

La determinación de la procedencia de mármoles arqueológicos como ejemplo para la aplicación de métodos geocientíficos en arqueometría

Provenance determination of archaeological marbles as an example for the use of geoscientific methods in archaeometry

Thomas Cramer¹, Juan Carlos Molano¹ & Ali Duran Öcal²

¹ Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Ciudad Universitaria, Apartado Aéreo 14490, Bogotá D.C., Colombia, thcramer@unal.edu.co, jcmolanom@unal.edu.co

² Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Antropología, Ciudad Universitaria, Apartado Aéreo 14490, Bogotá D.C. Colombia, adocal@unal.edu.co

Cramer, Thomas; Molano, Juan Carlos & Öcal, Ali Durán (2010): La determinación de la procedencia de mármoles arqueológicos como ejemplo para la aplicación de métodos geocientíficos en arqueometría [*Provenance determination of archaeological materials. An example for the use of geoscientific methods in archaeometry*]. GEOLOGÍA COLOMBIANA, Vol. 35, pp.143-161. Bogotá, Colombia.

Artículo de Investigación Científica Manuscrito recibido: 17 de mayo 2010; aceptado: 20 de agosto de 2010

Resumen

El análisis geocientífico de materiales usados en la antigüedad griega y romana puede contribuir a resolver problemas arqueológicos de procedencia de objetos antiguos. En el presente trabajo se presentan los métodos utilizados en la caracterización de hallazgos de mármol de Asia Menor que hoy se encuentran en el Museo de Pérgamo en Berlín. Con cerca de dos centenares de muestras de casi 40 objetos antiguos y más de 300 muestras de 20 yacimientos de mármol se pudo crear una base de datos amplia. La frecuente superposición de características de los yacimientos requiere un enfoque multivariado tanto en los métodos analíticos aplicados como en el procesamiento de los datos. Una petrografía macro y microscópica detallada mostró ser la base indispensable para la aplicación de técnicas analíticas más sofisticadas. Dolomitas medidas por XRD mostraron una buena correlación con Mg, Fe, Sr y Mn determinados con ICP-OES, y los REE medidos con ICP-MS mostraron un alto potencial discriminatorio, al igual que la isotopía estable (δC_{PDB} y δO_{PDB}). La estadística multivariada (análisis factorial, cluster, discriminatorio) confirma la relevancia geológica y la utilidad de las características usadas. La cromatografía de gases de fases volátiles, la catodoluminiscencia y los espectros de resonancia paramagnética electrónica complementaron los resultados, indicando que son igualmente técnicas muy útiles y con alto potencial futuro. La metodología usada para identificar como fuente de los mármoles del Altar de Pérgamo las canteras de la isla Mármara y descartar los mármoles locales de Akkaya, es un ejemplo de cómo se pudo determinar la procedencia de todos los objetos antiguos investigados con un alto grado de confiabilidad.

Palabras clave: Mármol, Altar de Pérgamo, procedencia, isotopía estable, geoquímica, catodoluminiscencia, EPR

Abstract

The geoscientific analysis with the purpose of provenance determination of marbles used in the Greek and Roman antiquity helps to resolve archaeological questions. Here we show methods used for the characterization of marble findings from Asia Minor, which are now exposed in the Pergamon Museum in Berlin. 232 samples of 39 ancient objects and 362 samples of 20 marble deposits provided a broad database. The frequent superposition of characteristics of the deposits requires a multivariate approach. In spite of all modern analytical techniques, the petrographic characteristics continue being indispensable. Dolomites measured by means of XRD showed a good correlation with Mg, Fe, Sr and Mn determined by ICP-OES, and REE measured by ICP-MS showed a high discriminative potential, as well as the stable isotopes (δC_{PDB} and δO_{PDB}). Multivariate statistics (factorial analysis, cluster, discriminative) confirm the geological relevance and the utility of the characteristics used. Gas chromatography, cathodoluminescence and electron paramagnetic resonance complemented the results, indicating that they are equally useful and with high future potential. The methodology used to identify the source of the marbles of the Pergamon Altar as the quarries of the Marmara island and to discard the local marbles of Akkaya, is an example of how the provenance of all the investigated ancient objects could be determined with a high degree of reliability.

