

Contribución de la investigación geológica en la resolución de problemas arqueológicos de las culturas antiguas

Manuel Pozo Rodríguez

Arbor CLXI, 635-636 (Noviembre-Diciembre 1998), 293-310 pp.

En este trabajo se pasa revista a las múltiples aplicaciones de las Ciencias Geológicas en el campo de la Arqueología. Tras un sucinto recorrido por la historia reciente, se han diferenciado por un lado, aquellas aplicaciones geológicas que abordan el estudio del yacimiento y su entorno ambiental. Por otro, los métodos de estudio de materiales, desde la datación hasta la caracterización y establecimiento de sus áreas de procedencia. Especial énfasis se ha puesto en el estudio de las materias primas y cerámicas.

1. Introducción

Las aplicaciones de la Geología y sus técnicas a la Arqueología son muy amplias observándose, finalizada la Segunda Guerra Mundial, un incremento notable en el número de geólogos participando en la resolución de problemas arqueológicos, tanto desde un punto de vista práctico como teórico. Lamentablemente los resultados de estas investigaciones quedaron relegadas a apéndices en informes de excavaciones o como notas técnicas en revistas muy especializadas. Uno de los primeros tratados que recopila diversas técnicas científicas (entre ellas varias geológicas) es el «Science In Archaeology» editado por BROTH-

WELL y HIGG (1969). La amplitud de las aplicaciones geológicas motiva que raramente un libro cubra todas las mismas, quedándose con algunas seleccionadas que suelen incluir las más novedosas para un momento determinado. Así por ejemplo, en el tratado «Archaeological Geology» editado por RAPP y GIFFORD (1985) apenas se cubre el campo de la petrografía lítica y petrología, haciéndose sin embargo un especial énfasis en los aspectos geomorfológicos. La Geología contribuye al esfuerzo arqueológico con métodos, técnicas y conceptos. Los datos obtenidos requieren de un tratamiento estadístico, que en la actualidad se encuentra potenciado por el empleo de los ordenadores.

Acorde a NORTH (1938), el arqueólogo debe familiarizarse con los siguientes aspectos geológicos básicos: a) Interpretación de mapas geológicos. b) Reconocimiento de estructuras pétreas naturales y artificiales. c) Evaluación de la geología del lugar y posibilidad de obtención de materiales litológicos. Estas recomendaciones aún permanecen vigentes.

II. Breve reseña histórica

A lo largo del siglo XIX la investigación geológica y arqueológica se realizó y desarrolló simultáneamente, sencillamente porque hasta ese momento no se habían individualizado como ciencias distintas. Así, existen numerosos testimonios que ponen de manifiesto un solapamiento de la actividad geológica y arqueológica, entre otras causas por el incipiente desarrollo de las mismas. Es a comienzos del siglo XX cuando se produce la definición de sus límites y cometidos, lo que dio lugar a dos ramas bien diferenciadas (GIFFORD Y RAPP, 1985).

El trabajo de PUMPELLY (1908) en el Turkestán puede considerarse como la obra cumbre de la investigación arqueológica antes de los años 50. Este investigador, de gran lucidez, completó su trabajo con numerosas determinaciones científicas entendiendo que éstas eran necesarias para la correcta interpretación de un yacimiento. Pero esta clara visión de futuro que PUMPELLY tenía, no era lo habitual entre los arqueólogos de la primera mitad del siglo XX. Así en el período 1914-1920 hubo un distanciamiento en la participación conjunta de arqueólogos y geólogos. Este hecho fue especialmente relevante en Estados Unidos, considerándose dos las causas que justifican este alejamiento: 1-La arqueología se convierte más en una ciencia social que natural, siendo más frecuente el contacto con la Antropología y Etnografía que con la Geología. 2-Como consecuencia de lo anterior, los

planes de estudios de Arqueología, en esta época, sufren un sesgo hacia los aspectos antropológicos. Lo mencionado se minimizó en Europa y en los estudios de Paleolítico donde arqueólogos y geólogos siguieron colaborando, dada la importancia de las dataciones relativas en dichas investigaciones.

La influencia de los principios geológicos en Arqueología fue siempre mayor en Europa que en Estados Unidos, debido entre otras causas, a la temprana adopción de las técnicas de estratigrafía en las excavaciones.

Un aspecto relevante que sucede a finales del XIX y principios del XX (1890-1910) es la aproximación de la Geografía física-interpretación ambiental a la Arqueología, especialmente en estudios de Prehistoria (SANDFORD 1934).

Desde los años 70 la investigación en la interfase Geología-Arqueología se ha visto fuertemente influenciada en Estados Unidos por la arqueología antropológica. Este hecho ha sido enfatizado por BUTZER (1982) quien ha puesto de manifiesto que, mientras la nueva arqueología aborda campos tan diversos como la etnoarqueología o la simulación por ordenador, el ambiente permanece como una variable pobremente articulada en el análisis del contexto arqueológico.

Respecto a la denominación que debe recibir la disciplina que engloba la investigación geológico-arqueológica existe, como era de esperar, ligeras discrepancias. El ambientalista BUTZER distingue Geoarqueología (Arqueología asistida por la metodología geológica) y Geología arqueológica (Geología con una predisposición de aplicación arqueológica). GLADFELTER (1977, 1981) enfatiza como Geoarqueología el empleo de la Geomorfología y Petrografía sedimentaria para elaborar micro, meso y macroambientes.

Para GIFFORD y RAPP (1985) se puede definir la Geología arqueológica como «la aplicación de los principios y técnicas geológicas a los problemas arqueológicos». Para estos autores la Geología arqueológica y la Geoarqueología son extremos, por lo que se establece una cierta disparidad de criterios entre el de estos autores (más geológicos) y el de BUTZER más ecologista.

En España, el conjunto de técnicas experimentales físicas, químicas, biológicas o geológicas, aplicadas a problemas arqueológicos (estudio, tratamiento, conservación y restauración de bienes culturales), se incluyen dentro de la Arqueometría. Este término por lo tanto tiene un carácter interdisciplinar de rango mayor, abarcando métodos de prospección, identificación de materiales orgánicos e inorgánicos, datación y reconstrucción paleoambiental.

