcollar	AZC	D	7	211270	4157274
Jurásico Superior	Granada	Los Gallumbares	GAL	I	29	398885	4125000
	Granada	Puerto del Zegrí	PZE	O	5	446942	4144942
	Granada	Loma de los peder- nales	LPE	L	7	472118	4161471
Oligoceno-Mioceno inferior	Málaga	Alcolea	ALC	A	30	389900	4087900
Eoceno-Oligoceno inferior	Málaga	Ardite	ARD	C	9	335000	4063000
	Málaga	La Galeota	LGA	K	13	337492	4084885
	Málaga	Puerto de los Mar- tínez	PLM	N	4	338385	4075942
	Málaga	Guaro	GUA	J	14	382547	4091439
	Málaga	Espildora	ESP	H	8	343000	4068000
	Málaga	Castillo del Turón	CTR	G	15	330885	4088850
	Málaga	Canchal de las Herrizas	CHC	F	8	332197	4077875
	Málaga	Los Reconcos	REC	P	8	334500	4076500
Cretácico inferior	Málaga	Malaver	MAL	M	40	295000	4079000
				Nº Total de muestras	207		

Tabla 1.- Periodo geológico, denominación, siglas, letras en la Figura 1, número de muestras y coordenadas UTM de las canteras estudiadas.

3.2. Medida de los espectros ultravioleta (UV), visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR)

Los espectros de reflectancia del sílex se midieron utilizando un espectrorradiómetro portátil FieldSpec4 de la casa *Analytical Spectral Devices* (ASD), con rango espectral de 350-2500 nm y resolución espectral de 3 nm a 700 nm y 10 nm a 1400 y 2100 nm. El espectrorradiómetro FieldSpec4 es un equipo muy compacto, con dimensiones 12,7 x 36,8 x 29,2 cm y peso de 5,4 kg, siendo uno de los instrumentos de referencia en el campo de la es-

pectrorradiometría. El equipo se completa con un ordenador HP extraplano de tan sólo 1,6 kg con conectividad *bluetooth* y una mochila con soporte especial, lo que le confiere una gran portabilidad y comodidad para trabajar en condiciones de campo. El intervalo de medición fue de 1,4 nm para el rango espectral de 350 a 1000 nm y de 2 nm para el rango de 1001 a 2500 nm de acuerdo con las especificaciones técnicas del Manual FieldSpec4, obteniéndose 2151 datos de reflectancia espectral por muestra. El sistema utiliza una sonda de contacto de alta intensidad A122307 (*Analytical Spectral Devices Inc.*) con una fuente de luz halógena

de elevada penetración en el material silíceo y un área de superficie de iluminación equivalente a un círculo de 2 cm de diámetro con una reflectancia especular por debajo del 5%. Para su medición, las muestras se situaron sobre papel carbón del usado para copias mecanográficas, material que absorbe prácticamente toda la radiación emitida por la sonda y evita cualquier interferencia por la posible reflexión del soporte. No obstante, para muestras de muy pequeño tamaño, al instrumento puede acoplarse una sonda de contacto de tan sólo 3,2 mm de diámetro (*Small Diameter Reflectance Probe* ASD 4106067). El dispositivo se conectó dejándose optimizar durante 30 minutos antes de su uso.

Después de optimizar el instrumento, se tomó un blanco de referencia utilizando un Spectralon de 3,62" de diámetro (*Analytical Spectral Devices Inc.*), material que proporciona una superficie Lambertiana del 100% de reflectancia en todo el espectro. Se aplicó una corrección de corriente oscura para eliminar la corriente eléctrica generada por electrones térmicos (llamada *dark current*, DCC) y que se agrega a la generada por los fotones entrantes. El sistema reduce el ruido en la señal espectral deseada mediante la técnica de promedio del espectro (20 espectros por cuantificación). Para los cálculos posteriores se midieron tres espectros por muestra aplicando directamente la sonda de contacto en tres superficies representativas. Siguiendo el manual del FieldSpec4, el nivel de blanco se calibró cada 25 espectros. Dado que la medida es muy rápida, de apenas 10 segundos, se recomienda obtener como mínimo tres huellas espectrales para muestras homogéneas y ampliar el número en función de la posible heterogeneidad del material.

3.3. Espectrofacies

Las diversas huellas espectrales que pueden aparecer en muestras del mismo mineral por fenómenos diagenéticos de meteorización y alteraciones han propiciado el concepto de espectrofacies, un concepto descriptivo y sin implicaciones diagenéticas (Chiari *et al.* 1994). Una espectrofacies es una asociación característica de reflectancia de la radiación producida por procesos moleculares y electrónicos específicos o por una combinación de ellos en el material estudiado. En nuestro trabajo, las espectrofacies definen la variabi-

lidad específica debida a la acción de factores ambientales en los procesos diagenéticos de las superficies expuestas del sílex objeto de estudio. Las espectrofacies, por tanto, proporcionan una descripción exhaustiva de sus características espectrales y permiten la comparación con muestras del mismo o diferente origen, así como con piezas arqueológicas. Estas variaciones de los patrones de absorción son diagnósticas para diferentes tipos de rocas.

Una cuestión relevante, sin embargo, radica en que las alteraciones tafonómicas en colecciones arqueológicas pueden afectar a las huellas espectrales que los sílex tenían en origen, sobre todo cuando aparece algún tipo de alteración superficial o pátina, como ha sido discutido en la introducción. No obstante, la sonda de contacto de alta intensidad luminosa utilizada en este trabajo está especialmente diseñada para minerales. Por ello la penetración de los fotones puede llegar hasta casi un cm de profundidad en el sílex (en piezas no muy gruesas la radiación atraviesa incluso su espesor) y recoger la reflectancia difusa posterior. Es decir, este instrumento no sólo reconoce la luz reflejada por la superficie más externa, sino que además es capaz de reconocer los estratos por debajo de esa posible alteración o pátina superficial y devolver una huella espectral más profunda, facilitando así la comparación entre las muestras de una cantera y las encontradas en excavaciones arqueológicas, como se aborda en el apartado siguiente.

3.4. Análisis Multivariante

Se ha basado en la realización de Análisis de componentes principales (*Principal Component Analysis*, PCA) y Análisis de conglomerados (*Cluster Analysis*). Ambos métodos son muy utilizados para el análisis cuantitativo de datos espectrales (Esbensen y Swarbrick 2018) y para explorar e identificar patrones similares subyacentes en los datos originales, especialmente con propósitos de clasificación.

La visualización de los espectros se realizó con el software ViewSpecPro Versión 6.0, (*Analytical Spectral Devices Inc.*) y en todos los pasos estadísticos descritos para el análisis espectral se empleó el software de análisis multivariante *Unscrambler* (Versión 10.5, CAMO Process). Se realizaron cálculos adicionales utilizando el paquete de estadística

Statgraphics 18. La gran ventaja de los métodos estadísticos multivariantes es su capacidad para extraer la información esencial de los espectros y explorar esta información espectral para aplicaciones cualitativas o cuantitativas (Ritz *et al.* 2011), incluida la comparación e identificación de materiales de composición o procedencia similar.

3.5. Material arqueológico

Al objeto de verificar la aplicabilidad del método para la identificación de la procedencia de artefactos de sílex, se ha realizado un estudio espectrorradiométrico de 15 puntas de flecha procedentes de las excavaciones de García Sánchez y Christian Spahni (1959) efectuadas entre 1955 y 1956. En la actualidad se conservan al menos 155 sepulturas megalíticas, agrupadas en diez necrópolis que recorren el territorio, articuladas en terrazas a lo largo del cauce del río Gor. Todas las puntas de flecha estudiadas en este trabajo están depositadas en el Museo Arqueológico y Etnológico de Granada. En la tabla 2 se presenta el número

de inventario de cada pieza, su fotografía, dimensiones, descripción, necrópolis y número del sepulcro donde se encontraron. Cuatro son puntas triangulares con aletas (27%), seis puntas triangulares con base cóncava (40%), tres puntas de forma ojival con base cóncava (20%) y dos puntas de forma foliácea (13%) (tabla 2). Es de señalar que, en las fotografías del inventario del museo, el color de las piezas está bastante distorsionado, probablemente por una excesiva iluminación. Según la información del museo, la datación para todas las puntas de flecha corresponde al Calcolítico. Siguiendo la metodología descrita, se tomaron dos firmas espectrales por cada cara de las puntas de flecha. Para el análisis de resultados se promediaron todas las medidas. Se ha realizado una búsqueda exhaustiva tanto bibliográfica como en los documentos del museo con la ayuda de personal especializado del mismo sin encontrar ninguna asignación *de visu* de estas puntas de flecha a ninguna posible cantera conocida.

Tabla 2.

Inventario del museo	Descripción	Dimensiones (cm)	Yacimiento y número de sepulcro	Flecha
CE05902	Con pedúnculo y aletas laterales	3.0 x 1.7	Las Majadillas nº 86	
CE05907	Con pedúnculo y aletas laterales	4.3 x 2.6	Las Majadillas nº 84	
CE05913	Ojival de base cóncava	2.6 x 1.9	La Sabina nº 52	
CE05914	Triangular de base cóncava con un lateral dentado	3.5 x 1.5	Las Majadillas nº 86	

CE05920	Triangular de base cóncava	3.8 x 1.3	La Sabina nº 52	
CE07692	Foliácea simétrica	5.5 x 1.7	Las Majadillas nº 78	
CE07693	Con pedúnculo y aletas laterales incipientes	4.7 x 2.1	La Sabina nº 55	
CE07698	Triangular de base cóncava	3.6 x 1.6	Las Majadillas nº 84	
CE07703	Con pedúnculo y aletas laterales desarrolladas	3.6 x 2.1	Las Majadillas nº 78	
CE07727	Foliácea simétrica	4.3 x 2.2	Las Majadillas nº 76	
CE07732	Triangular de base cóncava	2.7 x 1.2	Las Majadillas nº 84	
CE08485	Triangular de base cóncava	3.3 x 1.4	Llano de Olivares nº 104	
CE13529	Triangular de base cóncava	3.4 x 1.4	La Sabina nº 49	
CE13533	Triangular de base cóncava	3.8 x 1.2	Las Majadillas nº 84	

CE13535	Ojival de base cóncava	2.4 x 1.8	La Gabiarra nº 179	
---------	------------------------	-----------	--------------------	--

Tabla 2.- Descripción de las 15 puntas de flecha usadas para validar la metodología propuesta en este trabajo.

4. Resultados

4.1. Firmas espectrales promedio de las canteras andaluzas de sílex

Las muestras de sílex de las canteras estudiadas pueden describirse visualmente como marrón claro a oscuro o incluso negro, y de grano medio a fino con matices variables de oscuro a claro. Esta variación de color puede atribuirse directamente a diversos grados en los procesos de reemplazo de silicatos y meteorización a los que se ha visto sometido el nódulo o muestra individual.

Para estudiar la variabilidad de la reflectancia espectral del sílex, la Figura 2 presenta la firma espectral media de los sílex de cada cantera, es decir, el promedio de las tres medidas realizadas sobre cada una de las muestras tomadas en cada cantera (Tabla 1). El examen de la figura permite comprobar que existe una alta variabilidad espectral entre los sílex de las canteras estudiadas, donde la reflectancia espectral varía de muy baja en PLM a alta en MAL, GUA y ALC. También las firmas espectrales permiten diferenciar las canteras LGA, PLM, REC, CHC, AZC y ESP por su reflectancia promedio por debajo de 0,15, lo que indica muestras de sílex muy oscuras (Fig. 2). Además, hay canteras como por ejemplo LPE o PZE donde se aprecian valles y picos muy pronunciados, mientras que en otras canteras como LGA, ESP y REC la firma espectral aparece casi horizontal.

El dendrograma resultante del primer análisis de clúster (Fig. 3) ha permitido una clasificación estadística de las canteras en función de su reflectancia. Así, MAL, ARD, GUA y ALC presentan una reflectancia media por encima del 80% de la reflectancia máxima (que

corresponde a MAL). PZE, LPE, GAL y CTR presentan una reflectancia media, situada entre el 50 y el 80% de la máxima. AND, LGA, ACZ, CHC, RES, CAL y ESP presentan una reflectancia baja, situada entre el 30 y el 50% de la máxima y PLM presenta una reflectancia media muy baja, inferior al 20% de la máxima. Además, las canteras dentro de cada uno de estos grupos están muy cerca geográficamente, como se discutirá posteriormente. Los mínimos de reflectancia se corresponden con máximos de absorción, es decir, con los sobretonos debidos a la captación de energía por determinados enlaces de las moléculas presentes en el material. Los valores mínimos de reflectancia en el sílex normalmente se asocian con absorción de agua y de OHs, como se explica en el texto.

4.2. Análisis de componentes principales para el conjunto de canteras

La figura 4 muestra los resultados obtenidos para el análisis de componentes principales (PCA) de la media de los valores de reflectancia espectral para todas las canteras estudiadas. Los datos carecieron de procesado previo a los cálculos correspondientes y se realizaron sobre todas las longitudes de onda para cada muestra. PC-1 explica el 85% de la varianza total de la muestra, PC-2 explica el 12% y PC-3 el 2%. La proyección de las canteras en los ejes PC-1 y PC-2, así como en los ejes PC-2 y PC-3, permite clasificar las firmas espectrales de las canteras obtenidas en la figura 2 no sólo en función de su mayor o menor grado de reflectancia como en el dendrograma de la figura 3, sino también en varios grupos espectrales de acuerdo con la distribución geográfica y la diferente composición geológica de cada región, como se muestra en la figura 1.

