

CLASIFICACIÓN CRONOLÓGICA DE CERÁMICAS ARQUEOLÓGICAS APLICANDO ANÁLISIS ULTRASÓNICO

Ángela Parra Crego¹, Addisson Salazar Afanador², Teresa Doménech Carbó³ y Luis Vergara Dominguez²
 Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia

¹ Taller de pintura mural

² Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM), Universidad Politécnica de Valencia

³ Laboratorio de análisis físico-químico y control medioambiental de Obras de Arte

AUTOR DE CONTACTO: Addisson Salazar Afanador, asalazar@dcom.upv.es

RESUMEN: *Este artículo presenta un nuevo procedimiento para la clasificación cronológica (datación relativa) o por tipología de cerámicas arqueológicas mediante análisis no destructivo por ultrasonidos. El método aporta ventajas importantes frente a métodos tradicionales físico-químicos de caracterización, que suelen ser lentos, costosos y destructivos para las muestras. Se presentan resultados de la evaluación ultrasónica para una selección de piezas cerámicas de cronología y tipología conocida correspondientes a la Edad del Bronce, Ibéricas, Romanas y Medievales de tres yacimientos de la Comunidad Valenciana (Requena, Liria y Enguera). Estos resultados fueron verificados con información aportada por análisis de microscopio electrónico de barrido y microscopio óptico y ensayos físicos de porosidad y densidad.*

PALABRAS CLAVE: análisis ultrasónico no destructivo, cerámica arqueológica, clasificación de material arqueológico, tipología cerámica, ensayos físico-químicos, densidad, porosidad

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de datación de cerámicas arqueológicas se engloban básicamente en dos tipos: datación relativa y absoluta. Los métodos de datación relativa (marcadores cronológicos, datación cruzada, de secuencias o seriaciones) van unidos indefectiblemente a la metodología arqueológica y se basan en la asociación de la pieza a un determinado contexto, grupo de piezas u objetos o artefactos de cronología conocida. Éstos han sido los habitualmente usados por el arqueólogo hasta la primera mitad del s. XX, momento en el que empezaron a desarrollarse las técnicas de datación absoluta, algunas de las cuales son particularmente apropiadas para la datación de cerámicas, como la termoluminiscencia y paleomagnetismo. El método del Carbono 14 es útil para datar cerámicas si tienen materia orgánica asociada (Spaulding, 1978; Taylor y Aitken, 1979; Rice, 1989; Orton, 1997; Hirst, 2007).

No obstante, si se quieren obtener cronologías fiables es imprescindible combinar los dos tipos de técnicas, ya que los métodos de datación absoluta, aparte de ser muy costosos y destructivos para las piezas, presentan siempre un margen de error que puede resultar demasiado amplio, o bien, como en el caso del paleomagnetismo, ofrecer varias cronologías alternativas. Así, el arqueólogo siempre necesitará asociar la pieza a un determinado contexto si quiere ubicarla cronológicamente con una exactitud mayor.

En cuanto a las técnicas de caracterización o arqueométricas para cerámicas arqueológicas, suponen una importante herramienta para el arqueólogo. Aportan datos tales como técnicas y materiales de fabricación, posible procedencia de los mismos, temperaturas de cocción, y estado de conservación, a partir de los cuales es posible inferir relevantes conclusiones histórico-arqueológicas. No obstante, en la mayoría de los casos son pruebas costosas o requieren un tiempo largo de ejecución, además de ser destructivas para las piezas.

Las técnicas de caracterización de cerámicas arqueológicas pueden englobarse en:

1. Técnicas físicas: técnicas para obtener valores de densidad y porosidad abierta, porosimetría de mercurio. Son técnicas destructivas en cuanto a que las piezas requieren ser calentadas, sumergidas en agua, o rellenadas en su interior. Las de porosimetría de mercurios son, además, contaminantes.
2. Análisis químicos: SEM y AAS, que determinan la composición elemental de las muestras. Son costosos, requieren destruir o cortar la pieza y demandan un largo y elaborado protocolo de ejecución.
3. Análisis mineralógicos: Lupa binocular, lámina delgada y difracción de rayos X. Excepto los análisis con microscopio óptico, son pruebas costosas y destructivas.
4. Aceleradores de partículas: PIXE, RBS, NRA. Son pruebas muy costosas e incluso pueden presentar riesgos para la salud.

La Figura 1 muestra las técnicas más usuales de datación/caracterización de piezas arqueológicas, más concretamente cerámicas.

En este artículo se presenta una nueva técnica basada en Evaluación No Destructiva (END) por ultrasonidos para clasificación cronológica de cerámicas arqueológicas. Los ultrasonidos son ondas mecánicas sonoras cuya frecuencia es superior al margen de audición humana, es decir, frecuencias mayores a 20 Khz. Esta técnica tiene un uso extendido en END ya que la energía ultrasónica es fácil de generar y detectar. Además, este tipo de energía, es capaz de penetrar por el interior de un amplio número de materiales sin una atenuación excesiva e interactuar con la microestructura del material para caracterizarlo o detectar posibles defectos (Krautkrämer, 1990; Cheeke, 2002).

END por ultrasonidos ha sido utilizada en aplicaciones arqueológicas tales como exploraciones marítimas para detectar pecios, obtención de

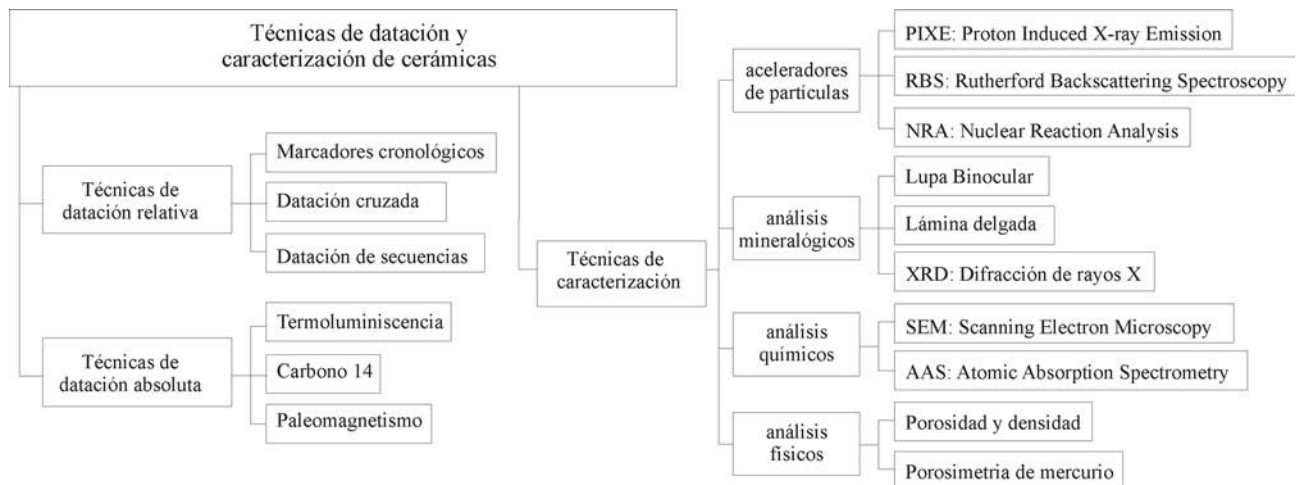


Figura 1. Técnicas de datación y caracterización de cerámicas arqueológicas



Figura 2. Muestras de las piezas cerámicas analizadas. De izquierda a derecha. Edad del Bronce. Ibérico. Romano. Medieval cristiano. Medieval islámico.

imágenes de yacimientos arqueológicos o limpieza de piezas (Murray et al., 1992; Cribbs y Saleh, 1996; Sellers, 1998). Recientemente, nosotros hemos investigado en aplicar los ultrasonidos como una técnica de datación relativa de cerámicas arqueológicas (Salazar et al., 2006a, 2006b, 2007b). En esta línea de investigación, el presente trabajo aporta nuevos resultados que confirman la aplicabilidad del procedimiento propuesto, incluyendo técnicas avanzadas para el procesamiento de las señales ultrasónicas.