III. El estudio del yacimiento y su entorno

3.1. *Criterios geomorfológicos: mapas temáticos*

El objetivo principal de un estudio geomorfológico en un proyecto arqueológico es la reconstrucción de los ambientes originales. La asociación más próxima entre la Arqueología y la Geomorfología se produce, lógicamente, en áreas geográficas que se han desarrollado principalmente en tiempos del Pleistoceno y Holoceno (de JONG 1967).

La contribución de la Geomorfología en un proyecto arqueológico se recoge con todo detalle en DAVIDSON (1985). La base de un estudio geomorfológico es la elaboración de un mapa del yacimiento y de sus alrededores. Esta cartografía mostrará elementos como la red de drenaje, formas del terreno, rasgos tectónicos, la naturaleza de los depósitos superficiales (incluyendo suelos) y la existencia de procesos geomorfológicos activos. Este mapa se realiza mediante el estudio fotogeológico a partir de pares estereográficos de fotos aéreas verticales de la zona (recientemente también con métodos de teledetección), complementadas con el trabajo de campo sobre un soporte topográfico. La información del mapa geomorfológico, de carácter planimétrico, debe complementarse con el estudio en la vertical de los asentamientos excavados y de las unidades geológicas del entorno. En este sentido, el empleo de criterios estratigráficos será de gran importancia en la comprensión de la evolución vertical y lateral del yacimiento considerado, así como del muestreo estratificado de sus restos (HARRIS, 1979).

En el mapa se puede incluir la posición de los yacimientos arqueológicos y si es posible datos cronológicos, hecho éste bastante factible si los yacimientos se encuentran asociados a depósitos fluviales-aluviales (DAVIDSON 1971). Incluso se puede realizar una aproximación ecológica añadiendo vegetación y suelos, es decir identificando microambientes al asociar unidades geomorfológicas, suelos y vegetación (COE y FLANNERY 1964). En este sentido, HASSAM (1985) ha enfatizado la importancia del análisis paleoambiental (reconstrucción del paisaje y del paleoclima) como complemento primordial de los objetivos arqueológicos. Éste se realizaría a partir de criterios estratigráficos y sedimentológicos que incluirían el estudio de paleosuelos y el análisis del polen, fauna y plantas.

Los mapas geomorfológicos detallados pueden ser muy complicados y difíciles de entender para el arqueólogo, por lo que se tiende a la realización de varios mapas temáticos que recojan uno o varios aspectos relevantes para la interpretación arqueológica, mostrando las varia-

ciones del terreno que podrían haber tenido influencia en las comunidades del pasado. En el estudio de la interacción de una comunidad con el ambiente los mapas más interesantes son aquellos que incluyen el espesor del suelo, el contenido en rocas (pedregosidad) y la pendiente del terreno.

Los rasgos geomorfológicos de los lugares arqueológicos se asocian básicamente a los siguientes ambientes sedimentarios: fluvial, costero, desiertos y cuevas. Las zonas más interesantes, por la cantidad de yacimientos asociados, son aquellas con ambientes fluviales o costeros (mar o lagos). En estos últimos adquiere gran relevancia las modificaciones morfológicas que se producen como resultado de la evolución erosivo-deposicional de la costa, así como de las variaciones del nivel de base. Los movimientos isostáticos pueden ser de gran importancia en la recuperación de terreno en el continente y por lo tanto del desarrollo de asentamientos en áreas que antes se encontraban cubiertas por las aguas (KRAFT et al, 1985).

Evidencias de cambios ambientales en zonas desérticas se pueden obtener de secuencias costeras de lagos, cuencas de deflación, depósitos fluviales y sobre todo de la presencia de dunas. Un excelente ejemplo de trabajo geomorfológico e interpretación paleoambiental en zona árida es el realizado por GEBEL et al (1989) en el Emirato Árabe de Abu Dhabi.

Una vez que la distribución del yacimiento se ha establecido, los procesos geológicos pueden ejercer otra influencia, en la que los modelos de erosión y depósito pueden conducir a la removilización o enterramiento del mismo. Éste puede ser un problema importante en áreas que han sufrido cambios geomorfológicos acusados a lo largo de su ocupación. Aunque inicialmente se podría pensar, que en una zona con evidencias de erosión intensa los yacimientos asociados deberían haberse perdido, varias investigaciones han puesto de manifiesto la invalidez de esta afirmación. Los asentamientos realizados por nuestros antepasados no se ubicaban en cualquier lugar, según ha observado TASKER (1980) en yacimientos del Egeo y de Bretaña. En esta misma línea el trabajo, WISE et al (1982) en el sur de España ha puesto de manifiesto una predisposición a la ubicación de asentamientos en zonas planas con unas condiciones de estabilidad geomorfológica.

El empleo del mapa geomorfológico y de los estudios estratigráficos en Arqueología permite la obtención de datos que se pueden interpretar como cambios ambientales o de distribución de elementos (estructurales o no), del yacimiento y su entorno. En cualquier caso hay que tener en cuenta que lo que se cartografía en un mapa geomorfológico es el

aspecto actual y no el del pasado, que puede ser similar o muy distinto en función del tiempo transcurrido y sobre todo de los procesos geológicos (exógenos y/o endógenos) sucedidos desde entonces. Afortunadamente en muchos casos, con la ayuda de criterios stratigráficos y sedimentológicos se pueden realizar mapas de reconstrucción paleogeográfica que permiten, por ejemplo, trazar la posición de una antigua línea de costa.

3.2. Métodos geofísicos para el estudio de la estructura y distribución de un yacimiento

En los últimos 40 años un gran número de técnicas geofísicas se han aplicado a objetivos arqueológicos, una revisión de los diversos métodos geofísicos empleados en Arqueología se recoge en TITE (1972). Es de destacar que básicamente las propiedades analizadas en rocas o sedimentos son de tipo magnético, eléctrico o elástico. La prospección geofísica, coordinada en un programa arqueológico, suministra una información muy valiosa para la planificación y ejecución del mismo.