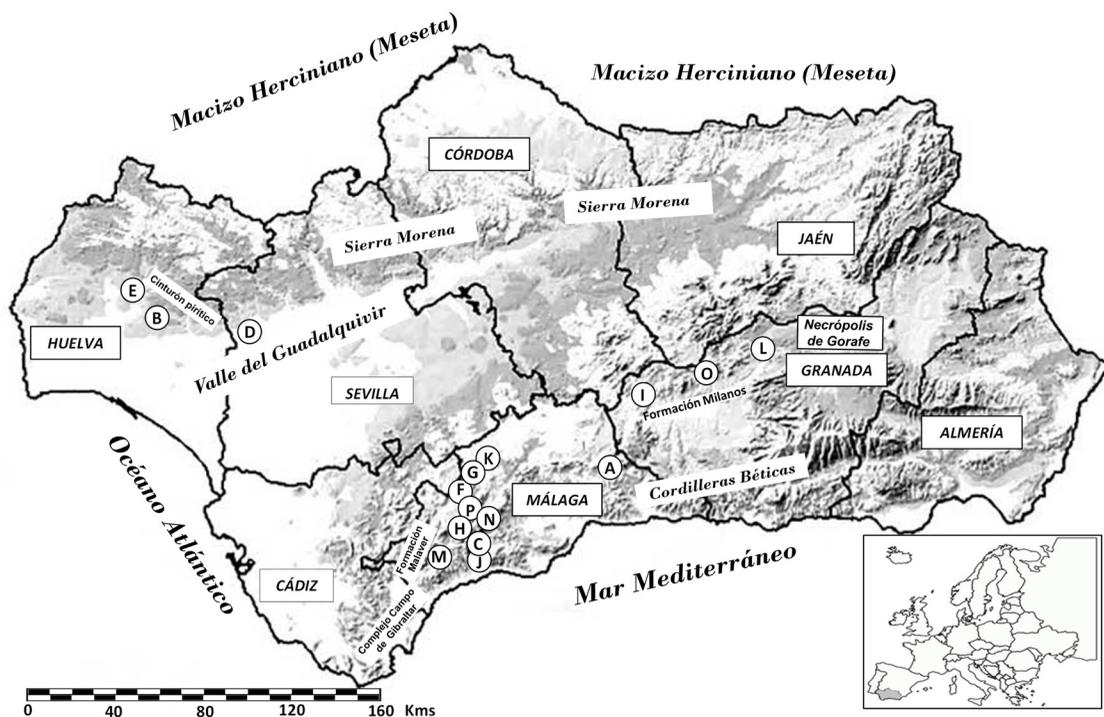


Figura 1.- Localización de las canteras de sílex y otras rocas silíceas en Andalucía. Las letras indican la situación de cada cantera y su significado se encuentra en la tabla 1. Se indica la situación de la necrópolis de Gorafe.

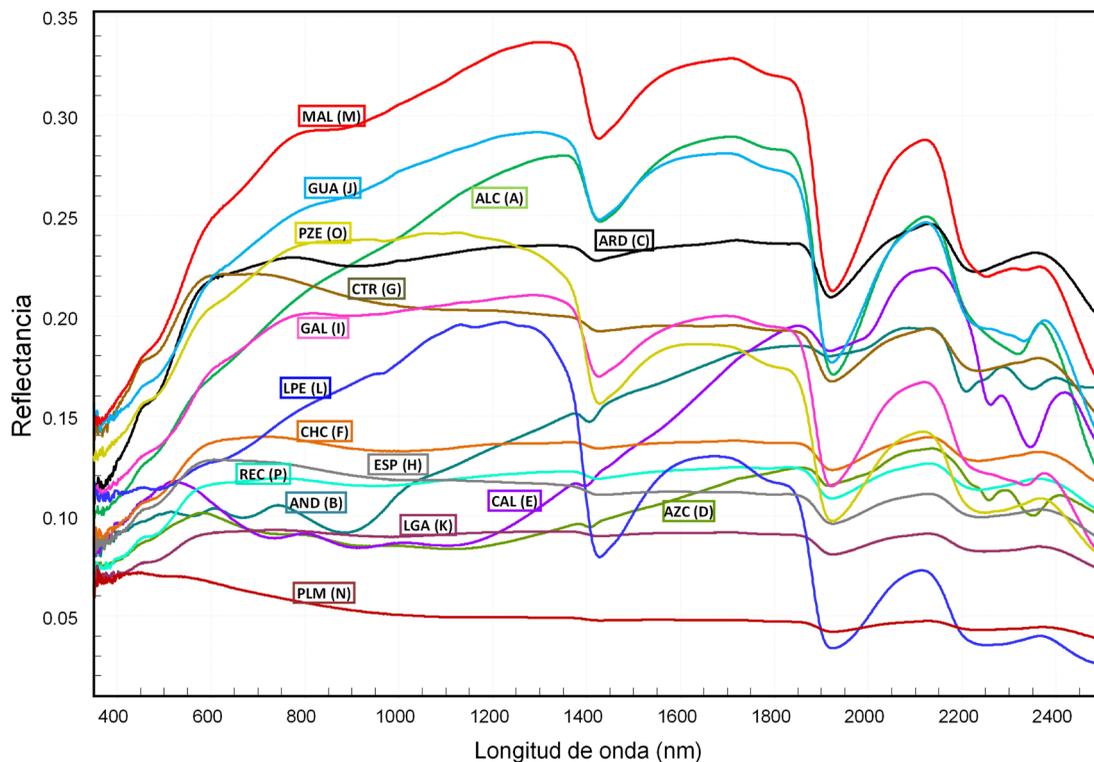


Figura 2.- Curvas de reflectancia para cada cantera de sílex. Cada curva es el promedio de todas las muestras tomadas en cada cantera. Los acrónimos y las letras se describen en la tabla 1 y se sitúan en la figura 1.

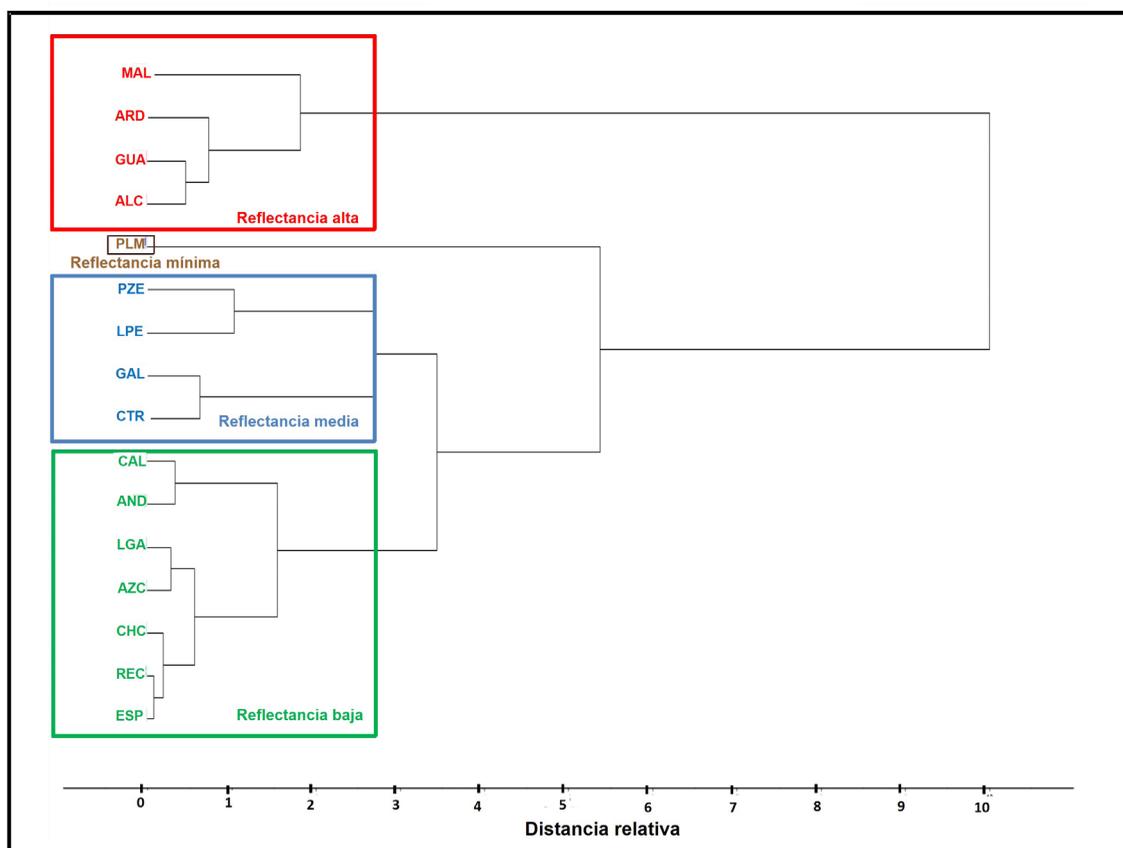


Figura 3.- Dendrograma obtenido para la reflectancia espectral del promedio de cada cantera. Método del vecino más próximo y distancias euclídeas al cuadrado.

El primer componente principal (PC-1) refleja las diferencias en reflectancia (Fig. 4a), permitiendo una agrupación de las canteras en las cuatro clases bien definidas de reflectancia alta (MAL, ARD, GUA y ALC), media (PZE, LPE, GAL y CTR), baja (CAL, AND, LGA, AZC, CHC, REC y ESP), y mínima (PLM), al igual que la agrupación obtenida mediante el análisis de clúster de la figura 3. El segundo y tercer componentes (PC-2 y PC-3) están asociados con diferencias en la forma de la firma espectral y en el contenido de agua y OHs, consecuencia de las distintas zonas geográficas (Fig. 1), períodos geológicos y diferente diagénesis consecuencia del ambiente en que se formaron. El análisis (Fig. 4b) diferencia un primer grupo de canteras muy diferentes del resto, como se ha comentado, formado por AND, CAL y AZC pertenecientes al cinturón pirítico de Huelva en el sudoeste de Andalucía y cuyo origen se localiza en el Paleozoico (Mitjavila *et al.* 1997; Linares *et al.* 1998). AZC aparece ligeramente diferenciada de las otras dos canteras del cinturón pirítico (CAL y AND) debido a su ubica-

ción mucho más cercana a la cuenca del Guadalquivir, lo que probablemente condicionó un mayor contenido de agua durante su diagénesis y, por tanto, una menor reflectancia, como se observa en la tabla 5, especialmente en las bandas de 1900 y 2200 nm. Igualmente, en los dendrogramas de la figura 7 para la reflectancia debida al agua se puede comprobar de nuevo que AZC se separa de CAL y AND. En el otro extremo de la figura 4b aparecen PZE, LPE y GAL, canteras con reflectancia media y ubicadas en el oeste de la provincia de Granada, en las áreas subbéticas y penibéticas, en la llamada Formación Milanos del Jurásico Superior. Este sílex contiene elementos característicos de un ambiente oceánico de plataforma pelágica, es decir, se formó en un medio sedimentario marino poco profundo (Morgado *et al.* 2011), lo que explica su elevado contenido en agua, como se puede comprobar por su muy pequeña reflectancia, especialmente en las bandas de 1900 y 2200 nm de la tabla 5. En el centro de la figura 4b se diferencia un grupo de canteras agrupadas bajo la denominación de sílex tipo Turón (LGA,

CTR, CHC, REC, PLM y ESP) por encontrarse bastante cercanas en el valle del Turón, al noroeste de las cordilleras Béticas, en las unidades geomorfológicas llamadas complejo Alpujárride y complejo Maláguide (Lozano *et al.* 2010). Se trata de materiales tipo *facies flysh* con origen en el Eoceno-Oligoceno, al igual que la cantera GUA localizada un poco más al sur del valle del Turón, en el sureste de las Béticas y que también agrupa con las anteriores (Fig. 4b). El componente principal 3 (PC-3), a su vez, agrupa en la parte inferior de la figura 4b las canteras CTR y ARD, la primera en el valle del Turón y la segunda al sur de este valle, también

de tipo *facies flysh* y con origen Eoceno-Oligoceno, pero diferenciadas del resto por su menor contenido de agua, reflejado por su alta reflectancia en las bandas correspondientes (Tabla 5). Igualmente, el PC-3 de la figura 4b diferencia claramente en la parte superior la cantera ALC, debido a su diferente origen en el Oligoceno-Mioceno y a su situación en el centro de las Cordilleras Béticas (Fig. 1). MAL aparece también diferenciada del resto por su distinto origen Cretácico-Terciario y su ubicación en la llamada formación Malaver, en el extremo occidental de las cordilleras Béticas.

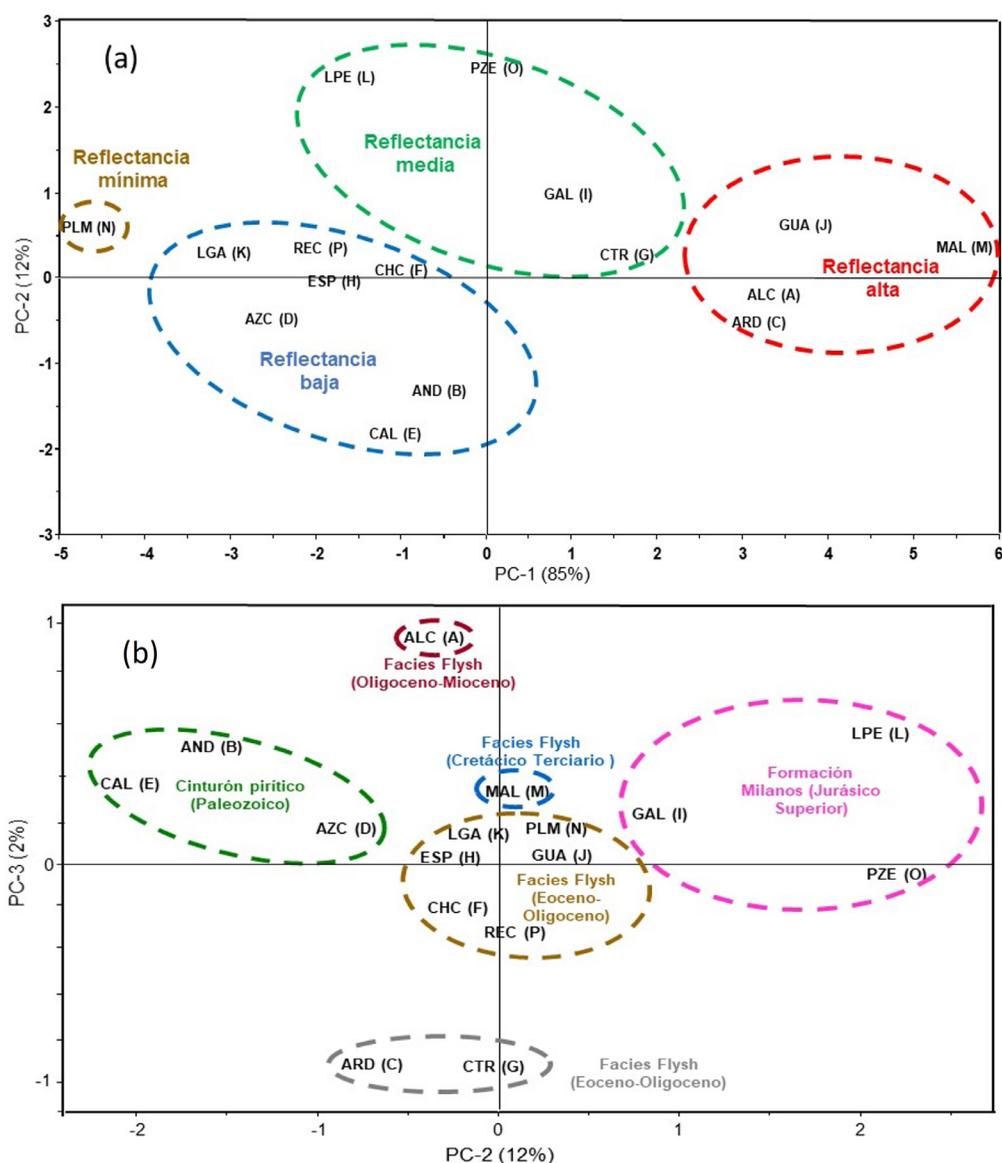


Figura 4.- Análisis de componentes principales para el promedio de todas las longitudes de onda entre 350 y 2500 nm para todas las medidas por cantera. Siglas descritas en la tabla 1.