Sr and Mn were determined by means of ICP-OES; the REE by means of ICP-MS. Stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$) gave important indications. The multivariate statistic (factorial, to cluster, discriminatory analysis) confirmed the geologic relevance and the utility of the used characteristics. The gas chromatography of volatile phases, the cathodoluminescence and EPR yielded additional results. Here we use the marbles of the Pergamon Altar, which have been proved to come from Marmara island and not from the local deposit of Akkaya near by Pergamon, to show the way how all the ancient objects could be assigned to marble quarries.

Key words: Marble, Pergamon Altar, provenance determination, stable isotopes, geochemistry, cathodoluminescence, EPR

Introducción

En Colombia la investigación arqueométrica o geoarqueológica sistemática está dando sus primeros modestos, pero significativos pasos para contribuir a resolver problemas relacionados con la historia precolombina, colonial y republicana. Su importancia ha sido reconocida por la Sociedad Colombiana de Geología gracias a su decisión de instalar a partir del XII Congreso Colombiano de Geología en 2009, un simposio sobre geoarqueología para los futuros congresos colombianos de geología. La arqueología contemporánea requiere cada vez más el uso de técnicas analíticas modernas de las áreas de la química, física y geociencias, para resolver problemas de proveniencia, especialmente aquellos de la época anterior a la conquista española cuando no existían fuentes escritas. Entre los materiales más idóneos para estos tipos de análisis en Colombia se encuentran areniscas como las de los edificios coloniales en Bogotá o las de los monolitos del Parque Arqueológico de Monquirá, el Infiernito (e.g. Öcal *et al.*, 2009), rocas volcánicas y obsidianas como las del Parque Arqueológico San Agustín y también una gran variedad de cerámicas y arcillas, gemas como esmeraldas probablemente del cinturón esmeraldífero de la Cordillera Oriental boyacense, además de metales preciosos, especialmente el oro.

Aunque la tarea puede parecer fácil – más tentativa aún debido a la accesibilidad mayor a instrumentos analíticos modernos - un enfoque interdisciplinario sigue siendo indispensable especialmente para determinaciones arqueométricas, como alertaron tempranamente algunos investigadores (por ejemplo Germann *et al.*, 1980). Por eso, en el presente trabajo discutimos posibles alcances y limitaciones de la arqueometría tomando como ejemplo el análisis geocientífico que se empleó exitosamente para determinar la procedencia de artefactos de mármol en el Museo de Pérgamo en Berlín, Alemania.

En la antigüedad griega a partir del siglo VI a.C. el mármol se transformó en la roca ornamental preferida para la construcción de esculturas, columnas, templos,

palacios y ciudades enteras, de tal manera que se puede hablar de una cultura de mármol. Al comienzo su uso se limitaba a esculturas hechas de fragmentos de roca, pero pronto se empezó a desarrollar una exploración sistemática y explotación en canteras extensas a cielo abierto o subterráneas, que llevaron a que yacimientos y canteras de mármol en Mármara (e.g. Attanasio *et al.*, 2008; Cramer, 2004), Paros, Naxos, Tasos y más tarde Afrodísias, adquirieran una gran importancia como exportadoras de mármol a todo el mundo helenístico y romano. Para la construcción de la Roma Imperial, desde el Emperador Augusto en el siglo I d.C., se empezaron a explotar las canteras de Carrara (Attanasio *et al.*, 2000) que siguen estando entre las productoras de mármol más importantes del mundo. También mármoles de la Península Ibérica y del norte de África (Lapuente *et al.*, 2000; Origlia *et al.*, 2010) entraron en producción para satisfacer la demanda incesante hasta el fin del Imperio Romano. Otro auge vivió durante el imperio de Bizancio (e.g. Carlson & Aylward, 2010), pero ya en esta fase de decadencia de las grandes culturas helenísticas y romanas en la antesala de la Edad Medieval se puede observar una cierta pérdida de los conocimientos y habilidades adquiridas para la explotación en canteras tradicionales y nuevas, acompañado por el uso cada vez más grande de mármoles reciclados, lo que constituye hoy en día un desafío arqueométrico adicional.