En Arqueología se han utilizado dos tipos de técnicas geofísicas:

1.—Pasivas. Las medidas se realizan sobre campos de fuerza existentes, por lo que no hay que emplear instrumentos generadores de señales, sino medidores. Los resultados se interpretan como rasgos subsuperficiales que perturban ese campo. (Medidas térmicas, magnéticas y de gravedad).

2.—Activas. Las señales se generan instrumentalmente pasando a través de la subsuperficie para después ser detectadas y registradas. (Métodos sísmicos, electromagnéticos, de resistividad y de radar de penetración subterránea).

En WEYMOUTH y HUGGINS (1985) se describen los dos métodos convencionales más utilizados: la prospección magnética y la eléctrica de resistividades. El método magnético es más rápido y fácil de interpretar, pero no se puede utilizar en zonas con edificios o tendidos eléctricos porque provocan serias interferencias. Se basa en la existencia de anomalías en las propiedades magnéticas de los suelos, que pueden estar en relación con la actividad humana, se incluyen: restos de fuegos, descomposición húmica por compactación o introducción de estructuras. Este método de prospección es independiente de la humedad del suelo, pero no da buenos resultados si una estructura esta constituida por el mismo material que el de su entorno, y por consiguiente, con el mismo comportamiento magnético. Se emplea con buenos resultados

para determinar la geometría de los asentamientos y de sus construcciones enterradas.

El método de resistividad, por su parte, es más lento y algo más complicado de interpretar pero esta libre de interferencias de edificios y líneas de tensión. Responde a diferencias en la conductividad eléctrica del suelo que pueden deberse, entre otras causas, a alteraciones del suelo natural por la construcción de montículos, zanjas, por compactación o por la introducción de estructuras. Este método de prospección depende fundamentalmente de la humedad del suelo y del contraste de porosidad entre la estructura y su entorno; la permeabilidad, el contenido iónico y la temperatura también influyen.

Como todos los métodos de control remoto no son destructivos y si se aplican correctamente son menos costosos que la prospección mediante catas. Estos métodos son de gran ayuda antes de empezar una excavación, cuando sólo se tiene indicios, o durante la excavación en estructuras complejas.

4. El estudio de los materiales del yacimiento

4.1. Aplicación de algunos métodos de datación en Arqueología

Se incluyen aquí algunos de los métodos de datación absoluta mas directamente relacionados con materiales geológicos (Arqueomagnetismo y Tefrocronología) o con cerámicas (Termoluminiscencia).

La emisión de luz que se produce cuando un mineral es calentado, después de haber sido sometido a una radiación ionizante, se denomina termoluminiscencia (TL). Los principios y aplicación de la datación de cerámicas mediante termoluminiscencia se recogen en AITKEN (1985) y ARRIBAS et al (1989). Comparando las intensidades de termoluminiscencia inducida en el laboratorio (mediante dosis conocidas de irradiación) con la termoluminiscencia natural, procedente de isótopos radiactivos del mineral y su entorno (U-235, U-238, Th-232, K-40, entre otros), se puede calcular la dosis equivalente a la radiación natural recibida. El fundamento de la datación de cerámicas se basa en que la termoluminiscencia permite la datación absoluta del último suceso térmico que ha sufrido un mineral, así la dosis total acumulada desde la cocción de la cerámica esta en relación con la intensidad de emisión de termoluminiscencia y a partir de ésta se puede establecer la edad absoluta de su cocción. El rango de edad de esta técnica es de hasta

1 millón de años, con una fiabilidad de los resultados entre el 5-8% (ARRIBAS 1990).

Otro método de datación es la tefrocronología (STEEN-McINTYRE 1985). Entendiéndose por tefra los fragmentos sólidos (cristales, roca y vidrio) lanzados subaereamente durante una erupción volcánica. Para los arqueólogos una capa de tefra (generalmente cenizas) representa un excelente plano de referencia en el espacio y en el tiempo. La datación absoluta se puede realizar por métodos radiométricos K/Ar (sanidina, leucita, mica) (DALRYMPLE y LANPHERE 1969) o por huellas de fisión (circón, vidrio) (NAESER et al. 1980).

La datación mediante arqueomagnetismo se basa en la magnetización de partículas en un momento del pasado cuando fueron calentadas, modificadas químicamente o depositadas. Esta magnetización se puede utilizar para datación relativa y absoluta de artefactos, con una precisión de ± 25 años para materiales formados de esa manera en los últimos 2000-3000 años (TARLING 1985).

4.2. *Identificación de materiales naturales y de sus áreas de procedencia*

Uno de los campos de la Geología aplicada a los estudios arqueológicos, donde se han recogido mayores éxitos con mínima controversia, ha sido el estudio de materiales con el fin de establecer su área de procedencia. Uno de los precursores fue DAMOUR (1865) quien realizó una descripción de las características macroscópicas y de propiedades físico-químicas de hachas de piedra, poniendo de manifiesto las dificultades encontradas para el correcto establecimiento de la procedencia de la mayoría de las rocas comunes y cómo sólo en algunas, por sus características «de visu», es posible establecer su origen. Es importante indicar que DAMOUR desconocía el empleo del microscopio de luz polarizada (petrográfico) para el estudio textural y mineralógico de minerales y rocas. En este sentido es de destacar a finales del siglo XIX el establecimiento de áreas de procedencia de esculturas griegas, mediante estudio petrográfico, llevado a cabo por WASHINGTON (1898). Este autor también puso de manifiesto la complejidad de establecer la procedencia de una roca, al observar que en una misma cantera se puede presentar una amplia variedad de texturas, estructuras y mineralogías.