Este análisis reafirma la utilidad de la técnica FORS para esclarecer las relaciones entre la ubicación geográfica, los procesos diagenéticos (principalmente absorción de agua) y los atributos geomorfológicos, resultando de gran utilidad para clasificar las canteras de sílex, al menos en Andalucía. De hecho, la figura 4b agrupa espectrográficamente las canteras casi en la misma situación geográfica que encontramos en el mapa de la figura 1. Estos tres resultados permiten establecer los factores más importantes en la formación de sílex en Andalucía utilizando la técnica FORS.

4.3. Espectrofacies características dentro de cada cantera

Las muestras que provienen de cada cantera presentan diferentes espectrofacies dependiendo de su heterogeneidad y de la propia variabilidad de la cantera, causada principalmente por la influencia de los factores ambientales y la diferente ubicación y orientación del fragmento de sílex muestreado. Para identificar estas espectrofacies, se realizó un análisis de clúster mediante el método del vecino más próximo y distancias euclídeas al cuadrado usando todas las firmas espectrales obtenidas de todas las muestras de cada cantera (dendrogramas no mostrados). Este análisis permitió agrupar las firmas espectrales de cada cantera por separado en subgrupos de reflectancia muy semejante, cuyo promedio constituye cada una de las espectrofacies utilizadas posteriormente. De esta forma, el número total de espectrofacies obtenido para el conjunto de las canteras ha sido de 58, oscilando desde 1 espectrofacies en CAL hasta 7 en GAL (Figs. 5a y 5b). Las espectrofacies de algunas canteras presentan una firma espectral muy baja y aproximadamente paralela al eje de la longitud de onda, es decir, casi horizontal, lo que indica pederiales con un color muy oscuro, como en las espectrofacies ALC1, AND1, AZC1, CHC1, ESP1, ESP2, ESP3 (Fig. 5a). En contraste, las muestras de sílex de las canteras MAL, LPE,

PZE, ARD y CAL muestran valles y picos más o menos pronunciados (Figs. 5a y 5b).

4.4. Caracterización de espectrofacies individuales y selección de longitudes de onda relevantes

Una vez definidas las espectrofacies de cada cantera se realizó un nuevo análisis de componentes principales para todas las espectrofacies de cada cantera utilizando de nuevo el software *Unscrambler*. En cada caso, el programa optimizó el número de componentes principales en función de que sus valores propios superaran la unidad. Posteriormente, las cargas (*loadings*) del primer componente principal en el análisis de cada cantera se utilizaron para la selección de las longitudes de onda relevantes para cada espectrofacies (Nogales-Bueno *et al.* 2014; Esbensen y Swarbrick 2018), ya que el PC1 era responsable del 92 al 99% de la varianza total en los datos espectrales entre las diferentes canteras. Las longitudes de onda correspondientes a los valores de los picos y valles más significativos en este componente principal se seleccionaron como candidatos para definir las espectrofacies mostradas en la tabla 3. Se las agrupó a intervalos de 300 nm comenzando en el visible (400-700 nm), ya que los valores en el rango ultravioleta (350-400 nm) presentaban demasiado ruido de fondo.

La región entre 400 y 700 nm (VIS) del espectro es particularmente importante porque define el color que generalmente se percibe a simple vista. Los sílex verdosos tienen una reflectancia máxima alrededor de 550 nm, es decir en el verde, máximo que resulta de una absorción más o menos fuerte en el azul (entre 446 y 500 nm) y en el amarillo (entre 578 y 592 nm), ambas debido, en la mayoría de los casos, a la presencia de Fe. La coloración oscura o negra del sílex generalmente se debe a la presencia de materia orgánica con los elementos H, C, N y O, ya que pueden inducir la formación de nódulos dentro del sílex en su diagénesis temprana.

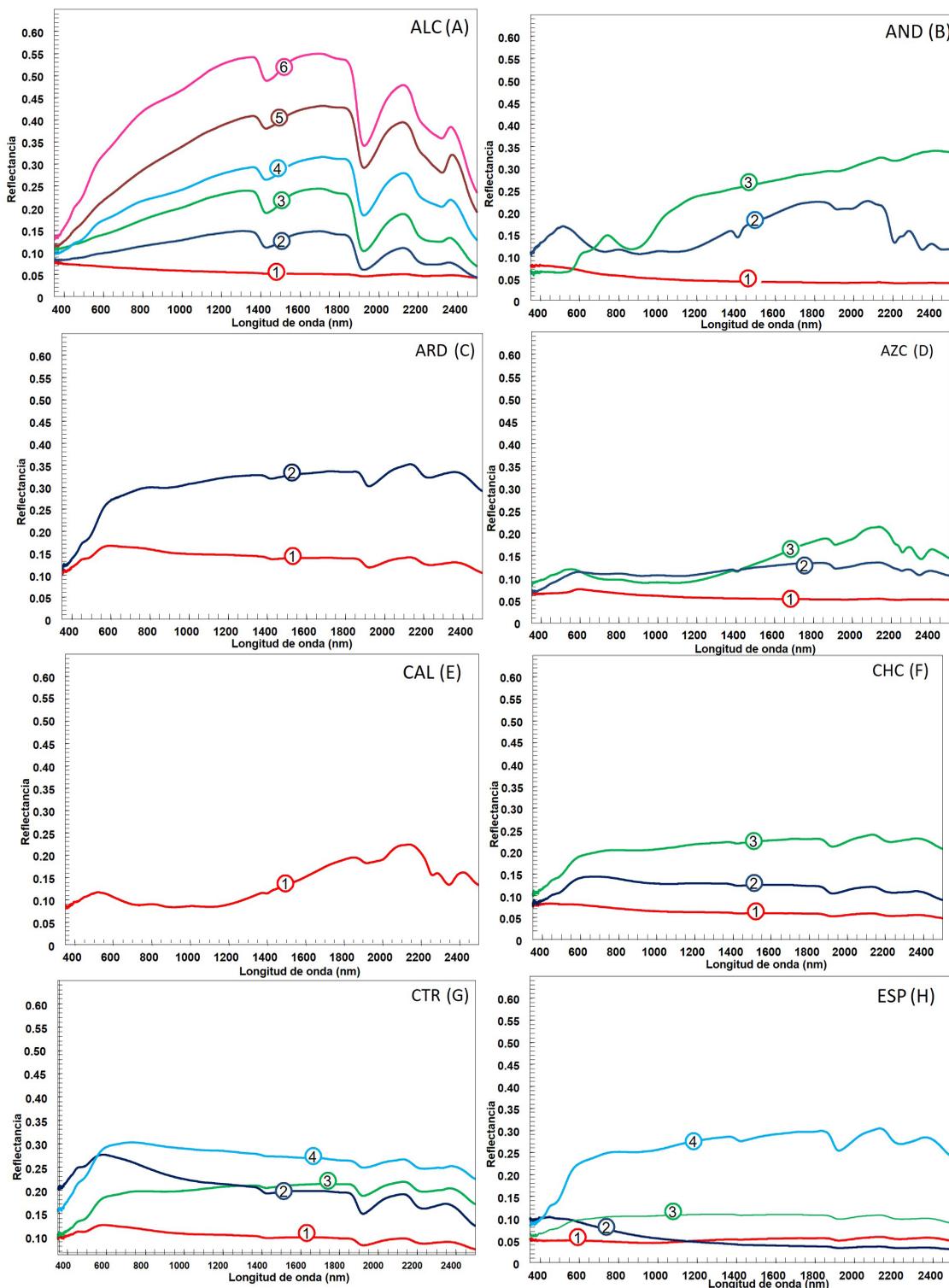


Figura 5a - Espectroficies obtenidas para cada canchale como se explica en el texto. Las siglas se describen en la tabla 1.

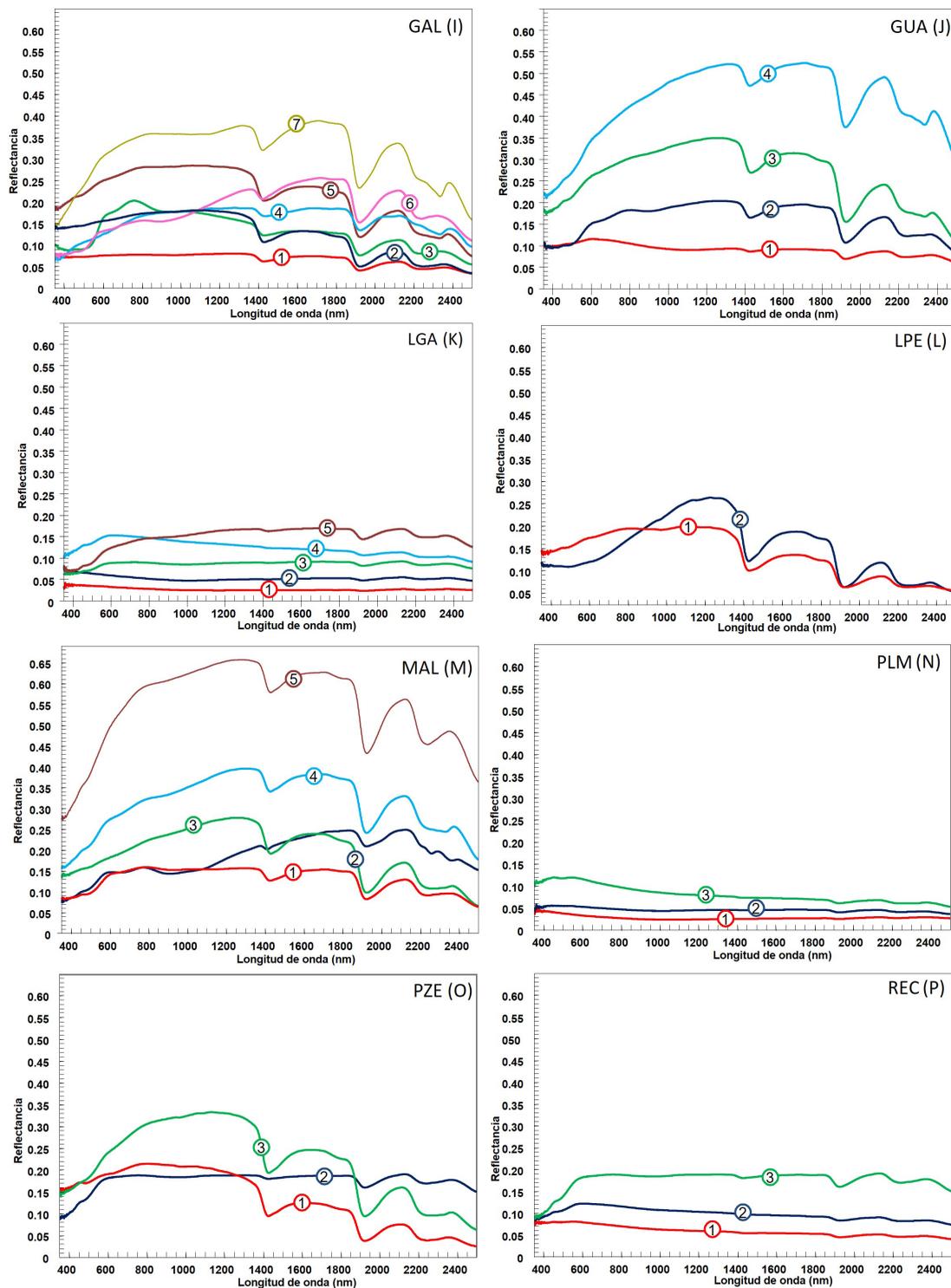


Figura 5b - Espectroficies obtenidas para cada cantera como se explica en el texto. Las siglas se describen en la tabla 1.

Tabla 3.

Espectrofacies	400-700 nm	701-1000 nm	1001-1300 nm	1301-1600 nm	1601-1900 nm	1901-2200 nm	2201-2500 nm
ALC1	400 (0.0777) 595 (0.0713)	-	1080 (0.0569)	-	1712 (0.0507) 1832 (0.0521)	2130 (0.0528)	2368 (0.0503) 2500 (0.0444)
ALC2	400 (0.0832) 609 (0.0993)	-	-	1312 (0.1479)	1698 (0.1473) 1830 (0.1392)	2126 (0.1086)	2358 (0.0760) 2500 (0.0427)
ALC3	400 (0.1092)	-	-	1322 (0.2335)	1700 (0.2376) 1830 (0.2264)	2125 (0.1842)	2363 (0.1358) 2500 (0.0778)
ALC4	400 (0.1024)	-	-	1352 (0.2889)	1716 (0.3111) 1831 (0.3008)	2126 (0.2709)	2367 (0.2132) 2500 (0.1257)
ALC5	400 (0.1242)	-	-	1357 (0.4079)	1717 (0.4311) 1830 (0.4261)	2121 (0.3894)	2373 (0.3172) 2500 (0.1881)
ALC6	400 (0.1532)	-	-	1358 (0.5426)	1699 (0.5499) 1830 (0.5371)	2124 (0.4669)	2367 (0.3743) 2500 (0.2285)
AND1	400 (0.0846)	-	-	-	-	2130 (0.0421)	2325 (0.0407) 2500 (0.0399)
AND2	400 (0.0628) 515 (0.0627)	730 (0.1443) 906 (0.1197)	1013 (0.1806) 1079 (0.2066) 1374 (0.2526)	-	1818 (0.2901)	2138 (0.3184)	2297 (0.3231) 2451 (0.3325) 2500 (0.3310)
AND3	400 (0.1360) 515 (0.1768)	743 (0.1163) 868 (0.1128)	-	-	-	2071 (0.2244)	2500 (0.1155)
ARD1	400 (0.1237) 602 (0.1747)	1000 (0.1552)	-	-	1715 (0.1393) 1845 (0.1369)	2127 (0.1397)	2355 (0.1284) 2500 (0.1045)
ARD2	400 (0.1417)	808 (0.3101) 867 (0.3091)	-	-	1724 (0.3363) 1848 (0.3296)	2131 (0.3461)	2355 (0.3288) 2500 (0.2858)
AZC1	400 (0.0650) 595 (0.0761)	-	-	-	1720 (0.0525)	1969 (0.0509) 2135 (0.0527)	2358 (0.0513) 2500 (0.5007)
AZC2	400 (0.0735) 560 (0.1101)	-	-	-	1861 (0.1323)	2134 (0.1340)	2285 (0.1183) 2500 (0.1044)
AZC3	400 (0.0949) 593 (0.1149)	-	-	-	1726 (0.1711) 1849 (0.1867)	2133 (0.2130)	2292 (0.1682) 2343 (0.1440) 2500 (0.1434)