2. OBJETO

El objeto de este artículo es el de proponer un nuevo procedimiento de catalogación o datación relativa de cerámicas arqueológicas basado en evaluación no destructiva por ultrasonidos. El método propuesto consta de cuatro etapas: (i) adquisición de señales ultrasónicas de piezas cerámicas, (ii) extracción de parámetros de las señales adquiridas, (iii) entrenamiento de un algoritmo de clasificación con parámetros ultrasónicos de piezas de período cronológico conocido, y (iv) utilización del algoritmo entrenado para la asignación del período cronológico de piezas nuevas que no fueron incluidas en el entrenamiento. La hipótesis subyacente de esta investigación es que la señal ultrasónica medida, después de viajar por el material cerámico arqueológico contiene información suficiente para la clasificación por período cronológico de estas piezas. La evaluación por ultrasonidos presenta características relevantes debido a su relativo bajo costo, procesamiento y obtención rápida de resultados y además es un método inocuo para los materiales.

El método se ha probado en un conjunto de fragmentos cerámicos provenientes de yacimientos en Requena, Liria y Enguera en la Comunidad Valenciana. Dichos fragmentos correspondieron a cerámicas de los periodos Edad del Bronce, Ibérico, Romano y Medieval. Los fragmentos cerámicos fueron catalogados cronológicamente de forma automática aplicando diferentes algoritmos de clasificación,

obteniendo resultados de acierto superiores al 80%. Para contrastar los resultados obtenidos por el método presentado se han realizado análisis convencionales usados en la caracterización de cerámicas arqueológicas como son análisis de microscopio electrónico de barrido y microscopio óptico y ensayos físicos de porosidad y densidad.

3. METODOLOGÍA

3.1. Cerámicas arqueológicas analizadas

El conjunto de fragmentos con los que contamos para la realización del presente trabajo es el resultado de una selección de diversas piezas cerámicas de la Edad del Bronce, ibéricas, romanas y medievales (incluyendo en este último apartado una serie de fragmentos de cerámica islámica) pertenecientes a los Museos Arqueológicos de Requena, Enguera y Liria (Valencia). La selección es bastante representativa de la tipología de piezas que se suelen recuperar en los yacimientos de la Comunidad Valenciana, además de diferenciarse entre ellas por sus técnicas de fabricación, resultado a su vez de la evolución tecnológica e histórico-cultural de las diferentes culturas a lo largo del tiempo. La distribución por período de las piezas analizadas por ultrasonidos (480 fragmentos cerámicos) fue la siguiente: 47 Edad del Bronce, 155 Ibérico, 138 Romano, y 140 Medieval. Algunos de estos fragmentos se presentan en la Figura 2.

Las piezas correspondientes a la Edad del Bronce pertenecen a yacimientos de la comarca Requena-Utiel. Se trata de una cerámica realizada a mano, muy tosca, rudimentaria y de textura irregular, de color pardo oscuro o negro, para uso presuntamente doméstico. Su fabricación es local y autárquica en el propio poblado, muy ligada a la actividad doméstica de la mujer. Del color oscuro inferimos la técnica de fabricación en atmósfera reductora, esto es, en hornos cerrados y a bajas temperaturas.

Los fragmentos ibéricos de que disponemos son bastante numerosos, correspondientes a vasijas decoradas a pincel con motivos geométricos o sin decoración, con pastas cerámicas de factura mucho más fina y depurada. Por lo que respecta al nivel tecnológico de las piezas la novedad más relevante es el uso del torno. Proviene de tres yacimientos: Casillas del Cura y Los Alerises en Requena y Cerro Lucena en Enguera.

Casillas del Cura es un alfar cerámico que inició su actividad hacia el s. V a. C. Las excavaciones constatan dos siglos de ocupación, y hacia el s. III a. C, a lo largo del período ibérico pleno es abandonado. Las piezas son, por tanto, de producción local, de tal manera que es factible conocer tanto su proceso de fabricación como los materiales usados en el mismo (Martínez Valle, 1997). La cerámica de Los Alerises, poblado ibérico de la zona de Requena, ha sido datada hacia el siglo V a. C. Estas piezas son presumiblemente producciones locales de los alfares de la comarca. Cerro Lucena (Enguera) es un poblado ibérico al que se supone una entidad urbana por la envergadura del yacimiento y de los restos encontrados, como un sistema defensivo, el tipo de cerámicas y documentación de plomos escritos. El yacimiento tuvo una ocupación desde el s. IV a. C. hasta fines del s. I d. C., en plena ocupación romana.

Los fragmentos romanos con los que contamos los debemos subdividir en tres grandes grupos: Cerámica *sigillata*, cerámica común y cerámica tipo ánfora o *dolia*. A nivel genérico, debemos destacar la perfección técnica romana en la fabricación de cerámicas, usando diferentes técnicas, a torno, a mano y a molde. La aplicación de los moldes a la elaboración de cerámicas proporcionó a los alfareros la posibilidad de fabricación en serie, con lo cual la producción de cerámica adquirió un carácter industrial. Los fragmentos con los que contamos proceden del yacimiento La Calerilla en Requena, que es una necrópolis romana con dos siglos de actividad documentada (s. I-III d. C.) (Martínez Valle, 1995). También tenemos fragmentos provenientes de la ciudad Edeta-Lauro romana (actual Liria), importante municipio de derecho romano cuyo período de mayor auge tuvo lugar a lo largo del s. II d. C.

La cerámica *sigillata* (o *terra sigillata*) es la cerámica romana de lujo, que aparece en el orbe romano a partir de fines del s. I a. C. Se identifica por estar recubierta por un característico engobe brillante color rojo almagra y por llevar incisa la firma del alfarero (*sigillum*). El engobe de color rojo distintivo de esta cerámica se obtiene a partir de la aplicación de una mezcla de arcilla con agua a la superficie, y de la cocción a altas temperaturas en hornos abiertos (en atmósfera oxidante). Podían ser lisas, pero la mayoría de las veces estaban decoradas con relieves de motivos diversos. Las producciones en principio provenían de Italia, pero pronto aparecieron talleres centros de producción autóctonos en la península ibérica (como Tritium Magallum en La Rioja y Villares de Andujar en Jaén), que fabricaron la *terra sigillata hispanica*. Las piezas de *sigillata* de La Calerilla y Liria son en su mayoría, importaciones de los talleres hispánicos, aunque contamos con alguna pieza aislada sudgálica y africana. En lo referente a los otros subgrupos de piezas de cerámica común y tipo ánfora, se trata de cerámica a torno pero más tosca, para uso doméstico y/o funciones de almacenamiento o transporte, sin decoración. Muy probablemente se trate de producciones locales, aunque este hecho no está confirmado porque en el caso de La Calerilla no se ha encontrado el alfar.

Las piezas medievales con que contamos se subdividen en dos grupos: medieval islámico y medieval cristiano. La producción cerámica islámica tuvo una gran relevancia, ligada al importante avance técnico que supuso la aparición del vidriado. No obstante, aunque contamos con algunas piezas islámicas vidriadas, no han sido analizadas en el presente estudio. Así, los fragmentos analizados pertenecen a vasijas califales sin decoración, datados en torno a los siglos X-XI, de pasta poco depurada y sin tratamientos especiales. Su producción fue de carácter local en el propio alfar de Requena, del cual se conoce su exacta ubicación. Es por ello que es viable realizar un estudio tanto de arcillas como de técnicas de fabricación. En cuanto a los fragmentos medievales cristianos, corresponden a piezas variadas, de pasta blanca

y gruesa, sin vidriado, sin decoración, o con decoración pintada o con incisiones. Una parte de las piezas pertenecen al vaciado de las cuevas de la villa de Requena, y se datan en torno a los siglos XIII-XIV. Las otras pertenecen al Museo de Enguera pero desconocemos el lugar exacto de su extracción.