En los estudios de procedencia de materiales líticos, debe realizarse en primer lugar, la correcta identificación del material (mineral o roca)

considerado. En este sentido el estudio de su textura y mineralogía mediante microscopía de luz polarizada (SHELLEY 1985) y/o difracción de rayos X (DRX) (MOORE y REYNOLDS 1989) suele ser más que suficiente. La determinación del área de procedencia es una cuestión más compleja, y salvo excepciones notables (especialmente interesantes son aquellas rocas conteniendo fósiles), se hace necesario el empleo de otras técnicas analíticas que permitan discriminar entre materiales con texturas y mineralogías similares. Un ejemplo de identificación de un área de procedencia con técnicas petrográficas, se recoge en THOMAS (1923), quien fue capaz de establecer que las rocas azuladas (doleritas) que constituyen el complejo megalítico de Stonehenge, procedían de las montañas Prescelly (Gales).

Un ejemplo de técnica más sofisticada se muestra en el trabajo de HEIZER et al (1973), estableciendo con éxito la procedencia de las cuarcitas que componen los colosos de Memnon, próximos a Tebas (Egipto). Empleando análisis de elementos traza mediante activación neutrónica, descubrió que procedían de la cantera de Gebel el Ahnan distante 676 Km Nilo abajo y no como podría suponerse de la más cercana de Aswan 200 Km aguas arriba del río.

Aunque según el material considerado la técnica analítica puede variar, RAPP (1985) ha puesto de manifiesto que las mejores «huellas dactilares» en los estudios de procedencia de materias primas, lo suministran el análisis «cluster» de los datos de elementos traza y del estudio de isótopos estables.

En el estudio de mármoles griegos, HERTZ (1985) observó un excelente resultado al emplear el análisis isotópico $\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$ como complemento de la petrografía. El empleo de los elementos traza, sin embargo, resultó poco satisfactorio.

En el estudio de obsidias se han obtenido buenos resultados mediante isótopos, elementos traza ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Rb) (GALE 1981) y termoluminiscencia (HUNTLEY y BAILEY 1978). En materiales silíceos (chert/flint) se ha aplicado con éxito los elementos traza (DE BRUIN et al 1972). Mientras que en el estudio de serpentinitas y rocas «jabonosas» asociadas se han observado buenos resultados con elementos del grupo de las tierras raras (ALLEN y PENNELL 1977).

Menos éxitos se han obtenido en la identificación de áreas fuente de metales, en buena parte por la problemática de su refundido y aleación, que enmascara la composición inicial de elementos traza característicos (TYLECOTE et al 1977). El metal más estudiado ha sido el cobre y aleaciones de este metal, habiéndose obtenido buenos resultados en el estudio con elementos traza de muestras precolombinas

de Estados Unidos (RAPP et al 1984). En el caso de plomo y plata el empleo de análisis isotópico de plomo y de elementos traza ha sido satisfactorio (GENTNER et al 1978, STOS-GALE y GALE 1982). Finalmente, con oro y estaño, metales también importantes en la antigüedad, no se han obtenido tan buenos resultados (MEEKS y TITE 1980), (RAPP 1979).

La cantidad de minerales empleados por las culturas antiguas para diversos fines son incontables y sus procedencias diversas (autóctonas, alóctonas), variando desde minerales gema como el lapislázuli o la turquesa (SIGLEO 1975) a minerales empleados en pigmentos y cosmética como la huntita (BARBIERI et al 1974) y la galena (HASSAN y HASSAN 1981).

El estudio mineralógico, geoquímico, petrológico y textural de los materiales arqueológicos no sólo tiene aplicación en la caracterización de las materias primas empleadas y su posible origen. También en diagnosticar si sufren fenómenos de alteración y en qué grado, sus causas y determinar las posibles soluciones. Es decir, tiene también una aplicación importante en la conservación del patrimonio arqueológico y cultural.

4.3. *Estudio petrográfico, mineralógico y químico de materiales cerámicos*

En el estudio composicional de una cerámica antigua es conveniente diferenciar la pasta cerámica de los aditivos superficiales. Dentro de la pasta cerámica se incluye la pasta arcillosa (responsable de su plasticidad) cocida y el desgrasante (aumenta la porosidad de la pasta) que consta de inclusiones (>80 µm) de origen mineral, vegetal y/o artificial. Además del cuerpo principal de la cerámica hay que tener en cuenta los constituyentes empleados como aditivos superficiales. El más común es la pintura de composición mineral que con uno o varios colores embellece la cerámica, también se incluyen aquí las películas arcillosas finas que se aplican en la superficie de la vasija con el fin de eliminar las irregularidades de la misma (slips).

Estos elementos diferenciados en la cerámica motivan que el estudio analítico de las mismas (pastas y pinturas) se haga por separado, debiéndose extremar el procedimiento de muestreo de las mismas. Los resultados de dichos estudios permiten realizar consideraciones de tipo cultural, así desde el punto de vista de interpretación arqueológica se puede:

a) Caracterizar y clasificar cerámicas fabricadas en regiones geográficas diferentes y/o en épocas distintas.

b) Establecer las técnicas empleadas en la fabricación de las cerámicas. En el caso de las denominadas «cerámicas de cocinar» es de gran importancia el equilibrio entre la temperatura de cocción, la proporción de desgrasante y el grosor de la cerámica. (LE MIERE y PICON 1994).

c) Identificar las materias primas empleadas y sus áreas de procedencia.

De la descripción petrográfica (microscopio de polarización) de las cerámicas en lámina delgada, se puede obtener una abundante información, que resuelve parcialmente la clasificación y técnicas de fabricación de las cerámicas. En el estudio mineralógico la técnica más empleada es la difracción de rayos X, permitiendo la identificación y cuantificación de los constituyentes cristalinos de la muestra. Siendo especialmente útil en el reconocimiento de fases minerales de muy pequeño tamaño (<20 μm), como las asociadas a la pasta de la cerámica. La asociación mineralógica encontrada en la cerámica permite establecer las temperaturas de cocción y junto al quimismo de la muestra, identificar las áreas fuente de las materias primas.