CAL	400 (0.0963) 522 (0.1172)	-	1004 (0.0866) 1100 (0.0851)	1377 (0.1161)	1850 (0.1935)	2137 (0.2223)	2284 (0.1588) 2347 (0.1335) 2418 (0.1604) 2500 (0.1326)
CHC1	400 (0.0867) 496 (0.0857)	999 (0.0677)	-	-	1682 (0.0582)	2126 (0.0603)	2361 (0.0570) 2500 (0.0501)
CHC2	400 (0.0888) 680 (0.1442)	-	1081 (0.1267)	1347 (0.1272)	1704 (0.1241) 1830 (0.1217)	2122 (0.1177)	2360 (0.1078) 2500 (0.0880)
CHC3	400 (0.1132)	797 (0.2000) 902 (0.1991)	-	1375 (0.2222)	1725 (0.2294)	2132 (0.2361)	2370 (0.2275) 2500 (0.2044)
CTR1	400 (0.1076) 451 (0.1163) 485 (0.1155) 587 (0.1311)	990 (0.1121)	-	-	1708 (0.0993)	2126 (0.0996)	2360 (0.09187) 2500 (0.0756)
CTR2	400 (0.1137) 456 (0.1338)	785 (0.1989) 903 (0.1978) 999 (0.1998)	-	1359 (0.2105)	1718 (0.2145) 1834 (0.2120)	2130 (0.2174)	2367 (0.2031) 2500 (0.1689)
CTR3	400 (0.2167) 464 (0.2444) 592 (0.2705)	990 (0.2206)	-	1364 (0.2067)	1712 (0.1989) 1831 (0.1902)	2127 (0.1868)	2347 (0.1667) 2500 (0.1203)
CTR4	400 (0.1777)	742 (0.3025) 990 (0.2901)	-	-	1706 (0.2682) 1834 (0.2596)	2127 (0.2619)	2371 (0.2475) 2500 (0.2204)
ESP1	400 (0.0531) 436 (0.0527) 546 (0.0531) 606 (0.0524)	990 (0.0474)	-	1374 (0.0525)	1722 (0.0549) 1840 (0.0560)	2130 (0.0588)	2365 (0.0573) 2500 (0.0504)
ESP2	400 (0.1046) 451 (0.1063) 495 (0.1029) 603 (0.0942)	-	-	-	-	2127 (0.0358)	2370 (0.0337) 2500 (0.0296)
ESP3	400 (0.0691) 450 (0.0782) 502 (0.0843)	814 (0.1107) 904 (0.1108) 992 (0.1120)	-	1364 (0.1096)	1712 (0.1089) 1831 (0.1084)	2127 (0.1087)	2355 (0.1016) 2500 (0.0894)

ESP4	400 (0.0948) 448 (0.1226)	814 (0.2443) 874 (0.2435)	-	1364 (0.2851)	1831 (0.3015)	2130 (0.3069)	2360 (0.2869) 2500 (0.2421)
GAL1	400 (0.0754) 452 (0.0776) 493 (0.0775) 608 (0.0813)	-	1281 (0.0796)	-	1688 (0.0738) 1830 (0.0704)	2121 (0.0629)	2361 (0.0490) 2500 (0.0343)
GAL2	400 (0.0741) 452 (0.0816) 608 (0.1286)	-	1055 (0.1735)	-	1695 (0.2551) 1830 (0.25331)	2122 (0.2228)	2316 (0.1650) 2500 (0.1079)
GAL3	400 (0.0884) 452 (0.0911) 502 (0.0917)	761 (0.2054) 931 (0.1794)	1003 (0.1783)	-	1651 (0.1318) 1840 (0.1268)	2124 (0.1121)	2329 (0.0856) 2500 (0.0544)
GAL4	400 (0.0783) 453 (0.1026) 608 (0.1358)	1000 (0.1889)	1089 (0.1803) 1278 (0.1863)	1357 (0.1853)	1680 (0.1852) 1832 (0.1838)	2126 (0.1676)	2333 (0.1249) 2387 (0.1376) 2500 (0.0964)
GAL5	400 (0.1957)	865 (0.2845)	-	1312 (0.2754)	1658 (0.2360) 1833 (0.2155)	2118 (0.1755)	2372 (0.1229) 2500 (0.0725)
GAL6	400 (0.1401) 452 (0.1453)	880 (0.1777)	-	1356 (0.1629)	1658 (0.1324), 1827 (0.1189)	2115 (0.0835)	2355 (0.0540) 2500 (0.0336)
GAL7	400 (0.1702) 450 (0.2078)	967 (0.3567)	1122 (0.3575)	-	1708 (0.3883) 1829 (0.3793)	2118 (0.3407)	2383 (0.2477) 2500 (0.1599)
GUA1	400 (0.1037) 454 (0.1103) 606 (0.1238)		1100 (0.0900)	1338 (0.0931)	1708 (0.0921) 1832 (0.0902)	2123 (0.0879)	2365 (0.0788) 2500 (0.0612)
GUA2	400 (0.1031) 455 (0.1084) 502 (0.1120) 604 (0.1608)	809 (0.1937) 867 (0.1916) 899 (0.1916)	1277 (0.2040)	1347 (0.2016)	1705 (0.1964) 1830 (0.1894)	2124 (0.1680)	2364 (0.1287) 2500 (0.0877)
GUA3	400 (0.1663) 454 (0.1818) 605 (0.2327)	-	1278 (0.3058)	-	1655 (0.2670) 1827 (0.2466)	2123 (0.1879)	2365 (0.1308) 2500 (0.0772)
GUA4	400 (0.2381) 455 (0.2669) 604 (0.3682)	-	-	1319 (0.5217)	1708 (0.5239) 1830 (0.5131)	2123 (0.4906)	2381 (0.4118) 2500 (0.2968)

LGAI	400 (0.0396) 453 (0.0378) 500 (0.0375)	908 (0.0281) 939 (0.0280) 998 (0.0271)	-	-	-	-	2332 (0.0291) 2366 (0.0295) 2500 (0.0273)
LGA2	400 (0.0699) 452 (0.0689) 608 (0.0616)	904 (0.0508) 939 (0.0502) 997 (0.0494)	-	1366 (0.0503)	1718 (0.0521) 1834 (0.0526)	2131 (0.0549)	2368 (0.0531) 2500 (0.0469)
LGA3	400 (0.0648) 452 (0.0707) 608 (0.0909)	716 (0.0924) 939 (0.0873) 990 (0.0869)	-	1374 (0.0906)	1781 (0.0912) 1831 (0.0912)	2131 (0.0932)	2361 (0.0879) 2500 (0.0764)
LGA4	400 (0.1158) 453 (0.1301) 607 (0.1531)	938 (0.1404) 991 (0.1380)	-	1376 (0.1263)	1720 (0.1188) 1831 (0.1154)	2123 (0.1123)	2371 (0.1027) 2500 (0.0901)
LGA5	400 (0.0708) 458 (0.0845) 608 (0.1282)		-	1362 (0.1673)	1712 (0.1692) 1830 (0.1678)	2125 (0.1656)	2355 (0.1504) 2500 (0.1242)
LPE1	400 (0.1448) 451 (0.1505) 599 (0.1736) 761 (0.1924)	970 (0.1909) 991 (0.1925)	1123 (0.2003)	-	1668 (0.1356) 1832 (0.1215)	2115 (0.0875)	2248 (0.0634) 2356 (0.0662) 2500 (0.0558)
LPE2	400 (0.0807)	-	1150 (0.2288) 1227 (0.2347)	-	1667 (0.1586) 1832 (0.1375)	2113 (0.0876)	2251 (0.0373) 2369 (0.0440) 2500 (0.0242)
MAL1	400 (0.0818) 603 (0.1457)	-	1285 (0.1541)	1363 (0.1519)	1709 (0.1513) 1830 (0.1458)	2121 (0.1279)	2322 (0.0956) 2351 (0.0958) 2500 (0.0643)
MAL2	400 (0.0840) 455 (0.0991) 602 (0.1458) 778 (0.1568)	906 (0.1416)	-	1376 (0.2098)	-	2125 (0.2428)	2290 (0.1918) 2364 (0.1705) 2500 (0.1482)
MAL3	400 (0.1554)	-	1280 (0.2777)	-	1707 (0.2383) 1835 (0.2111)	2118 (0.1648)	2366 (0.1102) 2500 (0.0629)
MAL4	400 (0.1756) 603 (0.2796)	-	1280 (0.3953)	1363 (0.3919)	1685 (0.3817) 1834 (0.3551)	2119 (0.3186)	2374 (0.2475) 2500 (0.1710)

MAL5	400 (0.2939) 454 (0.3427) 603 (0.4826) 790 (0.5774)	914 (0.5918)	1293 (0.6566)	-	1706 (0.6266) 1831 (0.6060)	2123 (0.5582)	2356 (0.4816) 2500 (0.3605)
PLM1	400 (0.0455) 452 (0.0425) 602 (0.0343)	993 (0.0244)	1054 (0.0234)	1383 (0.0252)	1724 (0.0267) 1852 (0.0266)	2135 (0.0287)	2379 (0.0288) 2500 (0.0265)
PLM2	400 (0.0514) 452 (0.0534) 602 (0.0507)	-	-	1374 (0.0459)	1714 (0.0462) 1803 (0.0457)	2122 (0.0426)	2347 (0.0395) 2500 (0.0335)
PLM3	400 (0.1153) 452 (0.1213)	-	-	1374 (0.0757)	1709 (0.0710)	2126 (0.0676)	2324 (0.0605) 2500 (0.0525)
PZE1	400 (0.1250)	751 (0.1353) 992 (0.1353)	1290 (0.1402)	-	1686 (0.1167) 1833 (0.1067)	2114 (0.0817)	2355 (0.0573) 2500 (0.0407)
PZE2	400 (0.1560) 456 (0.1684) 485 (0.1665) 612 (0.1876)	810 (0.2101) 970 (0.2033)	1097 (0.2055)	-	-	2110 (0.0743)	2355 (0.0451) 2500 (0.0250)
PZE3	400 (0.1473)	959 (0.3082)	1085 (0.3301)	-	1648 (0.2462)	2117 (0.1559)	2369 (0.1004) 2500 (0.0613)
REC1	400 (0.0812) 452 (0.0831) 551 (0.0838) 601 (0.0822)	-	-	1369 (0.0573) 1380 (0.0569)	-	2126 (0.0542)	2357 (0.0503) 2500 (0.0432)
REC2	400 (0.0942) 456 (0.1049) 605 (0.1254)	-	-	1366 (0.0966)	1831 (0.0944)	2125 (0.0925)	2368 (0.0855) 2500 (0.0755)
REC3	400 (0.1041) 456 (0.1303) 607 (0.1886)	750 (0.1941) 971 (0.1894)	-	1372 (0.1875)	1831 (0.1940)	2128 (0.1975)	2371 (0.1842) 2500 (0.1555)

Tabla 3.- Longitudes de onda máximas (picos) y mínimas (valles) para la reflectancia en el visible e infrarrojo cercano de cada espectrofácies dentro de cada cante-
ra. También se indican los valores inicial (400 nm) y final (2500) de cada espectrofácies. Los datos entre paréntesis corresponden a los valores de reflectancia. Siglas
como se describen en la tabla 1.

4.5. Comparación de las diferentes espectrofacies dentro de cada cantera

Las espectrofacies de cada cantera se han comparado mediante un nuevo análisis de conglomerados cuyos resultados agrupan las 58 espectrofacies en tres grandes bloques (Fig. 6). El primero (bloque A) agrupa las espectrofacies con alta reflectancia de las canteras MAL

(espectrofacies 1 a 5), GUA (espectrofacies 2 a 4) y ALC (espectrofacies 2 a 6). El bloque C está formado por espectrofacies con muy poca reflectancia y que corresponden principalmente a las espectrofacies bajo el número 1 de las canteras de las figuras 5a y 5b. El tercer bloque B reúne las espectrofacies de las canteras con reflectancia media.

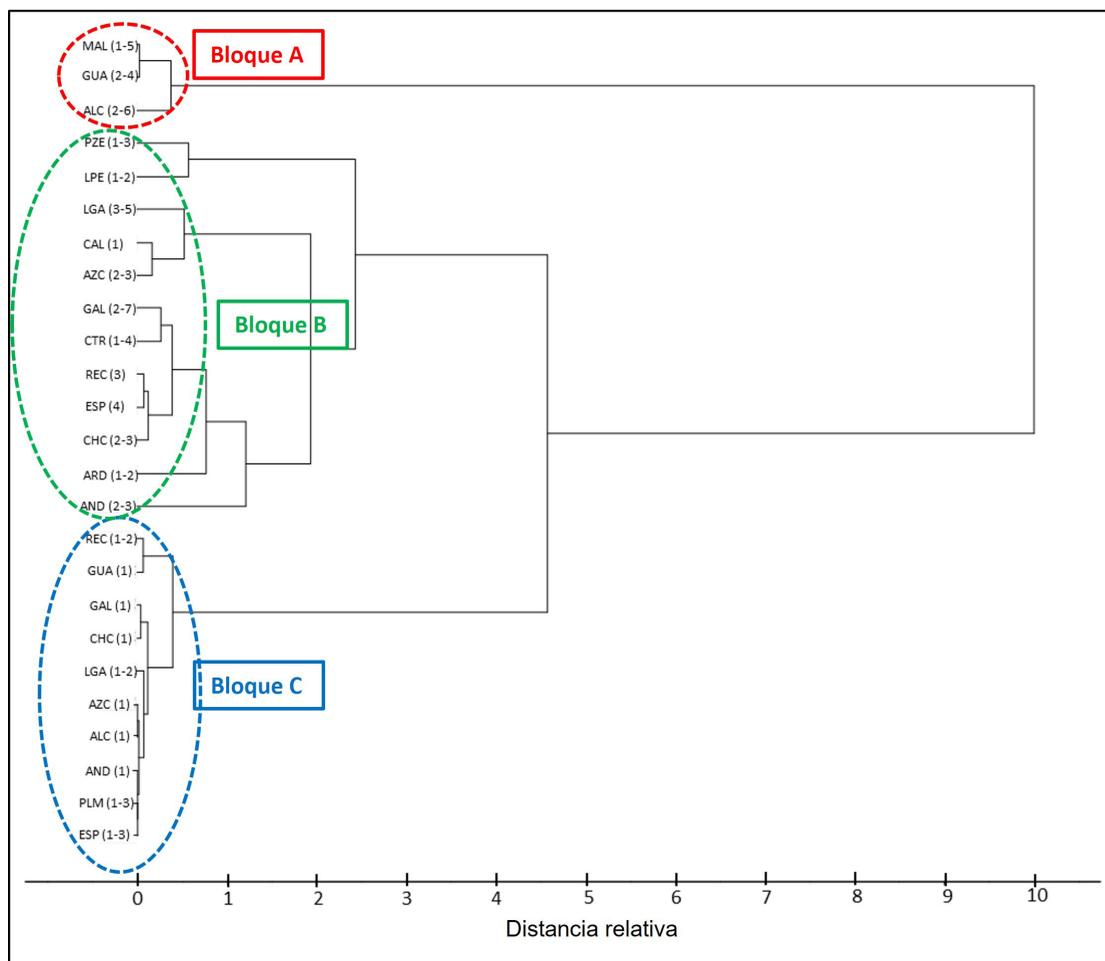


Figura 6.- Dendrograma obtenido para todas las espectrofacies dentro de cada cantera. Las siglas se describen en la tabla 1. Método del vecino más próximo y distancias euclídeas al cuadrado.