1. Adquisición de señales ultrasónicas	
	<ul style="list-style-type: none"> - Configuración del equipo de ultrasonidos y de adquisición - Medición de las piezas cerámicas utilizando la técnica transmisión-recepción y acoplamiento mediante goma adaptadora
2. Extracción de parámetros ultrasónicos	
	<p>Aplicar técnicas de tratamiento digital de señal para calcular los parámetros temporales, frecuenciales y estadísticos de las señales ultrasónicas adquiridas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temporales: velocidad de propagación de los ultrasonidos, valor inicial de la curva de atenuación de la señal, atenuación y potencia de la señal. - Frecuenciales: frecuencia máxima, frecuencia centroide, amplitud y atenuación de la frecuencia máxima, frecuencia centroide instantánea - Estadísticos: reversibilidad temporal, autocovarianza de tercer orden
3. Entrenamiento del clasificador	
	<ul style="list-style-type: none"> - Selección de los datos de entrenamiento: parámetros ultrasónicos extraídos a un conjunto de piezas con período cronológico conocido - Entrenar el algoritmo de clasificación para obtener un modelo adaptado a los datos de entrenamiento
4. Clasificación de nuevas piezas cerámicas	
	<ul style="list-style-type: none"> - Selección de los datos de clasificación: parámetros ultrasónicos extraídos a un conjunto de piezas con período cronológico desconocido - Aplicar el modelo obtenido en la etapa de entrenamiento para determinar el período cronológico de las nuevas piezas

Tabla 1. Procedimiento para clasificación de cerámicas arqueológicas por ultrasonidos

3.2. Clasificación cronológica por ultrasonidos

El esquema general del procedimiento propuesto se compone de cuatro etapas que se incluyen en la Tabla 1.

En END por ultrasonidos, una excitación ultrasónica (puede ser un tren de pulso o una onda continua) es introducida en la pieza bajo análisis; la respuesta del material es recogida y analizada para determinar ciertas características del mismo como por ejemplo, su estado general, su espesor, su resistencia, o la posible presencia de grietas. Las técnicas más conocidas son: *pulso-eco* (se utiliza un único sensor o transductor que sirve como emisor del pulso ultrasónico y receptor de la señal después de haber viajado a través del material) y *transmisión-recepción* (se utilizan dos transductores, un emisor y un receptor). Para poder transmitir el pulso de ultrasonidos al material se necesita de un elemento de acople entre el transductor y el material. Entre los elementos de acoplamiento usados tenemos: gel, inmersión, chorro de agua, aire, y goma. Después de ensayar diferentes métodos de acoplamiento, encontramos que los adaptadores de goma eran el mejor material de acoplamiento para los ultrasonidos en la aplicación de cerámicas arqueológicas. La técnica de medición aplicada fue la de transmisión-recepción, las pruebas que se hicieron con la técnica pulso-eco no funcionaron correctamente, debido a la propiedad física de alta atenuación del material. La Figura 3a muestra un detalle de la medición de una pieza cerámica de la edad de Bronce y la Figura 3b representa cuatro señales ultrasónicas medidas en piezas de los

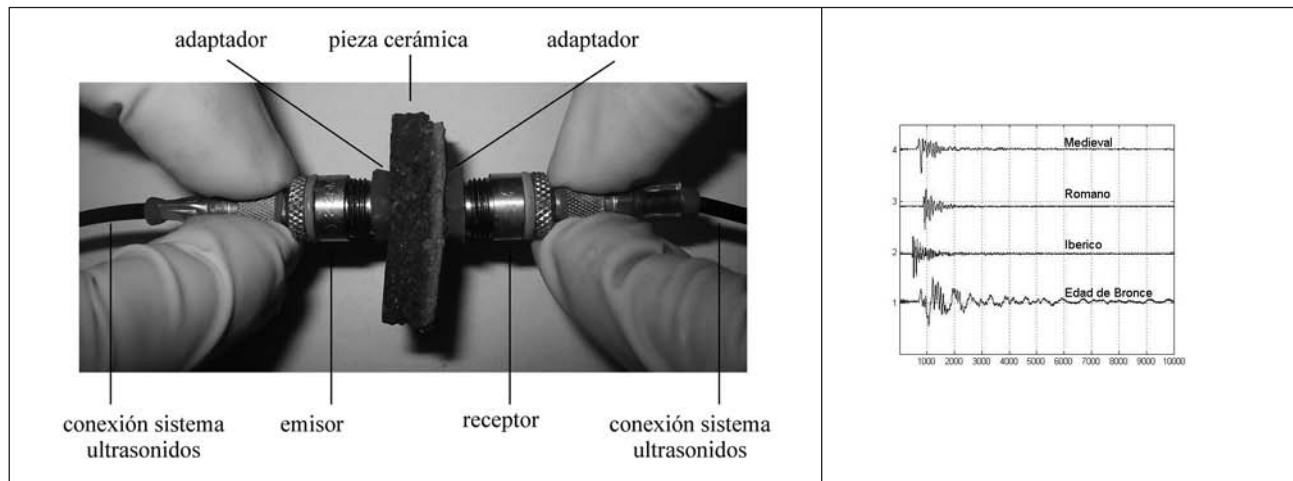


Figura 3a. Detalle de la medición por ultrasonidos

Figura 3b. Señales ultrasónicas medidas

períodos estudiados. Se han capturado 10000 valores (muestras) en la señal a una frecuencia de muestreo de 100 MHz, lo que equivale a un tiempo de observación de 0.1 ms.

La configuración del equipo usado en las mediciones fue la siguiente: (i) **Configuración ultrasonidos:** equipo de ultrasonidos (Matec PR5000), transductores (2.25 MHz -Krautkrämer), ancho del pulso (4 us), señal de excitación (ráfaga de tonos de 1050 MHz), modo de operación (transmisión-recepción). (ii) **Configuración adquisición:** equipo de adquisición (osciloscopio Handyscope HS-3), frecuencia de muestreo (100 MHz), número de muestras (10000), resolución vertical (16bits), rango dinámico (100 mV/división), promediado (16 adquisiciones).

En la Figura 3b, que corresponde a una representación en el tiempo (forma de onda) de las señales, puede observarse que hay parámetros diferentes de una señal a otra, como por ejemplo, la amplitud, el tiempo en que se atenúa la señal, el tiempo de llegada de la señal (tiempo tomado por los ultrasonidos para viajar desde el emisor hasta el transmisor). Este último parámetro se calcula estimando la muestra

en la que empiezan a encontrarse valores representativos de la señal, por ejemplo, puede verse que la señal más adelantada es la de la pieza Ibérica, mientras que la más retrasada es la de la pieza Romana.

Además de las diferencias en las señales que pueden observarse a simple vista, es posible extraer más información y en forma precisa mediante el procesado digital de señal. Entonces se aplicaron diversos algoritmos para extraer parámetros de las señales ultrasónicas. Estos algoritmos explotan la información temporal, frecuencial y estadística de las señales y permitirían caracterizar los diferentes grupos de cerámicas, ver Tabla 2 (Cohen, 1995; Vergara et al., 2004).