En vista de la importancia de los mármoles antiguos no sorprende que en la Europa del siglo XIX –cuando se buscaba fundamentar la propia identidad nacional en la historia helenista y romana – no solamente se realizaran las grandes excavaciones arqueológicas en el Mediterráneo sino también se diera inicio a la investigación geocientífica para la determinación de la procedencia de estos objetos de mármol, ayudándose en observaciones de campo y en las técnicas disponibles en su momento como el recién desarrollado microscopio polarizante o los análisis químicos básicos, aplicadas por pioneros de la arqueometría como el geólogo Richard Lepsius (1891).

La caída del muro en Berlín hace 20 años abrió para el primer autor, a partir de 1996, la posibilidad de iniciar la caracterización de los mármoles de 39 objetos antiguos en el Museo de Pérgamo y compararlos con muestras de 20 yacimientos de mármol recolectadas en canteras y afloramientos en Grecia y Turquía, principalmente. Los objetos arqueológicos provinieron principalmente de dos centros de las civilizaciones arcaica, helenística y romana temprana en la costa occidental del Mar Egeo de Asia Menor (Fig. 1): Pérgamo y el Valle Inferior del Meandro. De Pérgamo (hoy Bergama en Turquía occidental) se analizaron muestras de objetos de las épocas helenística y romana, de los cuales los frisos del Altar de Pérgamo (trabajados en 180 a.C.) quizás son los ejemplares monumentales más conocidos. La segunda área de investigación principal era el Valle de Meandro Inferior con objetos y canteras investigados de Dídima, Mileto, Priene en la Micala y Heracleia, entre otros. En casi todos los casos se logró asignar los objetos antiguos a sus yacimientos de origen (Cramer, 2004), es decir, se logró determinar su procedencia, contribuyendo a la solución de varias preguntas y al replanteamiento de otras por parte de los arqueólogos, historiadores y geocientíficos (e.g. Carlson & Aylward, 2010; Cramer, 2009; Cramer *et al.*, 2009; Heilmeyer, 2008). Afortunadamente, el material recolectado y nuevas muestras de objetos antiguos y canteras permiten seguir precisando varias aspectos adicionales.

En los últimos años se han investigado también objetos de sitios clásicos menos conocidos por ejemplo en África, Austria y Europa oriental (e.g. Jarc *et al.* 2010; Štátná *et al.* in press; Unterwurzacher *et al.* 2010) con resultados a veces sorprendentes, que en todos casos amplían la base de datos continuamente y ponen en evidencia la necesidad de avanzar en el intercambio de información y bases de datos, y de usar de manera ajustada sistemas de estadística multivariada (Attanasio *et al.* 2006; Cramer 2009; Germann *et al.* 1980).

Otras aplicaciones del análisis arqueométrico profundo de materiales geológicos son, por ejemplo, la conservación de objetos antiguos y modernos hechos de rocas ornamentales que sufren el ataque por la meteorización natural, en muchos casos acelerada por emisiones de las sociedades modernas como las lluvias ácidas (e.g. Duerrast *et al.*, 1999; Hannibal & Saja, 2010; Kanellopoulou & Koutsoukos, 2003; Luque *et al.*, 2010; Siegesmund, 2005). Pero desafortunadamente también la carrera contra falsificadores de obras de arte, gemas o material arqueológico, quienes disponen a menudo de tecnologías mucho más avanzadas que las universidades, centros de investigación o instituciones estatales, juega un rol cada vez más importante.



Figura 1: Principales sitios antiguos y yacimientos de mármol investigados en Grecia y Turquía a partir de 2000, con las áreas de investigación principal Pérgamo/Bergama al oriente de la isla Lesbos y Miletus, Priene, Heracleia en el Valle Inferior del Río Menderes

Figure 1: Main ancient sites and marble quarries in Greece and Turkey researched since 2000, with the main research areas of Pergamon/Bergama east of Lesbos Island, and Miletus, Priene and Heracleia in the Lower Menderes Valley

Marco Geológico

En varias partes al norte y sur del Mar Mediterráneo se encuentran espesos estratos de calcita y dolomita de origen biogénico formado durante el Mesozoico en los alrededores del enorme viejo Mar de Tetis. Extensas áreas de calizas sufrieron varias fases de metamorfismo regional que llevaron a la formación de cinturones de montañas como los Alpes o el Macizo de Menderes, transformando las calizas sedimentarias, a menudo fosilíferas, en mármoles fuertemente recrystalizados y homogenizados. Hoy, algunos de ellos forman yacimientos de mármoles explotables en unas docenas de yacimientos con un significado más allá del mero uso local (Fig. 1).