4.6 Absorción por agua y OHs

Para el diagnóstico de minerales, el agua (H_2O) y los iones OH (hidroxilos) tienen especial relevancia, ya que el agua y los sobretonos de OHs ligados pueden detectarse en sus espectros de reflectancia (Schmidt *et al.* 2013). El primer sobretono debido a los OH de un mineral aparece aproximadamente a 1400 nm e indica los enlaces -OH con diferentes iones, siendo con mayor frecuencia para el sílex Si-OH, Al-OH, Fe-OH o Mg-OH, o una mezcla de ellos (Mg^{3+}

a 1392 nm, Mg_2Fe a 1398 nm, $MgFe_2$ a aproximadamente 1404 nm y Fe^{3+} aproximadamente a 1412 nm (Clark *et al.* 1990).

Un segundo sobretono, debido a la combinación de agua e hidroxilos (-OH), aparece alrededor de 1900 nm y caracteriza el agua. Para el sílex, esta agua siempre está incluida o atrapada en la malla cristalina del cristal receptor e indica que la cristalización tuvo lugar en presencia de una fase acuosa importante. Las rocas sin tales inclusiones acuosas son en su mayoría rocas metamórficas formadas a

alta temperatura y alta presión, o bien rocas magmáticas.

Un tercer sobretono se localiza alrededor de 2400 nm y en el caso del sílex también a aproximadamente 2200 nm. Por lo tanto, un mineral cuya firma espectral tenga una banda de absorción a 1900 nm contiene agua, pero si solo aparece una banda a 1400 nm sin ninguna a 1900 o 2400 nm es que solo contiene iones hidroxilo. El ion hidroxilo tiene sólo una frecuencia de vibración, y la posición de su longitud de onda depende del ion al que está unido, por lo que diagnostica muy bien si hay ciertos iones en el mineral estudiado. Además, el ion OH aparece con bastante frecuencia en múltiples zonas cristalográficas de un mineral específico, y típicamente se une a iones metálicos. Por lo tanto, puede haber más de un sobretono ligado a OH en el mismo mineral. Tiene particular interés para fines de diagnóstico la vibración de los OH unidos a metales en la banda de 2200 a 2300 nm (Clark 1999).

La tabla 4 muestra las longitudes de onda y los valores de reflectancia para la absorción de agua en cada espectrofacies dentro de cada cantera. En todas las muestras analizadas de las canteras andaluzas, el primer sobretono para iones OH se sitúa entre 1396 y 1439 nm, con valores de reflectancia que varían entre 0.0251 y 0.5783. Es de notar que no aparecieron absorciones significativas para el primer sobretono en las espectrofacies ALC1, AND1 AND3, AZC1 y ESP1, que están entre las de reflectancia más baja (tablas 3 y 4). El segundo sobretono debido a la combinación de agua y OHs aparece entre 1911 y 1957 nm, siendo los valores de reflectancia de 0.0258 y 0.4293, respectivamente. Para este segundo sobretono no ha aparecido ninguna espectrofacies sin absorción. Las espectrofacies estudiadas presentan el tercer sobretono entre 2208 y 2261 nm, con valores de reflectancia que varían entre 0.0314 y 0.4505. Tampoco aparece absorción para este tercer sobretono en las espectrofacies ALC3, ALC4, ALC5, ALC6, GAL4, GAL5, GAL6, GAL7 y GUA4, en general, de reflectancia media a alta.

El contenido de H₂O y la relación H₂O/OH presente en los materiales ricos en sílice tienen efectos significativos en sus espectros VIS-NIR. Típicamente, el sílex contiene 0,5–0,8% en peso de SiOH y 0,3–0,6% en peso de H₂O, fuertemente retenida en inclusiones líquidas, anfractuosidades de los cristales y bordes de los granos cristalinos (Schmidt *et al.* 2013). La posición de la absorción por OHs alrededor de

1.400 nm y la simetría de la absorción *circa* 1.900 nm se pueden utilizar para discernir entre varias formas de materiales ricos en sílice. La relación ~1.900 nm (H₂O) y ~2.200 nm (Si-OH), junto con la intensidad de la absorción por -OHs, permiten distinguir entre las fases de sílice ópalo-A vs. ópalo-CT, así como las condiciones de formación (temperatura baja vs. alta). Por lo tanto, estas bandas caracterizan la tipología de los sílex en Andalucía en función de sus procesos diagenéticos.

Dado que la absorción por agua y OHs tiene un indudable valor diagnóstico, en la tabla 5 se presentan las longitudes de onda y los correspondientes valores de reflectancia para el promedio de cada cantera. CAL presenta el primer sobretono a 1396 nm extendiéndose hasta 1430 nm en REC, con reflectancias que oscilan entre el valor mínimo de 0.0476 en PLM (la cantera de menor reflectancia promedio) hasta 0.2878 en MAL (la cantera con mayor reflectancia promedio). El segundo sobretono debido al agua y OHs se presenta entre 1918 nm para CAL y 1929 nm para AZC, con reflectancias que oscilan entre 0.0411 para PLM y 0.2087 para MAL. El tercer sobretono aparece entre 2218 nm para la cantera AND y 2252 nm para ALC, con reflectancias que oscilan entre 0.0418 en PLM y 0.2222 en ARD. Al objeto de comparar las reflectancias para el promedio de las canteras respecto a la absorción de agua y OHs, se ha realizado un análisis de clúster para las longitudes de onda de 1400, 1900 y 2200 nm por separado, así como para el conjunto de las tres longitudes de onda (Fig. 7). Para el primer y segundo sobretonos (Fig. 7a y b) aparecen dos grandes enjambres que tienden a agruparse en función de sus valores de reflectancia alta, media y baja, en forma similar a la agrupación de la figura 3. De nuevo, PLM se diferencia claramente del resto debido a su valor mínimo de reflectancia para este sobretono y para todo el espectro analizado, tal como se ha comentado. Para el tercer sobretono (Fig. 7c) aparece una mayor diversidad de enjambres, agrupándose claramente algunas canteras tales como AND y CAL por tratarse de riolitas pertenecientes a la faja pirítica de Huelva o por sus elevados valores de reflectancia como MAL y ARD. En el análisis conjunto para la reflectancia de los tres sobretonos (Fig. 7d), además de los mencionados aparecen ahora agrupados ALC y GUA, así como ARD y MAL, canteras también con reflectancia media muy alta (Figs. 3 y 4), separándose de nuevo PLM.

Tabla 4.

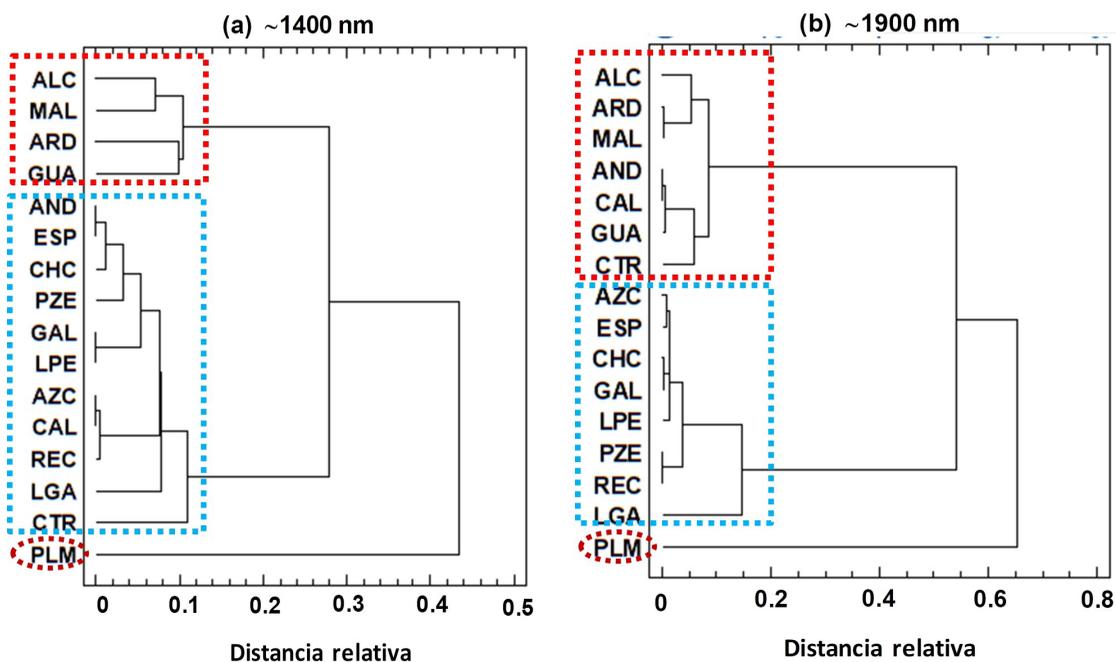
Espectrofrecuencias	Longitud de onda (nm)			Spectrofrecuencias	Longitud de onda (nm)		
	~ 1400 nm	~ 1900 nm	~ 2200 nm		~ 1400 nm	~ 1900 nm	~ 2200 nm
AIC 1	-	1926 (0.0456)	2249 (0.0464)	GAL 4	1433 (0.1671)	1926 (0.1343)	-
AIC 2	1429 (0.1111)	1925 (0.0597)	2254 (0.0715)	GAL 5	1431 (0.2075)	1925 (0.1159)	-
AIC 3	1429 (0.1875)	1925 (0.1021)	-	GAL 6	1421 (0.2068)	1920 (0.1496)	-
AIC 4	1428 (0.2636)	1925 (0.1827)	-	GAL 7	1420 (0.3197)	1920 (0.2348)	-
AIC 5	1427 (0.3797)	1926 (0.2912)	-	GUA 1	1425 (0.0867)	1922 (0.0698)	2233 (0.0737)
AIC 6	1431 (0.4887)	1926 (0.3415)	-	GUA 2	1427 (0.1660)	1922(0.1095)	2240 (0.1246)
AND 1	-	1954 (0.0409)	2237 (0.0405)	GUA 3	1431 (0.2701)	1924 (0.1523)	2254 (0.1785)
AND 2	1407 (0.1425)	1917 (0.2055)	2208 (0.1309)	GUA 4	1425 (0.4710)	1922 (0.3746)	-
AND 3	-	1911 (0.2930)	2209 (0.3176)	LGA 1	1425 (0.0250)	1926 (0.0258)	2228 (0.0279)
ARD 1	1427 (0.1358)	1922 (0.1167)	2237 (0.1226)	LGA 2	1421 (0.0498)	1924 (0.0479)	2235 (0.0509)
ARD 2	1421 (0.3192)	1920 (0.2966)	2226 (0.3218)	LGA 3	1425 (0.0888)	1925 (0.0826)	2234 (0.0844)
AZC 1	-	1957 (0.0512)	2233 (0.0502)	LGA 4	1431 (0.1329)	1931 (0.1055)	2251 (0.1013)
AZC 2	1408 (0.1144)	1917 (0.1206)	2258 (0.1149)	LGA 5	1427 (0.1622)	1924 (0.1419)	2250 (0.1461)
AZC 3	1407 (0.1158)	1914 (0.1737)	2258 (0.1579)	LPE 1	1429 (0.1001)	1925 (0.0631)	2251 (0.0634)
CAL 1	1396 (0.1149)	1918 (0.1810)	2261 (0.1555)	LPE 2	1427 (0.0927)	1924 (0.0339)	2250 (0.0373)
CHC 1	1429 (0.0592)	1923 (0.0538)	2233 (0.0547)	MAL 1	1426 (0.1265)	1922 (0.0830)	2240 (0.0914)
CHC 2	1429 (0.1225)	1924 (0.1025)	2243 (0.1044)	MAL 2	1410 (0.2019)	1923 (0.2037)	2259 (0.1869)
CHC 3	1424 (0.2189)	1924 (0.2120)	2231 (0.2221)	MAL 3	1429 (0.1917)	1926 (0.0945)	2252 (0.1045)
CTR 1	1424 (0.0978)	1924 (0.0842)	2237 (0.0879)	MAL 4	1427 (0.3404)	1924 (0.2331)	2244 (0.2485)
CTR 2	1425 (0.2052)	1922 (0.1869)	2240 (0.1955)	MAL 5	1427 (0.5783)	1925 (0.4293)	2239 (0.4505)
CTR 3	1429 (0.1932)	1922 (0.1458)	2235 (0.1565)	PLM 1	1410 (0.0251)	1920 (0.0251)	2221 (0.0271)
CTR 4	1430 (0.2726)	1924 (0.2442)	2239 (0.2420)	PLM 2	1427 (0.0449)	1924 (0.0375)	2239 (0.0381)
ESP 1	-	1923 (0.0509)	2227 (0.0540)	PLM 3	1435 (0.0729)	1925 (0.0606)	2239 (0.0602)
ESP 2	1426 (0.0400)	1923 (0.0325)	2230 (0.0324)	PZE 1	1427 (0.0909)	1924 (0.0523)	2243 (0.0518)
ESP 3	1426 (0.1073)	1925 (0.0993)	2242 (0.0991)	PZE 2	1427 (0.1798)	1923 (0.1590)	2242 (0.1764)
ESP 4	1424 (0.2750)	1922 (0.2564)	2238 (0.2714)	PZE 3	1429 (0.1932)	1925 (0.0917)	2252 (0.0931)
GAL 1	1428 (0.0614)	1923 (0.0417)	2243 (0.0450)	REC 1	1439 (0.0547)	1926 (0.0473)	2241 (0.0484)
GAL 2	1429 (0.1069)	1924 (0.0488)	2238 (0.1585)	REC 2	1437 (0.0960)	1927 (0.0849)	2243 (0.0834)
GAL 3	1429 (0.1219)	1923 (0.0761)	2238 (0.0805)	REC 3	1426 (0.1802)	1925 (0.1665)	2244 (0.1756)

Tabla 4.- Longitudes de onda para absorción de agua y OHs en cada espectrofrecuencias dentro de cada cantera. Los valores entre paréntesis corresponden al valor de reflectancia. Siglas como se describen en la tabla 1.