Los parámetros extraídos de las señales ultrasónicas definen una matriz de datos, en este caso la dimensión de la matriz es de 480 filas por 11 columnas, correspondientes al número de piezas por el número de parámetros calculados. Con este conjunto de datos se procede a realizar un proceso de clasificación en cuatro clases correspondientes a los periodos Bronce, Ibérico, Romano y Medieval. Este proceso tiene dos etapas, la primera consiste en entrenar un algoritmo para

Atenuación de la señal	$\hat{x}(t) = Ae^{-bt} \Rightarrow \text{Aten}_{Total} = b$	Valor inicial de la curva de atenuación (dB)	$\hat{x}(t) = Ae^{-bt} \quad P_0 = 10 \log(A)$
Velocidad de propagación	$v = \frac{\text{espesor pieza}}{\text{tiempo de vuelo ultrasonidos}}$	Frecuencia centroide	$f_c = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f \cdot X(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} X(f) df}$
Frecuencia máxima	$f_{max} / X(f_{max}) \geq X(f) \forall f$	Reversibilidad temporal	$\frac{1}{s^3} \left\langle \left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^3 \right\rangle$
Amplitud de la frecuencia máxima	$ X(f_{max}) $	Autocovarianza de tercer orden	$\langle x(t) \cdot x(t-1) \cdot x(t-2) \rangle$
Atenuación de la frecuencia máxima (dB)	$x_i(t) = TF^{-1} \{X(f) \cdot \text{Notch}_{f_{filtro}, f_i}(f)\}$ $\hat{x}_i(t) = Ae^{-bt_i} \Rightarrow \text{At}_{FReson} = b_i$	Frecuencia centroide instantánea	$\hat{f}(t = t_0)$
Potencia de la señal	$P_{Total} = \frac{\int_0^T x(t) ^2 dt}{T}$		

Tabla 2. Parámetros ultrasónicos

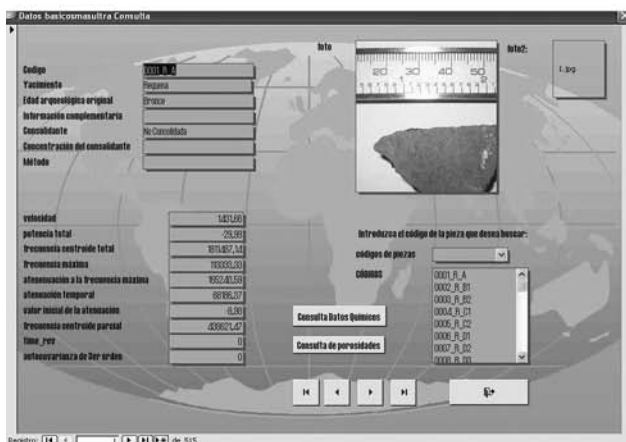
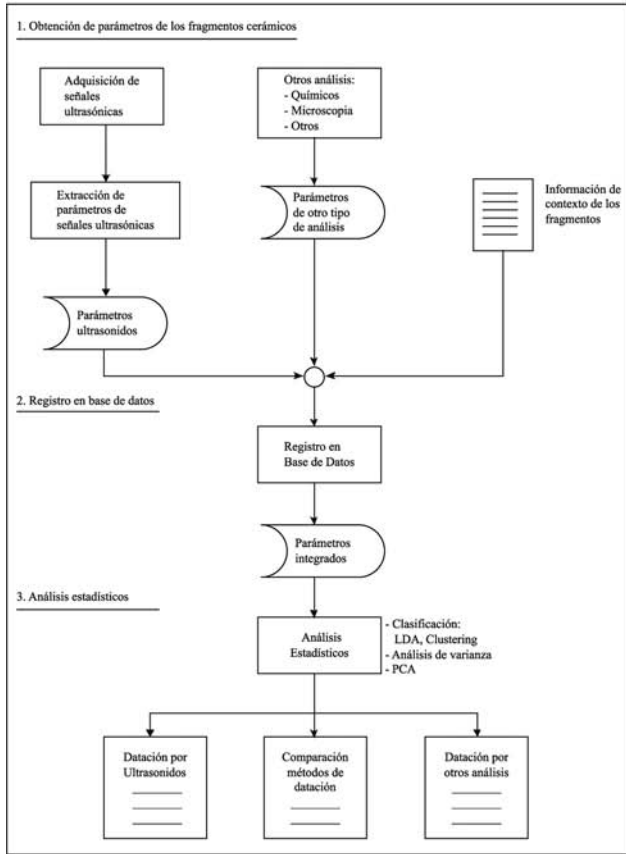


Figura 4. Metodología para comparar los resultados de los análisis
 Figura 4a. Comparación de resultados
 Figura 4b. Pantalla de consulta de datos de los análisis de una pieza

crear un modelo adaptado a los datos de entrenamiento y la segunda consiste en utilizar el modelo estimado para clasificar nuevos datos. Para esta aplicación, los parámetros de 360 piezas fueron usados en entrenamiento y los parámetros de 120 piezas fueron usados en la etapa de clasificación. Dado que se conocía la clase (período cronológico) a que pertenecían todas las piezas, se pudo calcular el porcentaje de acierto de la clasificación automática realizada por el algoritmo una vez entrenado.

Los algoritmos de clasificación en la etapa de entrenamiento dividen el espacio n-dimensional definido por los parámetros (en esta aplicación 11 dimensiones) en regiones lo más disjuntas posibles correspondientes a las clases definidas (períodos cronológicos). El procedimiento para estimar estas regiones y representaras difiere de un algoritmo a otro, así como la forma en que se lleva a cabo su entrenamiento. El

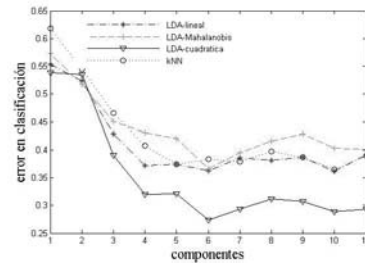


Figura 5. Resultados LDA, kNN y selección de número de componentes

entrenamiento puede realizarse de tres modos diferentes, dependiendo del conocimiento que se tenga a priori de los registros de datos que entran a esta etapa: (i) *supervisado*: se conoce la clase de todos los registros -todos los datos están etiquetados- (ii) *semisupervisado*: se conoce la clase de algunos registros -hay datos etiquetados y datos no etiquetados- (iii) *no supervisado*: se desconoce la clase de todos los registros -hay solo datos no etiquetados-. En la etapa de clasificación, el algoritmo asigna automáticamente nuevos registros de datos a las regiones de clasificación obtenidas en el entrenamiento utilizando los valores de los parámetros de cada nuevo registro.

En este trabajo se presenta un estudio comparativo del desempeño en clasificación de varios algoritmos: Análisis Lineal Discriminante (LDA del inglés *Linear Discriminant Analysis*), k vecinos más próximos (kNN del inglés *k Nearest Neighbors*) y mezclas de analizadores de componentes independientes (MIXICA, del inglés *Mixtures of Independent Component Analysis*). LDA se empleó con tres tipos de distancias: lineal, Mahalanobis y cuadrática; y MIXICA se aplicó con cuatro tipos de algoritmos ICA: Mixca, JADE, TDSEP y fatICA. Las definiciones de estos algoritmos se pueden encontrar en (Duda et al., 2000; Hyvärinen et al., 2001; Roberts y Penny, 2001; Choudrey y Roberts, 2003; Vergara et al., 2006; Salazar et al., 2007a).

3.3. Comparación de resultados

Un aspecto importante considerado en esta investigación es contrastar los resultados del procedimiento propuesto con otros análisis de caracterización de las cerámicas arqueológicas. Con este objetivo se desarrolló una herramienta software para consolidar la información de los resultados de los diferentes análisis. Esta herramienta permitirá integrar la información de los análisis de ultrasonidos, análisis químicos y físicos (porosidad, densidad, microscopia, rayos X) e información de contexto de los fragmentos arqueológicos (yacimientos, datos geológicos, fotos). Esta información podrá exportarse para ser procesada, integrando todos los parámetros o una parte de ellos, por herramientas convencionales de análisis que podrían llegar a manejar los arqueólogos que serían los usuarios finales del sistema.

Las funciones implementadas en la aplicación de base de datos para la integración de información de los análisis realizados a las piezas cerámicas fueron las siguientes: (i) Consultas: consulta por características, consulta por código, visualización de gráficos, consulta general. (ii) Actualizaciones: actualización de datos básicos, importar de parámetros de ultrasonidos, importar parámetros de otros análisis, exportar parámetros para clasificación. La Figura 4 muestra la metodología utilizada para integrar y comparar la información de los análisis realizados y una consulta de datos básicos y parámetros ultrasónicos de una pieza.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis ultrasónico

El conjunto de parámetros extraídos fue procesado mediante Análisis de Componentes Principales (PCA, del inglés *Principal Component Analysis*) para reducir la dimensión del espacio de clasificación.