El empleo del análisis químico de elementos traza es fundamental para determinar que materias primas se han utilizado en la elaboración de la cerámica, siendo el método más adecuado (por su carácter no destructivo) el análisis por activación neutrónica (RAPP 1985). En este sentido MAGALOUSIS et al (1980) consideran importante establecer la asociación característica de elementos traza de cada una de las unidades geológicas (dato importante de referencia para los artefactos). Asimismo, determinar las fuentes antiguas de las arcillas para cada unidad geológica o región geográfica, estableciendo además si han sido modificadas por las condiciones ambientales. Finalmente, con los datos anteriores, interpretar si las arcillas fueron o no comercializadas intra o interculturalmente (DAVIDSON y McKERRELL 1976).

En el empleo del análisis químico en cerámicas se supone que el quimismo de las muestras no sufre otra alteración que la producida por la pérdida de agua, OH^- y CO_2 durante la cocción, y por lo tanto representa el quimismo de las materias primas empleadas (RICE 1982). Sin embargo hay dos circunstancias a tener en cuenta a la hora de interpretar los resultados: 1) Durante el enterramiento el material puede sufrir importantes modificaciones en su mineralogía y en su quimismo, participando de forma especial la hidrólisis (NUÑEZ et al 1991). Estas reacciones hidrolíticas se ven favorecidas en el caso de

cerámicas sobrecocidas (PICON 1991). 2) Los alfareros alteran de alguna manera esta composición, al añadir a las pastas distintos aditivos, modificando su quimismo original en mayor o menor grado.

Algunos autores han empleado la microscopía electrónica de barrido (MEB) para observar la microfábrica de los distintos tipos de arcillas a diferentes temperaturas de cocción (TITE y MANIATIS 1975). Ocasionalmente también para el reconocimiento de algunas fases como la mullita, en piezas sobrecocidas (KAMILLI y STEINBERG 1985), o la composición de las pinturas (STEINBERG y KAMILLI 1990).

El empleo conjunto de varias de estas técnicas básicas, complementadas con un tratamiento geoestadístico adecuado, ha reportado excelentes resultados. (CAPEL et al 1986, GALLART et 1991, VENDRELL-SAZ et al 1992, POZO et al 1996, entre otros).

El establecer cual es el área fuente de la arcilla y su muestreo, permite reproducir en el laboratorio la elaboración de la cerámica, trabajando a distintas temperaturas. Mediante el estudio mineralógico de los resultados se puede establecer, con bastante precisión, las temperaturas de cocción y las condiciones empleadas por los alfareros en el pasado.

Estudio de las pinturas

El estudio mineralógico de las pinturas permite reconocer minerales que aportan color (a veces diluidos con arcilla) y/o propiedades fundentes. Así, en pinturas de la cultura Halaf STEINBERG y KAMILLI (1990) identifican diversos óxidos de hierro (hematites, maghemita, magnetita) y mas raramente de manganeso (pirolusita). Dependiendo del tamaño de los cristales de óxidos de hierro los alfareros obtenían un aspecto mate o brillante.

En las pinturas los puntos de fusión y recristalización se alcanzan antes en condiciones reductoras que oxidantes, actuando algunos elementos como fundentes (potasio en la cerámica Halaf, o del sodio y plomo en las cerámicas bizantinas). El FeO y el CaO también pueden actuar como fundentes a altas temperaturas (SHEPARD 1954). Estos agentes fundentes pueden estar presentes en la mezcla de pintura de forma natural o ser añadida por los alfareros. Ocasionalmente, el estudio mineralógico de la pintura confirma la existencia de sobrecocción en algunas cerámicas. Es el caso de la cerámica Ubaid estudiada por KAMILLI y STEINBERG (1985), la presencia de pseudbrookita, cromita y silicatos verdes en la pintura les permitió inferir condiciones reductoras y temperaturas superiores a los 900°C.

Estudio de las pastas

Las características mineralógicas y químicas de las pastas cerámicas van a depender básicamente de las materias primas empleadas y de las temperaturas de cocción aplicadas. Generalmente, en las cerámicas antiguas estudiadas, es posible reconocer petrográficamente un conjunto de minerales que no han sido afectados por el tratamiento térmico y que corresponden a constituyentes del desgrasante. En función de la región geológica, predominaran minerales silicatados félsicos (cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico) o máficos (piroxenos, olivino, anfíboles), incluso si las temperaturas de cocción no han sido muy elevadas se pueden detectar carbonatos (calcita y/o dolomita).

En el estudio mineralógico de los constituyentes más pequeños de la pasta cerámica (<80 μm) se hace necesario el empleo de la difracción de rayos X (DRX). La mineralogía encontrada se va a corresponder con la de la arcilla original empleada, transformada por el tratamiento térmico y por el desarrollo de diversas reacciones que conducen a la neoformación de fases de alta temperatura y de vidrio (CAPEL et al 1985).

La arcilla empleada en la elaboración de la cerámica esta constituida por filosilicatos, fundamentalmente illita y caolinita, y más raramente en baja proporción clorita y esmectita. Las modificaciones que sufren estos minerales cuando se someten a temperaturas crecientes se recogen en BRINDLEY y LEMAITRE (1987), destacando la baja temperatura de destrucción de la red en la caolinita (550°C) y algo mayor en el resto de los filosilicatos (700-850°C).

El empleo de temperaturas de cocción superiores a 800°C da lugar al desarrollo de fases de neoformación características (HEIMANN 1982, MAGGETTI 1982). Fases de alta temperatura (neoformación) frecuentes en cerámicas son: anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), hematites (Fe_2O_3), gehlenita ($\text{CaAl}_2\text{SiO}_7$), diópsido ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), wollastonita (CaSiO_3) y más raramente enstatita (MgSiO_3) y mullita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$). La presencia en las pastas cerámicas de estas fases de alta temperatura nos ofrece información sobre la composición inicial del material sometido a cocción y de la temperatura alcanzada.