Tabla 5.

Yacimiento	Longitud de onda (nm) y reflectancia		
	~ 1400 nm	~ 1900 nm	~2200 nm
ALC	1429 (0.2699)	1926 (0.1954)	2252 (0.0590)
AND	1407 (0.1425)	19276 (0.1798)	2218 (0.1630)
ARD	1424 (0.2275)	1921 (0.2067)	2232 (0.2222)
AZC	1408 (0.1151)	1929 (0.1152)	2250 (0.1077)
CAL	1396 (0.1149)	1918 (0.1810)	2261 (0.1555)
CHC	1427 (0.1336)	1924 (0.1228)	2236 (0.0796)
CTR	1427 (0.1922)	1923 (0.1647)	2238 (0.1980)
ESP	1425 (0.1408)	1923 (0.1106)	2234 (0.1142)
GAL	1427 (0.1702)	1923 (0.11209)	2240 (0.0628)
GUA	1426 (0.2485)	1922 (0.1766)	2242 (0.1256)
LGA	1426 (0.0917)	1926 (0.0807)	2240 (0.0821)
LPE	1426 (0.0965)	1924 (0.0484)	2241 (0.0505)
MAL	1424 (0.2878)	1924 (0.2087)	2247 (0.2164)
PLM	1424 (0.0476)	1923 (0.0411)	2233 (0.0418)
PZE	1428 (0.1546)	1924 (0.1010)	2246 (0.1071)
REC	1430 (0.1103)	1926 (0.0996)	2243 (0.1025)

Tabla 5.- Longitudes de onda para absorción de agua y OHs para el promedio de cada cantera. Los valores entre paréntesis corresponden al valor de reflectancia. Siglas como se describen en la tabla 1.



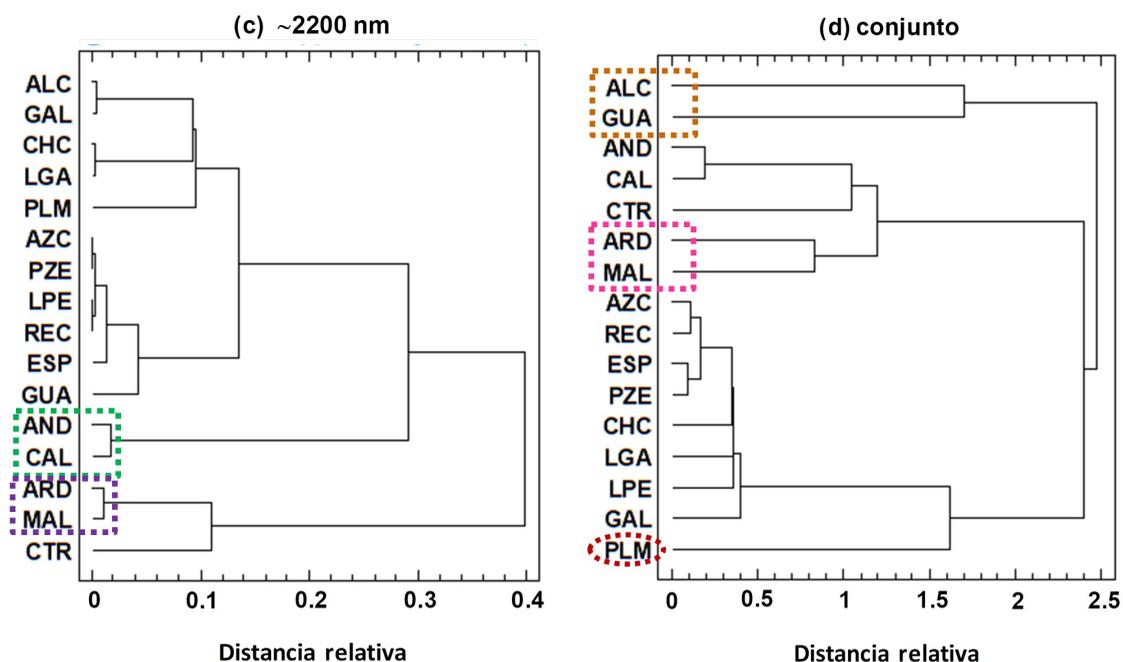


Figura 7.- Dendrograma para los valores de reflectancia para las longitudes de onda de absorción de OHs (a), combinación de agua e hidroxilos (b), agua (c) y conjunto de las tres absorciones (d). Siglas como en la tabla 1. Método del vecino más próximo y distancias euclídeas al cuadrado

Como estas variaciones en reflectancia causadas por la absorción de agua y OHs indican diferencias en la diagénesis de las canteras de sílex estudiadas, junto con los valores de picos y valles, pueden usarse con fines diagnósticos en la identificación y clasificación de materiales silíceos de la región andaluza. Compárese con la figura 4 y con la discusión bajo el apartado de análisis de componentes principales para el conjunto de canteras.

4.7. Identificación del posible origen de 15 puntas de flecha de la necrópolis megalítica de Gorafe.

La necrópolis de Gorafe, situada en el noreste de la provincia de Granada (Fig. 1), constituye uno de los complejos megalíticos más relevantes, no sólo de la Península Ibérica, sino del resto de Europa por su extraordinaria concentración de sepulturas. Esta necrópolis es conocida desde antiguo y aparece ya reseñada en algunas de las obras pioneras de la arqueología prehistórica andaluza (Góngora y Martínez 1868),

Para averiguar la posible relación entre la procedencia del sílex de las 15 puntas de flecha y las canteras caracterizadas en este trabajo, se ha efectuado un análisis de clúster mediante el método del vecino más próximo y distancias

euclídeas al cuadrado para la firma espectral obtenida para cada punta de flecha y las firmas espectrales medias de las 16 canteras de sílex (Fig. 8). El dendrograma indica que las firmas espectrales de las puntas de flecha CE07703, CE07692, CE05902, CE07693, CE13535, CE13533, CE08485, CE07732, CE0727 y CE05914 no se relacionan con las pertenecientes a ninguno de los aprovisionamientos de sílex caracterizados en este trabajo. Por el contrario, las firmas espectrales de las flechas CE07698, CE05913, CE05907, CE13529 y CE5920 sí que se relacionan con algunas de las canteras andaluzas de sílex (Fig. 8). CE07698 está en un subclúster relacionada con las canteras ARD, GUA y ALC; CE05913 y CE05907 aparecen muy relacionadas con la cantera MAL; CE13529 con GAL y CE05920 con LPE. Asimismo, el dendrograma permite deducir que la espectrorradiometría de ninguna de ellas se relaciona con las canteras CAL, AND, LGA, AZC, CHC, REC y ESP.

Una vez identificada la similitud de los espectros de cada punta de flecha con la media de cada cantera, se realizaron los correspondientes análisis de clúster para tratar de identificar la espectrofacies concreta de origen de cada una de las canteras (dendrogramas no mostrados). Las espectrofacies que se presen-

tan en la figura 9 son las más probables para la talla de estas cinco puntas de flecha. Para mejor describir a qué espectrofacies se adscribe estadísticamente la similitud de dos firmas espectrales, uno de los métodos más utilizados (Varmuza *et al.* 2003; Willemse-Erix *et al.* 2009; Parish 2011; Craig *et al.* 2013) consiste en calcular el coeficiente de determinación de Pearson (R^2) entre los 2.151 datos de reflectancia de las dos firmas espectrales objeto de estudio. En nuestro análisis, y dado que las firmas espectrales proporcionan curvas polinómicas, se han calculado los coeficientes de determinación para una regresión polinómica de grado 5 para las firmas espectrales de cada espectrofacies en relación con la punta de flecha cuyo origen se pretendía establecer. El coeficiente R^2 indica en porcentaje (Steel y Torrie 1980) el grado de concordancia entre los datos de cada pareja de espectros. Su valor se ha incluido en las gráficas de las figuras 9 y 10. Los resultados del dendrograma y el análisis de regresión indican que CE07698 se correlaciona con GUA3 en un 97,14 % (Fig. 9a), así como CE05907 con MAL4 en el 98,22% y CE05913 también con MAL4 en un 90,85% (figura 9b). A su vez, estas dos puntas de flecha CE05907 y CE05913 están relacionadas entre sí en un 90,54% (Figura 9b). Análogamente, del correspondiente dendrograma y análisis de regresión se deriva que CE05920 está relacionada con LPE1 en un 94,06% (Figura 9c) y CE1359 con GAL4 en un 90,13% (Figura 9d). Puede deducirse, por tanto, que muy probablemente, estas cinco puntas de flecha han sido talladas a partir de estas canteras andaluzas de sílex.

Dada la estrecha similitud en el dendrograma de la figura 8 de algunas de las parejas de puntas de flecha no relacionadas con las canteras de sílex estudiadas, se han calculado una serie de regresiones polinómicas para ellas, cuyos resultados, junto con las firmas espectrales correspondientes, se presentan en la Figura 10. Se comprueba que la pareja de flechas CE05902 y CE07692 se encuentra muy estrechamente relacionada (98,42%, Fig. 10a). Ambas puntas de flecha proceden de sepulcros muy cercanos en la zona de Las Majadillas (Tabla 2), por lo que muy probablemente estas dos puntas de flecha fueron talladas desde un mismo nódulo de sílex procedente de la misma cantera. Este mismo subclúster agrupa también la punta de flecha CE07703 (Figura 8), pero su relación espectrorradiométrica con las dos anteriores

es mucho más débil (48,92%, Fig.10a) por lo que probablemente fue tallada a partir de sílex de otra cantera, aunque presente cierta relación con la cantera anterior. Igualmente, las puntas de flecha CE08485, CE13535, CE23533, CE07732 y CE07727, que se integran en un mismo subclúster de la figura 8, están muy estrechamente relacionadas: los R^2 oscilan entre 99,52 y 86,49% (Fig.10b). En las fotografías de la tabla 2 se observa que su tipología y color son muy similares, aunque CE13535 es de tipo más ojival con base cóncava y CE07727 foliácea simétrica. Es importante resaltar que según describen García Sánchez y Spanhi (1959: 56), las puntas de flecha CE07732 y CE013533 se exhumaron del mismo sepulcro número 84 en la zona de Las Majadillas (Tabla 2). Por tanto, puede concluirse del estudio mediante análisis de clúster y de regresión que muy probablemente el sílex en el que estas cinco puntas de flecha fueron talladas procede del mismo lugar de aprovisionamiento. Los valores de R^2 de las flechas CE07693 y CE05914 respecto a las demás oscilan entre el 31,05% y 70,74% (gráficas no mostradas), por lo que probablemente procedan de canteras de sílex bastante más diferentes que el resto.

5. Discusión

El estudio y caracterización de piezas arqueológicas de sílex se ha realizado tradicionalmente en los campos de la etno-arqueología, tipología, geología, mineralogía, experimentación y arqueología social. En especial, el análisis petrológico de artefactos de sílex es una metodología importante y necesaria para demostrar su valor extraordinario para la comprensión del funcionamiento de las sociedades neolíticas. De hecho, el propósito de cualquier análisis arqueológico de abastecimiento lítico es asignar artefactos de sílex a sus fuentes de origen, para comprender mejor el desplazamiento de dichos artefactos, las redes de intercambio de materiales, los patrones de movilidad y varios procesos culturales (v.g., comercio, estrategias de adquisición, límites territoriales, etc.).

En este trabajo se han caracterizado espectrorradiométricamente 58 espectrofacies de muestras de sílex obtenidas en 16 de las canteras más importantes del sur de España, identificando también los máximos (picos) y mínimos (valles) de reflectancia más relevantes para cada una de ellas, así como la presencia o ausencia de

agua y iones OH. El análisis multivariante a través de componentes principales y el análisis de clúster, han permitido agrupar las canteras en conjuntos de reflectancia alta, media, baja y muy baja, ofreciendo así una buena aproximación a su clasificación general. Posteriormente, la apli-

cación de este análisis a las diferentes espectrofácies de cada cantera ha permitido obtener un catálogo detallado de reflectancias máximas y mínimas que puede utilizarse para la identificación de cualquier material desconocido obtenido en cualquiera de las 16 canteras analizadas.