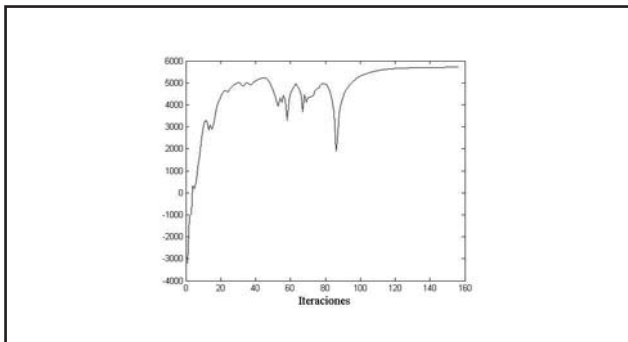
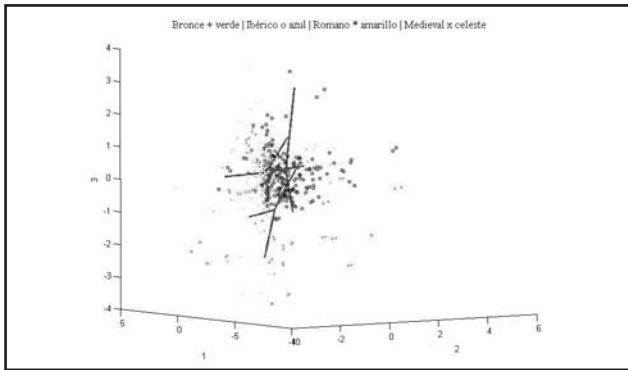


Figura 6. Resultados LDA, kNN y selección de número de componentes
 Figura 6a. Diagrama de dispersión 3D componentes
 Figura 6b. Convergencia de MIXICA

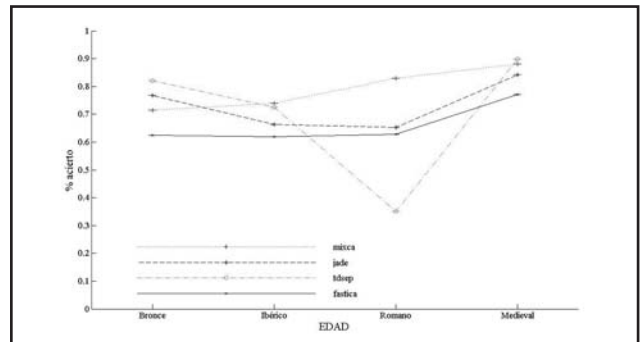
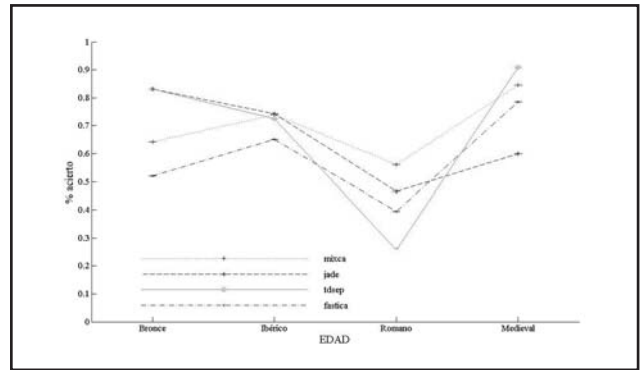


Figura 7. Resultados MIXICA
 Figura 7a. Resultados MIXICA – supervisión 50%
 Figura 7b. Resultados MIXICA – supervisión 70%

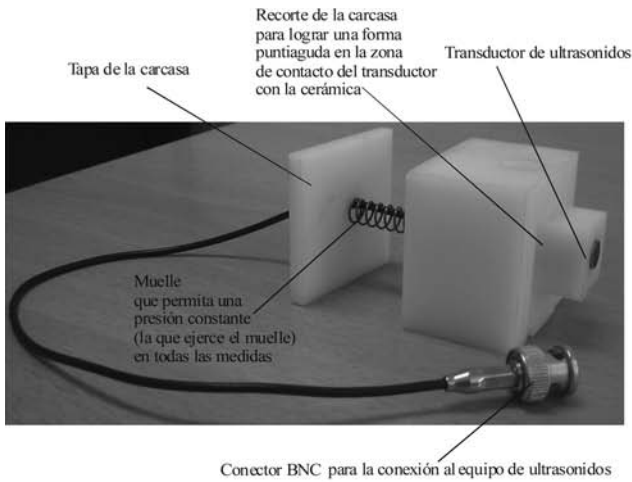
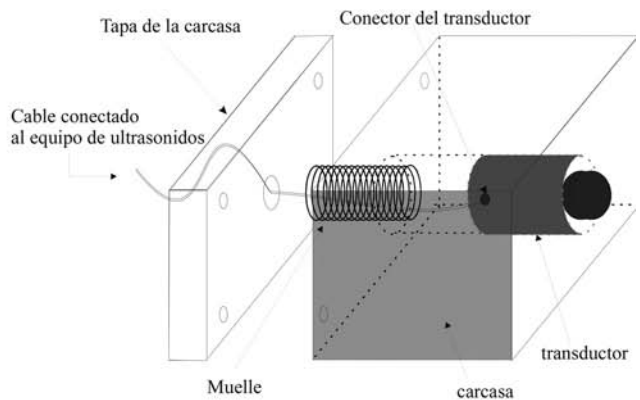


Figura 8. Diseño e implementación de la carcasa



Para determinar el mejor número de componentes, se realizó un procedimiento iterativo variando el número de componentes y clasificando con LDA y kNN. El procedimiento de clasificación dividió los registros de datos en dos conjuntos de datos, 75% de los datos para entrenamiento y 25% para clasificación, este proceso se repitió para 100 ensayos Montecarlo. En estos ensayos se escogieron aleatoriamente los registros que componían los conjuntos de datos de entrenamiento y clasificación, así que cada ensayo podía representar un caso distinto.

El tamaño relativamente pequeño del conjunto de datos disponible podría causar un problema de falsos mínimos, por lo que se generó un conjunto de datos aumentado para la etapa de entrenamiento, adicionando 3 réplicas de las muestras originales con ruido Gaussiano esférico aditivo (Learned-Miller y Fisher, 2003). La Figura 5 muestra los resultados de la selección del número de componentes (se usó k=10

	Bronce	Ibérico	Romano	Medieval
Bronce	0.71	0	0.21	0.07
Ibérico	0	0.74	0.15	0.11
Romano	0	0.07	0.83	0.1
Medieval	0	0.02	0.1	0.88

Tabla 3. Matriz de confusión obtenida por Mixca con 70% de supervisión (valores en porcentajes)

para el algoritmo kNN). El error de clasificación más bajo (0.273) se obtuvo para 6 componentes y el algoritmo LDA usando distancia cuadrática. Para éste caso, el porcentaje de acierto por clase fue: Bronce (87), Ibero (84.5), Romano (47.3), y Edad Media (80).