La ausencia de gehlenita, diópsido o wollastonita y la presencia de hematites en cantidades importantes es indicativa de una materia prima libre de carbonatos. Esto justifica la tonalidad amarillenta de las cerámicas ricas en calcita, donde los oxidos de hierro muestran un pobre desarrollo al incorporase este metal a la estructura de la gehlenita (MANIATIS et al. 1983). Por otra parte, la existencia en la

pasta cerámica de abundante calcita (no ligada a carbonatación durante el enterramiento) o gehlenita nos indica temperaturas de cocción inferiores o superiores a los 800°C respectivamente. La desaparición de illita-mica y abundancia de dióxido, wollastonita o plagioclasa indica temperaturas entre 900-1000°C. En general, las muestras ricas en calcita dan durante la cocción wollastonita y gehlenita, neoformándose además dióxido o enstatita si el carbonato es dolomita.

Algunos investigadores (BARAHONA et al 1985) han obtenido una ecuación para estimar la temperatura de cocción en aquellas cerámicas desarrolladas a partir de arcillas calcáreas:

$$T^{\circ}\text{C} = 675,71 - 0,92 \% \text{ filossilicatos} + 5,36 \% \text{ cuarzo} + 10,41 \% \text{ plagioclasa} + 1,21 (\% \text{ gehlenita} + \% \text{ dióxido} + \% \text{ wollastonita}).$$

Algunas de las reacciones que conducen a la formación de estos minerales se muestran a continuación

(CAPEL et al 1985):

- 1) $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{CaCO}_3 \rightleftharpoons 3 \text{CaAl}_2\text{SiO}_7 + 6 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + 3 \text{SiO}_2$
(illita) (calcita) (gehlenita)
- 2) $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{CaCO}_3 \rightleftharpoons 3 \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 3 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$
(illita) (calcita) (anortita)
- 3) $2 \text{SiO}_2 + \text{CaCO}_3 \rightleftharpoons 3 \text{CaSiO}_3 + 3 \text{CO}_2$
(cuarzo) (calcita) (wollastonita)
- 4) $2 \text{SiO}_2 + \text{MgCa}(\text{CO}_3)_2 \rightleftharpoons \text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + 2 \text{CO}_2$
(cuarzo) (dolomita) (dióxido)
- 5) $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 2\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightleftharpoons \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{CaAl}_2\text{SiO}_7 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
(illita) (calcita) (cuarzo) (fto.K) (gehlenita)
- 6) $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{CaCO}_3 + 2\text{SiO}_2 \rightleftharpoons \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
(illita) (calcita) (cuarzo) (fto.K) (anortita)
- 7) $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{MgCa}(\text{CO}_3)_2 + 3\text{SiO}_2 \rightleftharpoons \text{CaAl}_2\text{SiO}_7 + 2\text{MgSiO}_3 + \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 4\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
(illita) (dolomita) (gehlenita) (enstatita) (fto.K)

Durante el desarrollo de las reacciones que dan lugar a la neoformación de fases de alta temperatura se puede pasar por un estadio inicial pre-cristalino, de carácter amorfo. Este hecho tiene relevancia hasta que se superan los 800°C, temperatura a partir de la cual tienden a desaparecer al formarse por recristalización nuevas fases. Por consiguiente y en función de la temperatura aplicada en la elaboración de la cerámica se pueden producir en diversa proporción fases amorfas (vidrios). Si estos constituyentes no se tienen en consideración se pueden cometer errores importantes a la hora de cuantificar, mediante DRX, la composición mineralógica de una cerámica. Para solventar este problema, HUERTAS et al (1991) han propuesto un método para evaluar el contenido en fases amorfas y cristalinas en muestras de cerámicas.

V. Consideraciones finales

Como se ha expuesto de forma muy sintética a lo largo de este trabajo, los métodos y técnicas empleados en Geología, no sólo son aplicables sino necesarios, en los estudios arqueológicos. Algunos procedimientos son estrictamente geológicos y su metodología de trabajo perfectamente establecida (Geomorfología, Estratigrafía, Mineralogía, Petrología). En otros casos, especialmente en el empleo de las técnicas más sofisticadas, los procedimientos son de carácter químico (Geoquímica) o físico (Geofísica). Son estas técnicas en continua renovación, junto al empleo de la Teledetección, las que tienen un futuro más prometedor en relación con los objetivos arqueológicos.

VI. Bibliografía

- AITKEN, M.J. (1985): *Thermoluminescent Dating*. Academic Press. London.
- ALLEN, R.O. y PENNELL, S.E. (1977): *Rare earth element distribution patterns to characterize soapstone artefacts*. En: *Archaeological chemistry II*. págs. 230-257. (G. Carter, Editor). *Advances in Chemistry Series n° 171*. American Chemical Society, New York.
- ARRIBAS, J.G., MILLAN, A., SIBILIA, E. y CALDERÓN, T. (1990): Factores que afectan en la determinación del error asociado a la datación absoluta por TL: fábrica de ladrillos. *Bol. Soc. Española de Mineralogía*, 13: 141-147.
- ARRIBAS, J.G., CALDERÓN, T. y BLASCO, C. (1989): Datación absoluta por Termoluminiscencia: un ejemplo de aplicación arqueológica. *Trabajos de Prehistoria* 46: 231-246.
- BARAHONA, E., HUERTAS, F., POZZUOLI, A. y LINARES, J. (1985): Firing Properties of Ceramic Clays from Granada Province, Spain. *Miner. Petrogr. Acta* 29A: 577-590.
- BARBIERI, M., CALDERON, G., CORTESI, C. y FORNASERI, M. (1974): Huntite, a mineral used in antiquity. *Archaeometry* 16: 211-220.
- BRINDLEY, G.W. y LEMAITRE, J. (1987): Thermal, Oxidation and Reduction Reactions of Clay Minerals. En: *Chemistry of Clays and Clay Minerals*. págs. 319-370. *Mineralogical Society n° 6*. Longman Scientific and Technical, New York.
- BROTHWELL, D y HIGGS, E (Editores) (1969): *Science in Archaeology*. Thames & Hudson.
- BUTZER, K.W (1982): *Archaeology as human ecology*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- CAPEL, J., HUERTAS, F. y LINARES, J. (1985): High temperature reactions and use of Bronze Age pottery from La Mancha, Central Spain. *Miner. Petrogr. Acta*. 29A, 563-575.
- CAPEL, J., YAÑEZ, J., HUERTAS, F. y LINARES, J. (1986): Elementos traza en cerámicas de la Edad del Bronce. *Bol. Soc Española de Mineralogía* 9: 185-192.
- COE, M.D y FLANNERY, K.V (1964): Microenvironments and Mesoamerican prehistory. *Science* 143: 650-654.
- DALRYMPLE, G.B. y LANPHERE, M.A. (1969): *Potassium argon dating: Principles, techniques and applications to geochronology*. W.H. Freeman, San Francisco.