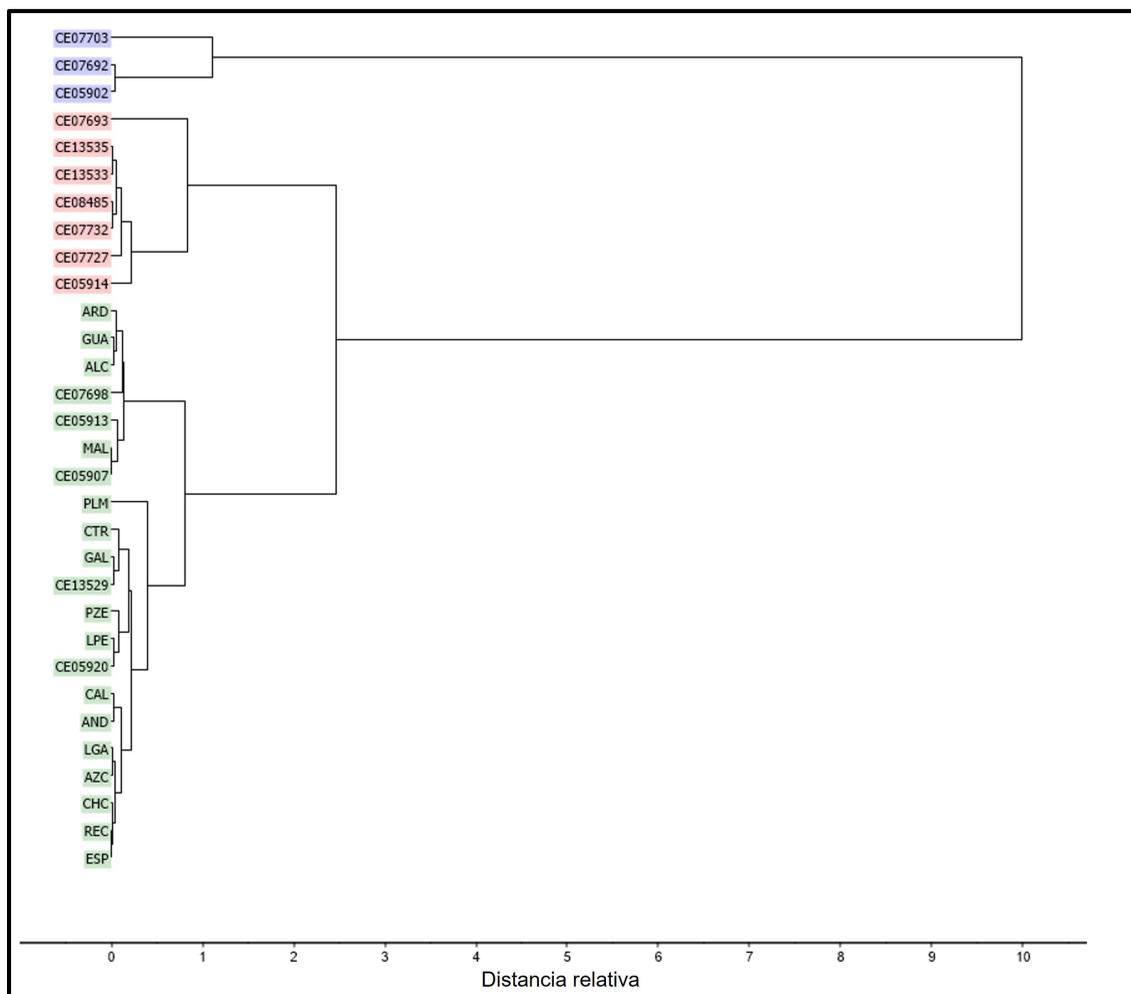


Figura 8.- Análisis de clúster mediante el método del vecino más próximo y distancias euclídeas al cuadrado para la firma espectral obtenida para cada punta de flecha y las firmas espectrales medias de las 16 canteras de sílex. El análisis se ha realizado sobre los 2.151 datos de reflectancia de cada una de las firmas espectrales.

En efecto, las espectrofácies en la tabla 3 y las figuras 5 y 6 pueden permitir la identificación de una muestra desconocida como perteneciente a una cantera particular. Ello facilita el conocimiento de la procedencia de los artefactos líticos depositados en museos y colecciones sin la necesidad de tomar muestras destructivas. Esta comparación sería posible a partir de los valores de reflectancia de una muestra en la que se identifiquen los picos y valles más representativos, así como los cau-

sados por la absorción de agua y OHs. A continuación, estos valores relevantes de reflectancia pueden correlacionarse estadísticamente (por análisis de clúster, correlación de Pearson o por otro método estadístico) con los valores de picos y valles de las tablas 3 y 4. También la comparación de las firmas espectrales de las curvas de las Fig. 5a y 5b con la firma de la pieza problema podría orientar acerca de un posible origen en una de las 58 espectrofácies descritas en este trabajo.

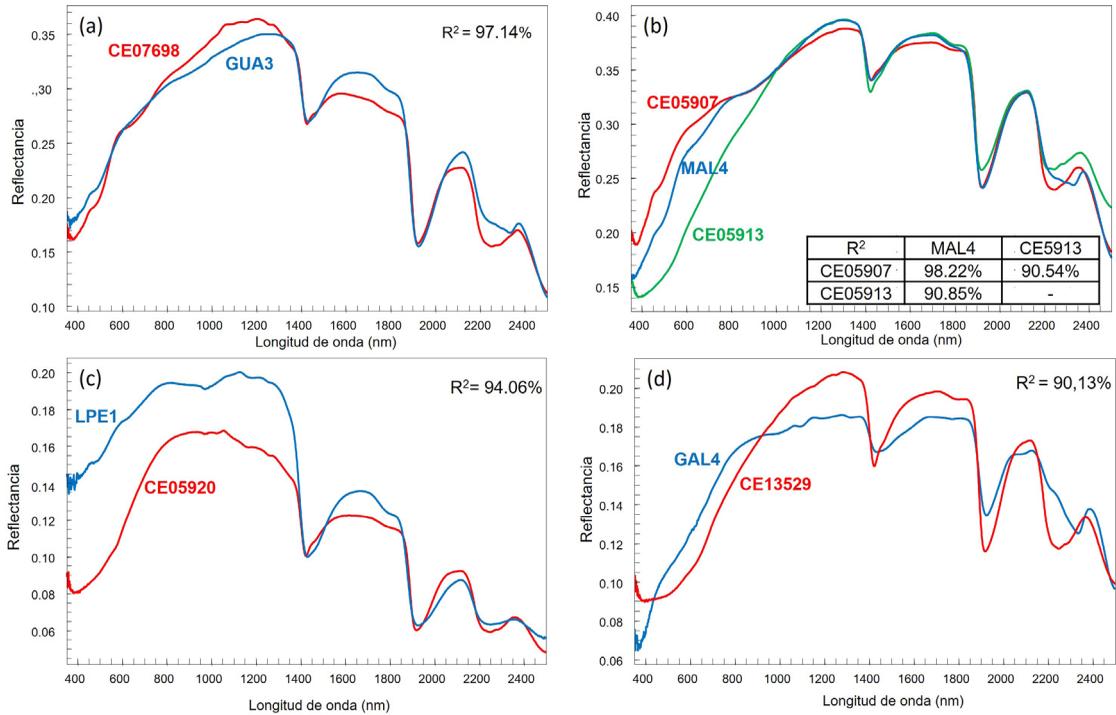


Figura 9.- Firmas espectrales de las 5 puntas de flecha CE07698, CE05907, CE05913, CE05920 y CE13529 con las de las probables canteras de sílex de las que proceden. El coeficiente R^2 indica el porcentaje de concordancia entre las curvas

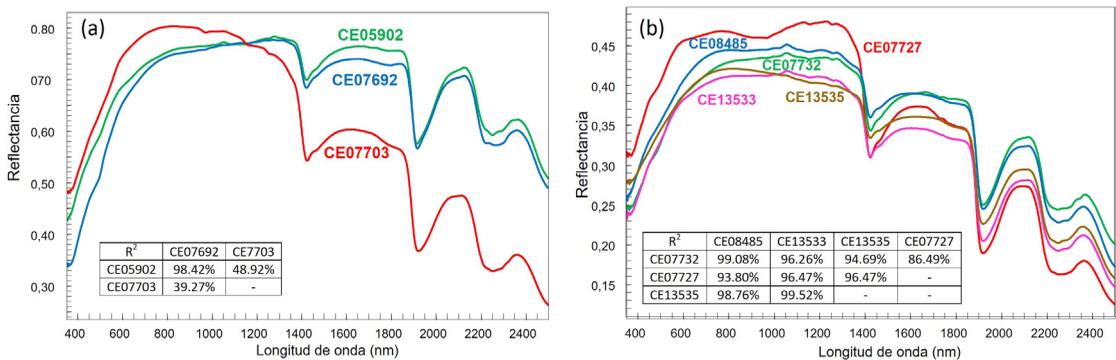


Figura 10.- Firmas espectrales de otras flechas no relacionadas con las canteras de sílex caracterizadas en este estudio mostrando las diversas relaciones entre ellas. El coeficiente R^2 indica el porcentaje de concordancia entre las curvas.

Aunque hay algunos estudios que han aplicado la reflectancia espectral o alguna de sus modalidades para la caracterización y el estudio del origen de sílex arqueológicos (Hubbard *et al.* 2005; Newlander y Lin 2017; Olivares *et al.* 2009; Parish 2011, 2016; Roldán *et al.* 2016; Ten Bruggencate *et al.* 2017) hasta nuestro conocimiento esta es la primera vez que se combinan conjuntamente la reflectancia espectral de fibra óptica con el análisis

de componentes principales y de clúster para estos propósitos.

FORS es una técnica analítica no destructiva, rápida, portátil y de bajo costo, una vez que el instrumento ha sido amortizado. Al igual que las identificaciones mediante el análisis petrográfico de lámina delgada o la difracción de rayos X, FORS requiere repositorios de sílex conocido o espectrotecas, que sirvan de referencia para la identificación de espectrofacies

particulares de material de origen desconocido. Desde 1999 (Parish 2016), esta técnica se ha utilizado con éxito en varios miles de objetos prehistóricos. Las ventajas del método son evidentes ya que la portabilidad del instrumento permite un análisis *in situ* y, por lo tanto, sin los riesgos involucrados en trasladar las piezas arqueológicas fuera del lugar de depósito y sin la necesidad de un seguro que cubra sus posibles deterioros durante el transporte.

Otra de las ventajas de FORS es que no requiere preparación previa de la muestra, bien sea la roca original o de un determinado artefacto de sílex. Además, como estos no son alterados ni contaminados por el uso de esta metodología de análisis, pueden ser sometidos a análisis adicionales por otras técnicas. Estos puntos son particularmente importantes para piezas de alto valor patrimonial depositadas en museos u otras instituciones. Para este propósito, un requisito fundamental es disponer de un catálogo (biblioteca espectral) lo más completo posible de firmas espectrales o espectrofácies de las canteras donde se sospecha que tales artefactos líticos podrían haber sido tallados. En la actualidad, están disponibles algunas grandes bibliotecas espectrales de origen de minerales como la Biblioteca Espectral USGS versión 7 (Kokalky *et al.* 2017) y el Laboratorio espectral ASTER (Jet Propulsion Laboratory 1999). Algunas bibliotecas comerciales también están disponibles, especialmente la Specminone (Hauff 1993).

6. Conclusiones

La aplicación de la metodología FORS ha podido adscribir un posible origen en las canteras de sílex de Andalucía a 5 puntas de flechas de un total de 15. Tres de ellas son de tipo triangular con base cóncava, una triangular con aletas y otra ojival de base cóncava. Además, se han podido identificar otras 7 como muy posiblemente procedentes de una misma cantera de sílex que difiere de las caracterizadas en este estudio, lo que indica la necesidad de ampliar las bases de datos de espectrofácies a un mayor número de canteras y áreas fuente en Andalucía. Las puntas foliáceas son típicas de la cultura almeriense, considerándose más antiguas y, por tanto, relacionadas con el periodo cultural de transición entre el Neolítico final y el Calcolítico inicial. Las puntas de base cóncava se relacionan con el periodo cultural

del Calcolítico inicial en el suroeste peninsular, sobre todo con yacimientos arqueológicos del territorio portugués. Las puntas de aletas y pedúnculo están relacionadas con el periodo cultural del Calcolítico pleno, sobre todo con la cultura de “Los Millares” del sureste peninsular y con las cuevas portuguesas (García Sánchez y Spanhi 1959; Delibes de Castro y Herrán-Martínez 2007). Las puntas de flecha de sílex encontradas en excavaciones arqueológicas suelen constituir un material muy heterogéneo, dada su confección relativamente fácil a partir de lascas obtenidas de núcleos destinados a cuchillos o láminas, así como a su facilidad de intercambio entre grupos humanos. De hecho, en las excavaciones de García Sánchez y Spahni en la necrópolis de Gorafe fueron exhumadas un total de 52 puntas, de las cuales el 55% fueron de base cóncava, el 25% de pedúnculo y aletas, el 13% romboidales, el 5% triangulares y solamente el 2% fueron puntas foliáceas (García Sánchez y Spahni 1959). Las flechas conservadas en el Museo de Granada y analizadas en este estudio son, por tanto, bastante representativas del conjunto. La necrópolis de Gorafe se encuentra a tan sólo 73 Kms en línea recta de Los Millares y está situada en una zona de gran tránsito entre el Levante y el sur peninsular, lo que podría explicar la variabilidad de tipos de puntas de flecha encontradas en su necrópolis.

Los resultados de este estudio confirman que la espectroscopia de reflectancia de fibra óptica (FORS) combinada con el análisis multivariante de las firmas espectrales VIS-NIR representa una herramienta poderosa y complementaria para la clasificación e identificación del sílex y otros materiales silíceos de los artefactos arqueológicos. Como ha sido descrito, la medida de cada firma espectral es muy rápida, de apenas unos pocos segundos, y sin necesidad de preparación de la muestra, por lo que puede obtenerse información de un elevado número de muestras en muy poco tiempo. Además, las espectrofácies definidas proporcionan una descripción exhaustiva de sus características espectrales y permiten la comparación con muestras del mismo o diferente origen, así como con piezas arqueológicas. Estas variaciones de los patrones de absorción son diagnósticas para diferentes tipos de rocas y caracterizan la tipología de los sílex y otras rocas silíceas de Andalucía en función de sus procesos diagenéticos. Concretamente, la reflectancia en las bandas de ~1.900 nm (H₂O)

y ~2.200 nm (Si-OH), junto con la intensidad de la absorción por -OHs, pueden permitir distinguir entre las fases de sílice ópalo-A vs. ópalo-CT y las condiciones de temperatura baja vs. temperatura alta durante la formación del material silíceo estudiado. Por lo tanto, estas bandas caracterizan la tipología de los sílex en Andalucía en función de sus procesos diagenéticos. Ello es importante para evaluar grandes yacimientos de sílex *in situ*, ya que otras técnicas como el análisis petroquímico están más limitadas en cuanto al volumen de muestra que se puede procesar (Bustillo *et al.*, 2009).

Para su aplicación a los problemas de identificación del origen de artefactos de sílex, sería fundamental, como se ha discutido, disponer de un catálogo (o espectroteca) lo más completo posible de espectroficies de yacimientos de sílex de la Península Ibérica. Los autores son conscientes de que el desarrollo de una espectroteca de firmas espectrales del sílex implica una serie de dificultades. En efecto, los datos espectrales de la espectroteca deben comprender tanto valores muy frecuentes, como manejar valores atípicos y estructuras de datos no usuales, para que el catálogo sea lo suficientemente completo. Como mínimo, las diferencias de color, brillo, pátina, inclusiones fósiles, translucidez o textura de la superficie, que se pueden de-

tecar visualmente en el material de origen, deben tenerse en cuenta antes de comenzar a construir una biblioteca espectral (Longhi *et al.* 2001; Hubbard *et al.* 2005; Parish 2011; Kokaly *et al.* 2017; Percival *et al.* 2018). Las tablas 3 y 4, sin embargo, proporcionan un número relevante de longitudes de onda y valores de reflectancia en cada una de las 58 espectroficies obtenidas, lo que constituye una buena aproximación para definir la composición espectral de las canteras y depósitos secundarios (terrazas fluviales y marinas, pies de monte, etc.), más utilizados para la elaboración de artefactos de sílex durante la Prehistoria reciente en Andalucía.