Las clasificaciones realizadas con MIXICA utilizaron solamente 6 de los 11 componentes, aplicando el número óptimo de componentes obtenido para LDA y kNN. La Figura 6a muestra el diagrama de

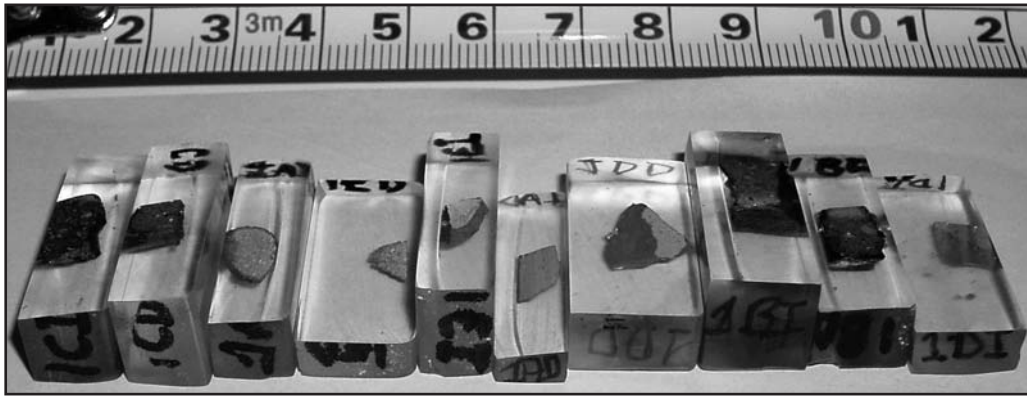


Figura 9. Probetas preparadas para SEM

Tipo cerámica	Densidad real (g/cm ³)	Tipo cerámica	Densidad aparente (g/cm ³)
Romana	2,60	Medieval	1,87
Bronce	2,50	Ibérica	1,85
Medieval	2,46	Bronce	1,78
Ibérica	2,40	Romana	1,77

Tabla 4. Resultados análisis de densidad real y densidad aparente

dispersión de los 3 primeros componentes con los parámetros estimados (vectores base y centroides) por MIXICA durante entrenamiento para cada una de las 4 clases. La Figura 6a ha sido girada para resaltar un punto de vista donde los datos de las diferentes clases son discernibles; sin embargo puede apreciarse que existen zonas donde los datos están muy aglutinados haciendo difícil la separación de las muestras de las diferentes clases. Para éste caso, MIXICA fue capaz de encontrar la dirección y localización correcta de los parámetros, usando estimación no-paramétrica de las fuentes.

La Figura 6b muestra la evolución de la convergencia del algoritmo MIXICA a través de las iteraciones para el caso de la Figura 6a. La curva representa un comportamiento ascendente con el incremento del número de iteraciones, los parámetros ajustados encajan con los datos observados y la verosimilitud logarítmica se maximiza. El algoritmo convergió exitosamente en la iteración número 158, después de sobrepasar dos zonas de máximos locales.

A través de simulaciones Montecarlo se verificó que la convergencia del algoritmo MIXICA dependía de las zonas de solape entre las clases, la inicialización de los parámetros, y el porcentaje de supervisión (proporción entre datos etiquetados y no etiquetados) utilizado durante el entrenamiento. El porcentaje de convergencia fue alto, y la mayoría de casos de no convergencia, cuando el algoritmo quedó atascado, correspondieron a clasificación no-supervisada. Sin embargo, después de etiquetar algunos datos, el algoritmo convergía. La falta de supervisión deja de ser un problema cuando se tienen suficientes datos históricos.

Las Figura 7 muestra el porcentaje promedio de acierto en la clasificación usando MIXICA con diferentes algoritmos ICA para la estimación de las fuentes y dos porcentajes de supervisión. El número de piezas empleado en la etapa de entrenamiento fue de $480 \times 0.75 = 360$, a estas piezas se añadieron 3 replicas sintéticas adicionales para completar un total de 1440 muestras. Por lo tanto para un porcentaje de supervisión de 70%, el número de piezas etiquetadas fue de 1008 y el número de piezas no-etiquetadas fue de 432. El mejor desempeño en clasificación utilizando MIXICA se obtuvo mediante el algoritmo ICA no-paramétrico (Mixca). Para supervisión de 50% los resultados promedio de acierto en clasificación de los diferentes algoritmos ICA fueron: Mixca=71%, JADE=65%, TDSEP=65.5%, y fastICA=60.4%. Los resultados de Mixca con esta poca supervisión en entrenamiento son comparables con los mejores resultados de los algoritmos LDA con distancia cuadrática (72.7%). Para supervisión de 70% los resultados son mucho mejores para Mixca (80.42%) y para JADE

(72.3%) y comparables con LDA distancia cuadrática. En este nivel de supervisión los resultados para TDSEP (67.8%) y fastICA (66.7%) llegan a ser mejores que LDA con distancias lineal y Mahalanobis y kNN. En conclusión los resultados de MIXICA son mucho mejores que los resultados de los algoritmos LDA y kNN considerando que MIXICA ha utilizado un porcentaje bajo de supervisión, mientras que los algoritmos LDA y kNN solo funcionan con 100% de supervisión.

La Tabla 3 contiene la matriz de confusión obtenida por Mixca para supervisión de 70%. La categoría Romana no es muy difícil de clasificar pero es frecuentemente asignada a piezas Iberas y de la edad del Bronce. Las piezas de la Edad Media se confunden un 11% con las piezas Ibéricas. Luego las piezas Romanas y de la Edad Media causan una mala clasificación de de las piezas Ibéricas y de la edad del Bronce. El buen porcentaje de acierto obtenido en la clasificación (80.42%) indica un buen ajuste del espacio 6D de componentes proyectado a partir de las parámetros extraídos de las señales ultrasónicas en un modelo de mezclas ICA. Algunas de las piezas estaban tratadas con productos conservantes, pero esto no pareció afectar su clasificación cronológica. Adicionalmente, considerando la hipótesis de que existe correlación entre la edad cronológica de la cerámica y su porosidad, puede decirse que la correcta clasificación de los fragmentos indica que los parámetros extraídos de la señal ultrasónica podrían medir cambios en propiedades físicas, tales como la porosidad, de las cerámicas arqueológicas.

4.2. Mejoramiento del sistema de medidas por ultrasonidos

La medición por ultrasonidos presentó varias dificultades, en cuanto al acoplamiento transductor-material, atenuación de la señal, medición del espesor, y presión ejercida durante la medición. Se seleccionó el acoplamiento de los ultrasonidos aplicando una goma entre el transductor y el material. Este método de acoplamiento fue el único viable después de ensayar acoplamiento mediante gel y por inmersión, además de permitir la adaptación a la superficie curva de las cerámicas. Sin embargo, la adquisición de las señales utilizando el modo transmisión-recepción de forma manual presenta problemas al no asegurar la presión en todas las mediciones, con lo que la forma de onda de la señal puede variar significativamente. Por las anteriores razones se diseñó una herramienta, con el fin de obtener estandarización en la toma de las señales. La herramienta contiene el diseño de una carcasa que permite controlar la presión entre el transductor y la pieza. La presión ejercida por los transductores sobre la goma acopladora, se controlará mediante un muelle que se ha incluido en el diseño de la carcasa, ver Figura 8. Las características de este instrumento de medición permitirán

realizar medidas estandarizadas en las piezas cerámicas con lo que se asegura la repetibilidad y confiabilidad de los resultados.

4.3. Análisis químicos – Microscopía electrónica y óptica

Como complemento a las mediciones efectuadas mediante ultrasonidos, se han llevado a cabo diversas determinaciones morfológicas y físico-químicas mediante técnicas instrumentales convencionales para ser contrastadas con las anteriormente citadas. En particular, se ha efectuado una determinación de la densidad real y aparente, porosidad, así como una determinación de la composición química mediante SEM/EDX y una primera caracterización mineralógica mediante Microscopía óptica.

Los datos aportados por estos estudios analíticos indican que hay claras diferencias a nivel morfológico entre los diferentes grupos de fragmentos estudiados. Así, la cerámica correspondiente a la edad del bronce exhibe tonalidad pardo negruzca con abundante porosidad y presencia de abundantes granos de tonalidad oscura de composición ferrosa asociados a magnetita así como núcleos ferríferos rojizos de óxido de hierro (III).

Tipo cerámica	Porosidad abierta (%)
Romana	32,0
Bronce	29,3
Medieval	23,8
Ibérica	22,5

Tabla 5. Resultados análisis de porosidad abierta

La cerámica ibérica procedente de Enguera presenta tonalidad variable que va desde el anaranjado hasta el negro. El desgrasante de cuarzo se presenta en granos de talla grande a muy grande y se reconocen abundantes núcleos ferríferos de óxido de hierro (III) así como más aisladamente se aprecian granos de magnetita negros. Se trata de cerámica rica en hierro (hasta un 7,45% de Fe_2O_3) y con un apreciable contenido en calcio (hasta un 6,30% en CaO).