- DAMOUR, A. (1865): Sur la composition des haches en pierres trouvés dans les monuments celtique et chez les thibus sauvages. *Comptes rendus Academie des Sciences*, Paris. 63: 1038-1050.
- DAVIDSON, D.A. (1971): Geomorphology and prehistoric settlement of the Plain of Drama. *Revue de géomorphologie dynamique* 20: 22-26.
- DAVIDSON, D.A. (1985): *Geomorphology an Archaeology*. En: *Archaeological Geology* (G.Rapp y J.A. Gifford, Editores). págs 25-55. University Press, New Haven and London.
- DAVIDSON, T. & MCKERRELL, H. (1976): Pottery analysis and Halaf period trade in the Khabur headwaters region. *Irak* 38, 45-56.
- DE BRUIN, M.P., KORTHOVEN, J.M, BAKELS, C.C y GROEN, C.A. (1972): The use of non-destructive activation analysis and pattern recognition in the study of flint artefacts. *Archaeometry* 14: 55-63.
- DE JONG, J. (1967): *The Quaternary of the Netherlands*. En: *The Quaternary*, vol.2, págs. 302-426. (K.Rankama, Editor). John Wiley and Sons, New York.
- GALE, N.H. (1981): Mediterranean obsidian source characterization by strontium isotope analysis. *Archaeometry* 23: 41-51.
- GALLART, M.D., MATA, M.P y LOPEZ-AGUAYO, F. (1991): La DRX y el análisis de imagen en el estudio de cerámicas arqueológicas. Aplicación a las cerámicas neolíticas de Alonso Norte (Alcañiz, Teruel). *Bol. Soc. Española de Mineralogía* 14: 79-88.
- GEBEL, H.G., HANNS, C., LIEBAU, A. y RAEHLE, W. (1989): The late Quaternary Environments of Ain al Faidha / Al-Ain Abu Dhabi Emirate. *Archaeology in the United Arab Emirates* 5: 9-48. Al-Ain Department of Antiquities.
- GENTNER, W., MÜLLER, O., WAGNER, G.A. y GALE, N.H. (1978): Silver sources of Archaic Greek coinage. *Naturwissenschaften* 65: 273-284.
- GIFFORD, J.A. y RAPP, G. (1985): *History, Philosophy, and Perspectives*. En: *Archaeological Geology* (G.Rapp y J.A. Gifford, Editores). págs. 1-23. New Haven and London, University Press.
- GLADFELTER, B.G (1977): Geoarchaeology: The geomorphologist and archaeology. *American Antiquity* 42: 519-538.
- GLADFELTER, B.G (1981): *Developments and directions in geoarchaeology*. En *Advances in archaeological method and theory*, vol. 4. ed. M.B. Schiffer, Academic Press, New York.
- HARRIS, E.C. (1979): The laws of archaeological stratigraphy. *World Archaeology* 11: 111-117.
- HASSAM, F.A. (1985): *Paleoenvironments and Contemporary Archaeology: A Geoarchaeological Approach*. En: *Archaeological Geology* (G.Rapp y J.A. Gifford, Editores). págs. 85-102. University Press, New Haven and London.
- HASSAN, A.A. y HASSAN, F.A. (1981): Source of galene in predynastic Egypt at Nagada. *Archaeometry* 23: 77-82.
- HEIMANN, R.B. (1982): *Firing Technologies and Their Possible Assessment by Modern Analytical Methods*. En: *Archaeological Ceramics*. pp.89-108. (J.S. Olin y A.D. Franklin, Editores). Smithsonian Institution, Washington.
- HEIZER, R.F., STROSS, F., HESTER, T.R., ALBEE, A., PERLMAN, I., ASARO, F. y BOWMAN, H. (1973): The Colossi of Memnon revisited. *Science* 182: 1219-1225.
- HERTZ, N. (1985): *Isotopic Analysis of Marble*. En: *Archaeological Geology* (G.Rapp y J.A. Gifford, Editores). págs 331-351. University Press, New Haven and London.