7. Agradecimientos

Al director D. Isidro Toro Moyano y a la restauradora D^a. María Belén Ruiz Ruiz, del Museo Arqueológico y Etnológico de Granada por las facilidades otorgadas para las medidas espectrorradiométricas de las puntas de flecha de Gorafe, así como a los evaluadores anónimos por sus útiles comentarios. Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, Proyecto 694 UN-GR15-CE-3531 y por el grupo de investigación AGR123 de la Junta de Andalucía.

8. Bibliografía

- Bustillo, M. A.; Castañeda, N.; Capote, M.; Consuegra, S. Criado, C.; Díaz-Del-Río, P.; Orozco, T.; Pérez-Jiménez, J.L. y Terradas, X. (2009): Is the macroscopic classification of flint useful? A petroarchaeological analysis and characterization of flint raw materials from the Iberian neolithic mine of Casa Montero. *Archaeometry*, 51 (2): 175-196. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00403.x>
- Capel Ferrón, C.; León-Reina, L.; Jorge-Villar, S.; Compañía, J.M.; Aranda, M.A.G.; López Navarrete, J.T.; Hernández, V.; Medianero, F.J.; Ramos, J.; Weniger, G.- C.; Domínguez-Bella, S.; Linstaedter, J.; Cantalejo, P., Espejo, M. y Durán Valsero, J.J. (2015): Combined Raman spectroscopic and Rietveld analyses as a useful and nondestructive approach to studying flint raw materials at prehistoric archaeological sites. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 7 (2): 235-243. <http://dx.doi.org/10.1007/s12520-014-0189-0>
- Chiari, R.; Ferrari, M.C.; Sgavetti, M.A. (1994): Spectral classification of the rocks as a preliminary procedure for the lithologic interpretation of remote sensing multispectral data". *Proceedings Volume 2320, Geology from Space, Satellite Remote Sensing, 1994, Rome, Italy*. <https://doi.org/10.1117/12.197298>.
- Church, T. (1994): *Lithic Resource Studies: A Source book for Archaeologists*. Lithic Technology, Special Publication 3, UNIVERS, John Wiley and Sons, New York.
- Ciberto, E.; Spoto, G. (2000): *Modern Analytical Methods in Art and Archaeology*. John Wiley and Sons, New York.
- Clark, R. N. (1999): Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. *Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences*, (A.N. Rencz, ed.), John Wiley and Sons, New York: 3- 58.

- Clark, R.N.; King, T.V.V.; Klejwa, M.; Swayze G.A.; Vergo N. (1990): High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. *Journal of Geophysical Research* 95: 12653-12680. <http://dx.doi.org/10.1029/JB095iB08p12653>
- Craig, A.P.; Franca, A.S.; Irudayaraj, J. (2013): Pattern Recognition Applied to Spectroscopy: Conventional Methods and Future Directions. *Pattern Recognition*, (D.B. Vincent, ed.), Nova Science Publishers, Hauppauge, Nueva York: 1-45.
- Delibes de Castro, G.; Herrán Martínez, J. I. (2007): *La Prehistoria*, Colección Biblioteca Básica de Valladolid, Diputación Provincial de Valladolid, Valladolid.
- Domínguez-Bella, S.; Morata, D. (1995): Aplicación de las técnicas mineralógicas y petrológicas a la arqueometría. Estudio de materiales del dolmen de Alberite (Villamartín, Cádiz). *Zephyrus* XLVIII: 129-142.
- Domínguez-Bella, S. (2008): Las materias primas minerales en los asentamientos de cazadores recolectores en la banda atlántica de Cádiz durante el pleistoceno superior. Geoarqueología, análisis mineralógico y petrológico, *La ocupación prehistórica de la Campiña Litoral y Banda Atlántica de Cádiz, Sevilla*, (J. Ramos, coord.), Arqueología Monografías, Junta de Andalucía: 127-145.
- Esbensen, K.H.; Swarbrick, B. (2018): *Multivariate Data Analysis*. 6th ed., CAMO software AS, Oslo, Norway.
- Fernández Eraso, J.; García-Rojas, M. (2013): Tipología Analítica. *Métodos y técnicas de análisis y estudio en Arqueología Prehistórica. De lo técnico a la reconstrucción de los grupos humanos*. (M. García-Díez, L. Zapata, eds.), Universidad del País Vasco: 470- 497.
- García Sánchez, M.; Spahni, J.C. (1959). Sepulcros megalíticos de la región de Gorafe (Granada), *Archivo Prehistórico Levantino*, VIII: 43-123.
- Góngora y Martínez, M. (1868): *Antigüedades Prehistóricas de Andalucía*, Imprenta a cargo de C. Moro, Madrid.
- Hauff, P.L. (1993): *Specmin Mineral Identification System and Spectral Library*, vols. 1 y 2: Arvada, Colorado, Spectral International, USA.
- Hernández, V.; Jorge-Villar, S.; Capel Ferrón, C.; Medianero, F.J.; Ramos, J.; Weniger, G.-C.; Domínguez-Bella, S.; Linstaedter, J.; Cantalejo, P.; Espejo, M.; Durán Valsero, J. J. (2012). Raman spectroscopy analysis of Palaeolithic industry from Guadalteba terrace river, Campillos (Guadalteba County, Southern of Iberian Peninsula). *Journal of Raman Spectroscopy* 43: 1651–1657. <http://dx.doi.org/10.1002/jrs.4104>
- Hubbard, M.J.; Waugh, D.A.; Ortiz, J.D. (2005): Provenance determination of archaeological flints by VIS/NIR diffuse reflectance spectrometry. *The Compass* 78: 119-129.
- Kokaly, R.F.; Clark, R.N.; Swayze, G.A.; Livo, K.E.; Hoefen, T.M.; Pearson, N.C.; Wise, R.A.; Benzel, W.M., Lowers, H.A.; Driscoll, R.L; Klein, A.J. (2017): *USGS Spectral Library Version 7.U.S.* Geological Survey Data Series 1035, 61 p.
- Linares, J.A.; Nocete, F.; Sáez, R. (1998): Aprovisionamiento compartido versus aprovisionamiento restringido: los casos de las canteras del III milenio a.n.e. del Andévalo (Huelva), *Rubricatum* 2: 177-184.
- Longhi, I.; Sgavetti, R.; Chiari, R. Mazzoli, C. (2001): Spectral analysis and classification of metamorphic rocks from laboratory reflectance spectra in the 0.4-2.5 μ m interval: a tool for hyperspectral data interpretation. *International Journal of Remote Sensing* 22: 3763-3782. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160010006980>
- Lozano, J.A.; Morgado, A.; Puga, E.; Martín-Algarra, A. (2010). Explotaciones del sílex tipo “Turón” (Málaga, España): localización y caracterización petrológica y geoquímica. *Geogaceta*: 163-166.
- Luedtke, B.E. (1979): The Identification of Sources of Flint Artifacts. *American Antiquity* 44: 744-757.
- Luedtke, B.E. (1992): *An Archaeologist's Guide to Flint and Flint Archaeological Research Tools*. Los Angeles: Institute of Archaeology, University of California.
- Mitjavila, J.; Martí, J.; Soriano, C. (1997): Magmatic evolution and tectonic setting of the Iberian Pyrite Belt volcanism. *Journal Petrology*, 38, 727-755.
- Morgado, A.; Lozano, J.A. (2014): Objetos de sílex, Marcadores litológicos de la Circulación. Geoarqueología de la Producción laminar Especializada del sur de Iberia (c. VI-V mil. Cal. BP). Movilidad, contacto y cambio, 2º Congreso de Prehistoria de Andalucía. Junta de Andalucía, Sevilla, 121-136.
- Morgado, A.; Pelegrin, J. ; Martínez Fernández, G. ; Afonso Marrero, J.A. (2008): La production des grandes lames dans la Péninsule Ibérique (IVe et IIIe millénaires), *Les industries lithiques taillées des IVe et IIIe millénaires en Europe occidentale*. (M.-H Dias-Meirinho, V Léa, K. Gernigon, P. Fouéré, F. Briois

- y M. Bailly, eds.), British Archaeological Reports, International Series 1884, Archaeopress, Oxford, 309-330.
- Morgado, A.; Lozano, J.A.; Pelegrin, J. (2011): Las explotaciones prehistóricas del sílex de la Formación Milanos (Granada, España). *Menga, Revista de Prehistoria de Andalucía* 2: 135-155 y 261-269.
- Navazo, M.; Colina, A.; Domínguez-Bella, S.; Benito, A. (2008): Raw stone material supply for Upper Pleistocene settlements in Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain): Flint characterization using petrographic and geochemical techniques. *Journal of Archaeological Science* 35: 1961-1973. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2007.12.009>
- Newlander, K.; Lin, Y. (2017): Integrating visual and chemical data to source flint artifacts in the North American Great Basin. *Journal of Archaeological Science-Reports* 11: 578-591. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.12.037>
- Nogales-Bueno, J.; Hernández-Hierro J.M.; Rodríguez-Pulido, F.J.; Heredia, F.J. (2014): Determination of technological maturity of grapes and total phenolic compounds of grape skins in red and white cultivars during ripening by near infrared hyperspectral image: a preliminary approach. *Food Chemistry* 152: 586–591. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.030>
- Ortega, D.; Terradas, X.; Roqué, C.; Ibáñez, J.; Beamud, E.; Larrasoña, J.C. (2016): Caracterización petrológica del sílex de la Formación Calizas de Montmaneu (Sector oriental de la Cuenca del Ebro). *Geogaceta* 60: 95-98.
- Olivares, M.; Tarrío, A.; Murelaga, X.; Baceta, J. I.; Castro, K.; Etxebarria, N. (2009): Non-destructive spectrometry methods to study the distribution of archaeological and geological chert samples. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 73: 492-497. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.12.036>
- Parish, R.M. (2011): The Application of Visible/Near-Infrared Reflectance (VNIR) Spectroscopy to Flint: A Case Study from the Dover Quarry Sites, Tennessee. *Geoarchaeology* 26: 420–439. <https://doi.org/10.1002/gea.20354>.
- Parish, R.M. (2016): Reflectance Spectroscopy as a Chert Sourcing Method. *Archaeologia Polona* 54: 115-128.
- Percival J.B.; Bosman S.A.; Potter E.G.; Laudadio, A.B.; Abraham A.C.; Shiley D.A.; Sherry C. (2018): Customized Spectral Libraries for Effective Mineral Exploration: Mining National Mineral Collections. *Clays and Clay Minerals*. 66: 297–314. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2018.064103>
- Ray, J.H. (2007): *Ozarks Chipped-stone Resources: A Guide to the Identification, Distribution, and Use of Flints and Other Siliceous Raw Materials*. Special Publication No. 8. Missouri Archaeological Society, Springfield, MO.
- Ritz, M.; Vaculíková, L.; Plevová, E. (2011): Application of infrared spectroscopy and chemometric methods to identification of selected minerals. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 8: 47–58.
- Rodríguez-Tovar, F.; Morgado, A.; Lozano, J.A. (2010a): Using Ichnofossils to Characterize Chert Tools: A Preliminary Study from Southern Iberia. *Geoarchaeology* 25: 514-526. <https://doi.org/10.1002/gea.20317>
- Rodríguez-Tovar, F.; Morgado, A.; Lozano, J.A. (2010b): Ichnological analysis: A non-destructive tool in archaeological research. *Lethaia* 43: 587-590.
- Roldán, C.; Eixea, A.; Villaverde, V.; Murcia, S.; Prudêncio, M.I.; Dias, M.I.; Marques, R. (2016): Técnicas analíticas aplicadas al estudio de la composición y procedencia de sílex arqueológicos en la región central del mediterráneo español. *digitAR* 3: 23-30.
- Schmidt, P.; Léa, V.; Sciau, P.H.; Fröhlich, F. (2013): Detecting and quantifying heat treatment of flint and other silica rocks: a new non-destructive method applied to heat-treated flint from the Neolithic Cassey culture, southern France. *Archaeometry* 55: 794–805. <https://doi.org/10.1111/J.1475-4754.2012.00712.X>
- Steel, R.; Torrie, J. (1980). *Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach*. 2nd ed., McGraw-Hill Inc., New York.
- Tarrío, A.; Terradas, X. (2013): Materias primas líticas. *Métodos y técnicas de análisis y estudio en arqueología prehistórica: De lo técnico a la reconstrucción de los grupos humanos*, (M. García, L. Zapata, coords.), Universidad del País Vasco, Vitoria, 439-452,
- Tarrío, A.; Olivares, M.; Etxebarria, N.; Baceta, J. I.; Larrasoña, J. C.; Yusta, I.; Pizarro, J. L.; Cava, A.; Barandiarán, I.; Murelaga, X. (2008): El sílex de tipo “Urbasa. Caracterización petrológica y geoquímica

- ca de un marcador litológico en yacimientos arqueológicos del Suroeste europeo durante el Pleistoceno superior y Holoceno inicial. *Geogaceta* 23: 127-130.
- Ten Bruggencate, R.E.; Milne, S. B.; Park, R. W.; Fayek, M.; Stenton, D. R. (2017): Combining flint provenance and least-cost pathway analyses to reconstruct Pre-Dorset and Dorset mobility on southern Baffin Island. *Journal of Archaeological Science-Reports* 14: 651-661. <https://doi.org/10.1016/j.jas-rep.2017.06.030>
- Thiry, M.; Fernandes, P.; Milnes, A.; Raynal, J-P. (2014): Driving forces for the weathering and alteration of silica in the regolith: Implications for studies of prehistoric flint tools. *Earth-Science Reviews* 136: 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.008>.
- Varmuza, K.; Karlovits, M.; Demuth, W. (2003): Spectral similarity versus structural similarity: infrared spectroscopy. *Analytica Chimica Acta* 490: 313–324. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(03\)00668-8](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(03)00668-8)
- Willemsse-Erix, D.F.M.; Scholtes-Timmerman, M.J.; Jachtenberg, J.W.; van Leeuwen, W.B.; Horst-Kreft, D.; Bakker Schut, T.C.; Deurenberg, R.H.; Puppels, G.J.; van Belkum, A.; Vos, M.C.; Maquelin, K. (2009). Optical Fingerprinting in Bacterial Epidemiology: Raman Spectroscopy as a Real-Time Typing Method. *Journal of Clinical Microbiology* 47: 652–659. <https://doi.org/10.1128/JCM.01900-08>.