Los fragmentos de cerámica romana procedentes de Liria exhiben características variables dependiendo de la tipología (sigilata, común o ánfora). En todos los casos se trata de pastas de tonalidad anaranjada, de porosidad de pequeño tamaño al igual que presencia baja de desgrasante que crece en cantidad a medida que pasamos de la tipología sigilata a la tipología ánfora y con contenido en Fe_2O_3 de 5,71, 6,36, 9,24% respectivamente y contenido en CaO de 0,67, 2,92, 1,29% respectivamente.

Finalmente, el grupo de cerámica medieval presenta color anaranjado claro a pardo que pone de manifiesto que se trata de pastas ferríferas. Se observa desgrasante crucífero de talla grande a muy grande y abundantes núcleos ferríferos rojos de óxido de hierro (III) de talla muy pequeña así como granos de magnetita de tonalidad negra. También se observan agregados calizos de tonalidad blanca asociados a un elevado contenido en CaO (en torno al 8%). La Figura 9 muestra algunas de las probetas preparadas para el análisis SEM.

4.4. Análisis físicos – Porosidad y densidad

Densidad real y densidad aparente

Las pruebas de densidad real y aparente se hicieron sobre 80 muestras. Los promedios obtenidos en orden descendente de estas medidas fueron los siguientes:

En lo que respecta a las pruebas de densidad y porosidad partimos de una hipótesis planteada a priori según la cual, la cerámica romana sería la más densa o compacta, la cerámica Medieval tendría una compacidad media y las Ibérica y del Bronce una densidad baja.

El promedio de densidad real más alto es el de la cerámica romana,

con unos valores en subgrupos de 2,7 g/cm³ en la cerámica *sigillata*, 2,5 g/cm³ en cerámica común y 2,6 g/cm³ en la de tipo ánfora. Estos valores concuerdan con la hipótesis planteada, pero los valores obtenidos con los fragmentos del Bronce la contradicen, puesto que obtienen el siguiente promedio más elevado de densidad real. No obstante, los valores de densidad real máximos los obtenemos en una pieza medieval (medieval cristiana) de Requena, con un 2,9 g/cm³, y en una pieza romana (*sigillata*) también de Requena, con un 2,8 g/cm³. El valor mínimo de densidad real correspondería a una pieza de la Edad del Bronce, con 2,5 g/cm³. Estos valores máximos y mínimos que no concuerdan con los valores promedio nos indican que existe dispersión en los datos.

Los valores promedio de densidad aparente son muy similares, aunque los más altos corresponden a las piezas de cerámica medieval (el valor máximo promedio lo obtiene el subgrupo de cerámicas islámicas) e ibéricas, obteniendo los valores más bajos las cerámicas romana y del bronce, muy próximas entre sí. La diferencia entre los valores de densidad real y aparente en las piezas nos indica la presencia de porosidad genérica, más elevada en cerámicas romanas y del bronce.

Porosidad abierta

Los datos de porosidad abierta son más dispares y presentan un rango más variado, obteniendo valores claramente diferentes en los diferentes grupos, como sigue:

A partir de los datos se concluye que la cerámica más porosa corresponde a la cerámica romana, más concretamente a la cerámica *Sigillata* que es la que obtiene los valores claramente más altos, seguida de la cerámica del bronce. La puntuación obtenida por los subgrupos de cerámica romana común y tipo ánfora se acerca bastante a los valores obtenidos por la cerámica del bronce. Por debajo de estos valores y con resultados muy similares entre sí, estarían la cerámica medieval y la ibérica, obteniendo éstas últimas las tasas de porosidad más bajas. Estos datos contradicen la hipótesis de la cual partimos según la cual, la cerámica romana tendría una porosidad baja, la medieval una porosidad media y las cerámicas del bronce e ibéricas, alta.

El rango de valores que hemos obtenido en los diferentes subgrupos es bastante variado, y ello puede ser debido a que el grupo de piezas en las que hemos englobado las cerámicas romanas contiene subclases muy heterogéneas entre sí, tales como las mencionadas *sigillata*, común o tipo ánfora. El subgrupo más diferenciado corresponde a la *sigillata* como cerámica refinada de lujo de alta factura técnica, pasta muy depurada de textura muy fina y su característico engobe rojo, altamente impermeable. Estas se diferencian claramente de los otros dos subgrupos, de cerámica menos depurada y más común. Sin embargo, los fragmentos de *sigillata* medidos en muchos casos han perdido buena parte de su engobe, quedando expuesta la fina pasta (compuesta por numerosos poros de tamaños mínimos e interconectados entre sí) a una gran absorción de agua. Uno de los fragmentos de *sigillata* analizados (correspondiente a Liria) ofrece un valor ostensiblemente más bajo (14 %), cercano al valor mínimo de porosidad obtenido en todas las muestras analizadas y es debido precisamente a que ha perdido menos engobe.

Sería interesante efectuar mediciones en más piezas de cerámica *sigillata* menos fragmentadas y que conserven su engobe para obtener los valores de porosidad y absorción de agua que corresponderían. El estado de conservación de las piezas es pues, vital en los análisis ya que la excesiva fragmentación de las piezas influye en la porosidad. En lo que respecta a los otros dos subconjuntos de cerámica romana, obtenemos valores más bajos pero se encuentran de todas formas en el rango más alto de los mismos, con promedios de 29 y 31 %, muy cercanos a los de los fragmentos del bronce como ya se indicó. Obviamente la cerámica común o tipo ánfora es de factura más tosca que la *sigillata*, pero presenta una alta porosidad que las asemeja a la cerámica del bronce, que se presuponia como la más porosa, dado que es la más tosca y realizada a mano.

El valor promedio de porosidad más bajo lo obtienen las cerámicas ibéricas, seguido de cerca por las cerámicas medievales (el grupo de medieval cristiana obtiene valores bastante cercanos a los mínimos), contradiciendo de nuevo la presuposición inicial. Por otra parte, el valor máximo de porosidad lo obtiene un fragmento de *sigillata* de Liria, con un 42,5 %, y el valor de porosidad mínima una pieza medieval de Enguera con un 10%. A este respecto los valores de porosidad abierta ofrecen menos dispersión, puesto que coinciden bastante con los promedios.

Por último mencionar que dos de las piezas analizadas, concretamente una de la Edad del bronce y otra medieval islámica (pertenecientes a Requena), han sido tratadas con sustancias consolidantes (aunque a muy baja concentración, un 5%), obteniendo valores ligeramente más bajos respecto a su promedio de grupo.

Como conclusión diremos que las piezas romanas obtienen los valores más altos de densidad real, pero también los de porosidad abierta, lo cual contradice la visión que a priori tenemos de dichas cerámicas en base a los conocimientos que poseemos sobre sus características técnicas de fabricación y calidad. Las cerámicas del bronce, pese a que a simple vista son de apariencia más tosca y fabricación a mano, obtienen unos valores de densidad real muy cercanos a las romanas, y una menor porosidad que las *sigillatas*.

Es muy importante recalcar la importancia que el estado de conservación, así como de fragmentación de las piezas puede influir en los resultados, ya que, por ejemplo, al perder partes de su engobe pierde las características inherentes a su tipología cerámica. Es necesario, por último, realizar mediciones de ultrasonidos diferenciadas no sólo por épocas, sino por subgrupos dentro de un mismo período, de tal manera que se puedan obtener valores adecuados y concordantes en base a la agrupación de piezas de características técnicas similares.

5. CONCLUSIONES

Se ha demostrado la viabilidad del procedimiento propuesto de clasificación cronológica de cerámicas arqueológicas por ultrasonidos en un conjunto de piezas representativo proveniente de yacimientos de la Comunidad Valenciana. En un análisis comparativo utilizando técnicas convencionales de clasificación (análisis lineal discriminante y k-vecinos más próximos) y algoritmos avanzados (mezclas de analizadores de componentes independientes), se ha obtenido un porcentaje de acierto superior al 80% en la clasificación de las piezas en cuatro períodos cronológicos, Edad del Bronce, Ibérico, Romano y Medieval. Los resultados de la aplicación del nuevo procedimiento han sido verificados con información arrojada por análisis de microscopía electrónica, densidad y porosidad, encontrándose correlación entre los parámetros extraídos de las señales ultrasónicas y propiedades físicas de los materiales.