- HUERTAS, J., HUERTAS, F., LINARES, J. (1991): Evaluación de las fases no cristalinas en cerámicas arqueológicas por DRX. *Bol. Soc. Española de Mineralogía* 14: 71-78.
- HUNTLEY, D.J. y BAILEY, D.C. (1978): Obsidian source identification by thermoluminescence. *Archaeometry* 20: 159-170.
- KAMILLI, D.C. y STEINBERG, A. (1985): *New Approaches to Mineral Analysis of Ancient Ceramics*. En: *Archaeological Geology* (G.Rapp y J.A. Gifford, Editores). págs 313-330. University Press, New Haven and London.
- KRAFT, J., KAYAN, I. y ASCHENBRENNER, S.E. (1985): *Geological Studies of Coastal Change Applied to Archaeological Settings*. En: *Archaeological Geology* (G.Rapp y J.A. Gifford, Editores). págs 57-84. University Press, New Haven and London.
- LE MIERE, M. y PICON, M. (1991): *Early neolithic pots and cooking*. En: *Handwerk und Technologie im Alten Orient*. págs. 67-70. (R.F. Wartke, Editor). Verlag Philipp von zabern. Mainz.
- MAGALOUSIS, N.M, FLINT, A.,GRITTON, V., MILLER, G.E. (1980): Sourcing techniques for ceramics and soils at Terqa and related sites. *Monographic Journals of the near East SMS* 3: 169-200.
- MAGGETTI, M. (1982): *Phase analysis and its significance for tecnology and origin*. En: *Archaeological Ceramics*. pp.121-233. (J.S. Olin y A.D. Franklin, Editores). Smithsonian Institution, Washington.
- MANIATIS, Y.A., SUMOPOULOS, A., KOSTIKAS, A. Y PERDIKATIS, V. (1983): Effect of reducing atmosphere on minerals and iron oxides developed in fired clays: The Role of Calcium. *Journal of the American Ceramic Society* 66(11): 773-781.
- MEEKS, N.D. y TITE, M.S. (1980): The analyses of platinum-group element inclusions in gold antiquities. *Journal of Archaeological Science* 7: 267-275.
- MOORE, D.M. y REYNOLDS, R.C. (1989): *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford University Press, Oxford.
- NAESER, C.W., IZETT, G.A y OBRADOVICH, J.D. (1980): Fission track and K-Ag ages of natural glasses. *U.S. Geological Survey Bulletin* n° 1489.
- NORTH, F.J. (1938): *Geology for archaeologists*. *Archaeological Journal* 94: 73-115.
- NUÑEZ, R., CAPEL, J. y REYES, E. (1991): Hidrolisis de materiales cerámicos. Estudio preliminar. *Bol. Soc. Española de Mineralogía*, 14: 89-94.
- PICON, M. (1991): Quelques observations complementaires sur les alterations de composition des ceramiques au cours du temps: cas de quelques alcalins et alcalino-terreux. *Revue d'Archeométrie*, 15, 117-126.
- POZO, M., CASAS, J., MORENO, A y MARTÍN RUBÍ, J.A. (1996): Estudio mineralógico, textural y químico de restos de cerámica Halaf en el valle del río Balih (Norte de Siria). *Bol. Soc. Española de Mineralogía* 19: 85-99.
- PUMPELLY, R (1908): *Explorations in Turkestan (expedition of 1904): Prehistoric civilization of Anau, origins, growth and influence of environment*. 2 vols. Carnegie Institution, Washington.
- RAPP, G y GIFFORD, J.A. (1985): *Archaeological Geology*. *American Scientist* 70: 45-53.
- RAPP, G. (1979): *Trace elements as a guide to the geographical source of tin ore: Smelting experiments*. En: *The search of ancient tin*. págs. 59-63. (A.D. Franklin, J.S. Olin y T.A. Wertime, Editores). Smithsonian Institution, Washington D.C.
- RAPP, G. (1985): *The Provenience of artifactual Raw Materials*. En: *Archaeological Geology* (G.Rapp y J.A. Gifford, Editores). págs 353-375. University Press, New Haven and London.

- RAPP, G., ALLERT, J. y HENRICKSON, E. (1984): Trace-element discrimination of discrete sources of native copper. En: *Archaeological chemistry III*. (J. Lambert, Editor). *Advances in Chemistry Series* n° 205. American Chemical Society, New York.
- RICE, P.M. (1982): Pottery production, classifications and the role of physicochemical analysis.
- SANDFORD, K.S. (1934): Paleolithic man and the Nile Valley in Upper and Middle Egypt. Univ. Chicago, *Oriental Institute Publications*, vol.18.
- SHELLEY, D. (1985): *Optical Mineralogy*. Elsevier Science Publishing. New York.
- SHEPARD, A. (1954): *Ceramics for the archaeologist*. Carnegie Institution of Washington. Publ. 609.
- SIGLEO, A.C. (1975): Turquoise mine and artifact correlation for Snaketown, Arizona. *Science* 189: 459-460.
- STEEN-McINTYRE, V. (1985): *Tephrochronology and Its Application to Archaeology*. En: *Archaeological Geology* (G.Rapp y J.A. Gifford, Editores). págs. 265-302. University Press, New Haven and London.
- STEINBERG, A. & KAMILLI D.C. (1990): *Paint and paste studies of selected Halaf sherds from Mesopotamia*. En: *Pots and Potters*. 187-208. (M.Rice, Editor). University of California, Los Angeles.
- STOS-GALE, Z.A. y GALE, N.H. (1982): Analysis of Mycenaean lead and silver artefacts from Mycenae, Perati, Vapheio and the Athenian Acropolis and Agora. Evidence for Bronze Age working of Lávrion. *Journal of Field Archaeology* 9: 467-485.
- TARLING, D.H. (1985): *Archaeomagnetism*. En: *Archaeological Geology* (G.Rapp y J.A. Gifford, Editores). págs 237-263. University Press, New Haven and London.
- TASKER, C.M.K. (1980): *Archaeological site erosion: Studies from Britain and the Aegean*. Ph.D.Thesis. Univ. Strathclyde, Glasgow.
- TITE, M.S. (1972): *Methods of physical examination in archaeology*. Academic Press, New York.
- TITE, M.S. y MANIATIS, Y. (1975): Examination of ancient pottery using the scanning electron microscope. *Nature* 257: 122-123.
- THOMAS, H.H. (1923): The source of the stones of Stonehenge. *Antiquaries Journal* 3: 239-260.
- TYLECOTE, R.F., GHAZNAVI, H.A. y BOYDELL, P.J. (1977): Partitioning of trace-elements between the ores, fluxes, slags and metal during the smelting of copper. *Journal of Archaeological Science* 4: 305-333.
- VENDRELL-SAZ, M., MOLERA, J. y GARCÍA-VALLES, M. (1992): La producción de ánforas romanas del taller de Can (Barcelona): caracterización química y mineralógica. *Bol. Soc. Española de Mineralogía* 15: 1-10.
- WASHINGTON, H.S. (1898): The identification of the marbles used in Greek sculpture. *American Journal of Archaeology* 2: 1-18.
- WEYMOUTH, J.W. y HUGGINS, R. (1985): *Geophysical Surveying of Archaeological Sites*. En: *Archaeological Geology* (G.Rapp y J.A. Gifford, Editores). págs. 191-235. University Press, New Haven and London.
- WISE, S.M., THORNES, J.B. y GILMAN, A. (1982): *How old are the badlands? A case study from South-East Spain*. En: *Piping and badland erosion*. págs. 259-277. (A.Yair y R.Bryan, Editores). Geo Books, Norwich, England.