El procedimiento propuesto presenta ventajas con respecto a métodos tradicionales de datación y caracterización de cerámicas arqueológicas. El equipamiento en evaluación no destructiva por ultrasonidos es, en general, menos costoso y los experimentos más fáciles de implementar que en métodos tradicionales. Las piezas no sufren ningún daño durante las pruebas y no es necesario alterar o destruir parte de los materiales analizados. En cuanto al tiempo empleado en el análisis hay diferencias importantes, mientras que el análisis ultrasónico (medida, procesamiento y clasificación automática) de las 480 piezas analizadas ha tomado 10 horas, el análisis SEM (preparación de las probetas, análisis de microscopía electrónica) para 49 piezas ha tomado 137 horas, y el análisis de porosidad (inmersión de las piezas, pesadas) para 80 piezas ha tomado 288 horas.

Existen limitaciones en la aplicación del procedimiento dado que el entrenamiento del clasificador se construye a partir de un conjunto de datos específico. Luego el clasificador queda adaptado a un modelo de datos determinado y su eficiencia restringida a que los nuevos datos presentados para clasificar sigan dicho modelo. Lo anterior significa que el desempeño de la clasificación estaría restringido por el

número y representatividad de las piezas suministradas al clasificador en la etapa de entrenamiento. No obstante, el entrenamiento del clasificador podría irse mejorando paulatinamente al ir incrementando el número de piezas de período cronológico conocido. Con un buen entrenamiento, el clasificador estaría en capacidad de proporcionar una predicción del período cronológico de piezas que no tengan marcadores cronológicos claros. Además se podría utilizar el modo de entrenamiento semisupervisado para modelar la incertidumbre que puedan tener los arqueólogos sobre el conocimiento del período cronológico al que pertenecen las piezas.

El trabajo futuro en esta línea de investigación consistirá en mejorar las prestaciones del sistema clasificador. Con este fin se investigará en los siguientes temas: probar diferentes parámetros extraídos de la señal ultrasónica (incluyendo parámetros de contexto de las cerámicas, tales como, datos del yacimiento, datos geológicos), utilizar y depurar el instrumento de medida propuesto para mejorar las señales adquiridas, aplicar el procedimiento en otros conjuntos de cerámicas arqueológicas, y contrastar los resultados del análisis ultrasónico con diferentes análisis de caracterización/datación como difracción de rayos X y termoluminiscencia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (TEC-2005-01820). Nuestro agradecimiento a los Museos Arqueológicos de Requena, Enguera y Liria por aportar las piezas, y a los arqueólogos Asunción Martínez Valle y Juan José Castellano Castillo por su colaboración, y a la profesora Begoña Carrascosa del Departamento de Restauración y Conservación del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia.

BIBLIOGRAFÍA

- Cheeke, J.D. (2002): *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, CRC Press LLC, USA.
- Choudrey, R., and Roberts, S. (2003): 'Variational Mixture of Bayesian Independent Component Analysers', *Neural Computation* 15(1) 213-252.
- Cohen, L. (1995): *Time-frequency analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Cribbs, R., and Saleh, F. (1996): 'An Ultrasonic Based System Used for Non-destructive Imaging of Archaeological Sites', in: *Informatica ed Egittologia all'inizio degli anni '90*. A cura di Francesco Tiradritti, Bulzoni Editore, Roma, 97-108.
- Duda, R., Hart, P.E., and Stork, D.G. (2000): *Pattern Classification*, 2nd edn, Wiley-Interscience. ciudad
- Hirst, K.K. (fecha de acceso 2007): 'A short course in scientific dating methods', <http://archaeology.about.com/od>.
- Hyvärinen, A., Karhunen, J., and Oja, E. (2001): *Independent Component Analysis*. John Wiley & Sons. ciudad
- Krautkrämer, J. (1990): *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th edn, Springer, Berlin.
- Learned-Miller, E.G., and Fisher, J.W. (2003): 'ICA using spacings estimates of entropy', *Journal of Machine Learning Research*, 4 1271-1295.
- Martínez Valle, A (1995): 'El monumento funerario de La Calerilla de Hortunas (Requena, Valencia)', *AEspA*, 68 259-281
- Martínez Valle, A. (1997): 'Los hornos ibéricos de Las Casillas del Cura (Venta del Moro)', *Recerques del Museo d'Alcoi*, 6 61-69.
- Murray, A., Mecklenburg, M.F., Fortenko, C.M., and Green, R.E. (1992): 'Detection of Delaminations in Art Objects Using Air-Coupled Ultrasound', en *Proceedings of Materials Issues in Art and Archaeology III*, San Francisco CA, 371-378.

- Orton, C. (1997): *La cerámica en la arqueología*, Barcelona, Crítica, ciudad
- Rice, P. (1989): *Pottery analysis: a sourcebook*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Roberts, S., and Penny, W. (2001): 'Mixtures of independent component analysers', *Lecture Notes in Computer Science*, **2130**, 527-534.
- Salazar, A., Igual, J., Vergara, L., and Serrano, A. (2007a): 'Learning Hierarchies from ICA Mixtures', en *20th IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, (fecha del congreso/editorial) Orlando, 1578-1-6.
- Salazar, A., Miralles, R., Parra, A., and Vergara, L. (2006a): 'Ultrasonic Non-Destructive Testing of Archaeological Ceramics', en *9th European Conference on Non-Destructive Testing*, (fecha del congreso/editorial) Berlin, 124:1-8.
- Salazar, A., Miralles, R., Parra, A., Vergara, L., and Gosálbez, J. (2006b): 'Ultrasonic signal processing for archaeological ceramic restoration', en *31st IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, (fecha del congreso/editorial) Toulouse, III-1160-1163.
- Salazar, A., Parra, A., Vergara, L., and Miralles, R., (2007b): 'Ultrasonic-based Method to Sort Archaeological Ceramics', en *International Congress on Ultrasonics*, (fecha del congreso/editorial)Vienna, 1-6.
- Sellers, W.I. (1998): 'Ultrasonic Cave Mapping', *Journal Archaeological Science*, **25** 867-873
- Spaulding, A. C. (1978): 'Artifacts classes, association and seriation'. en *Archaeological essays in honor of Irving B. Rouse*, editado por Robert Dunnell y Edwin Hall. Mouton Publishers, Paris.
- Taylor, R.E, and Aitken, M.J. (1979): *Chronometric dating archaeology*, Plenum Press, New York.
- Vergara, L., Gosálbez, J., Miralles, R., and Bosch, I. (2004): 'On Estimating the Center Frequency of Ultrasonic Pulses', *Ultrasonics*, **42**, 813-818.
- Vergara, L., Salazar, A., Igual, J., and Serrano, A. (2006): 'Data Clustering Methods Based on Mixture of Independent Component Analyzers', en *ICA Research Network International Workshop*, (fecha del congreso / editorial) Liverpool, 127-130.

English version

TITLE: *ultrasonic signal processing for archaeological ceramic classification*

ABSTRACT: *This manuscript presents a new procedure to classify archaeological ceramics, according to their chronology (relative dating) and typology, using ultrasound non destructive testing. The procedure offers important advantages compared to traditional archaeological ceramic characterization methods such as scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction or density and porosity tests that may prove expensive and destructive. The procedure was tested with several archaeological pieces chronologically and typologically known from Requena, Liria and Enguera in the Valencian Community (Spain). The pieces dated back to different periods such as the Bronze Age, to Iberian and Roman periods and to the Middle Ages. The results have been verified with data from optical, SEM, and X-ray diffraction techniques, as well as from physical density and porosity analyses.*

KEYWORDS: *ultrasound non destructive testing, archaeological ceramics, archaeological material classification, relative dating, ceramic typology, physical and chemical testing, density, porosity*