Entre los más famosos y ricos yacimientos explotados ya en la antigüedad, se encuentran en Grecia cerca de Atenas los de Penteli e Himeto en la zona pelagónica y los de Naxos, Paros y Ephesos en la zona cicládica; esta última zona continúa hacia el oriente turco en el Macizo del Menderes (o Meandro) con un cinturón meridional de yacimientos cerca del Lago Bafa (Mileto y Heracleia), vía Milas y Yatağan, hasta por lo menos Aphrodisias. Más al norte se destaca el extenso yacimiento de Mármara/Proconesos que cubre el tercio septentrional de esta isla situada en el Mar de Mármara al oeste de Estambul -la vieja Constantinopla o Bizancio- y al noroeste la isla de Tasos con sus localidades de mármoles calcíticos como los de Alyki en el sur y dolomíticos en el norte, y en Italia los grandes yacimientos de Carrara (Alpes, Apuanas). Varios de estos distritos mineros están aún en producción y en algunas canteras activas y abandonadas se pueden encontrar todavía testigos de la minería antigua, incluyendo fosas, columnas o figuras no finalizadas.

Para poder determinar la procedencia de objetos antiguos de mármol en los distintos yacimientos se deben encontrar características que, reflejando las condiciones distintas de sedimentación, diagénesis, metamorfismo e historia tectónica, se expresen en distintas características petrográficas, mineralógicas, geoquímicas, isotópicas etc., como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 2.

Toma de muestras y métodos analíticos

En concordancia con el objetivo principal del presente trabajo mostramos en este capítulo los métodos analíticos usados junto con la discusión de aspectos metodológicos

relevantes antes de discutir el caso específico de la procedencia de los mármoles del Altar de Pérgamo.

Toma de muestras

En total se analizaron 232 muestras de 39 objetos antiguos principalmente del Museo de Pérgamo en Berlín y 362 muestras de 20 yacimientos de mármol entre 1995 y 2004; (y algunos posteriormente) con las que se conformó una base de datos amplia (e.g. Cramer in press; Cramer, 2004, Cramer *et al.*, 1996, Cramer *et al.*, 1998; Heilmeyer, 2008). Las muestras de las canteras se consiguieron en gran parte en dos salidas de campo a Turquía realizadas junto con dos arqueólogos líderes del Museo de Pérgamo, los profesores Wolf-Dieter Heilmeyer y Volker Kästner, lo que permitió combinar diferentes puntos de vista y estudiar la interacción entre la geografía, geología y arqueología tanto en los sitios antiguos como en las canteras modernas y/o con explotación antigua (Fig. 1). Muestras de Grecia se obtuvieron aprovechando viajes a dos congresos que se realizaron en cercanía de canteras importantes (ASMOSIA VII en Tasos 2003, 4th Symposium on Archaeometry of the Hellenistic Society of Archaeometry en Atenas 2003); además se usaron muestras de proyectos paralelos y anteriores (Gast *et al.*, 1979; Germann 1981; Germann *et al.*, 1988; Germann *et al.*, 1980; Koch-Moeck, 2005) y testigos de canteras guardadas en el Museo de Pérgamo y el Museo de Charlottenburg en Berlín. La toma de tantas muestras de museo en tan gran cantidad se vio favorecida por campañas de restauración ambiciosas que en varios casos permitieron extraer núcleos de perforación completos, fragmentos internos o por lo menos polvo de perforación. El hecho de que los griegos del helenismo clásico obviamente utilizaran preferiblemente mármoles blancos casi puros de calcita y a veces dolomita, a diferencia de los romanos que desarrollaron una preferencia hacia mármoles policromáticos (ver por ejemplo Mielsch 1985) dificulta una discriminación exclusivamente basada en propiedades exteriores y agrava el problema de la frecuente superposición de características entre los mármoles blancos de diferentes yacimientos. Eso hace aun más indispensable el uso de varios métodos analíticos complementarios con un enfoque multivariado aplicados sobre un buen número de muestras con el fin de conseguir resultados confiables.

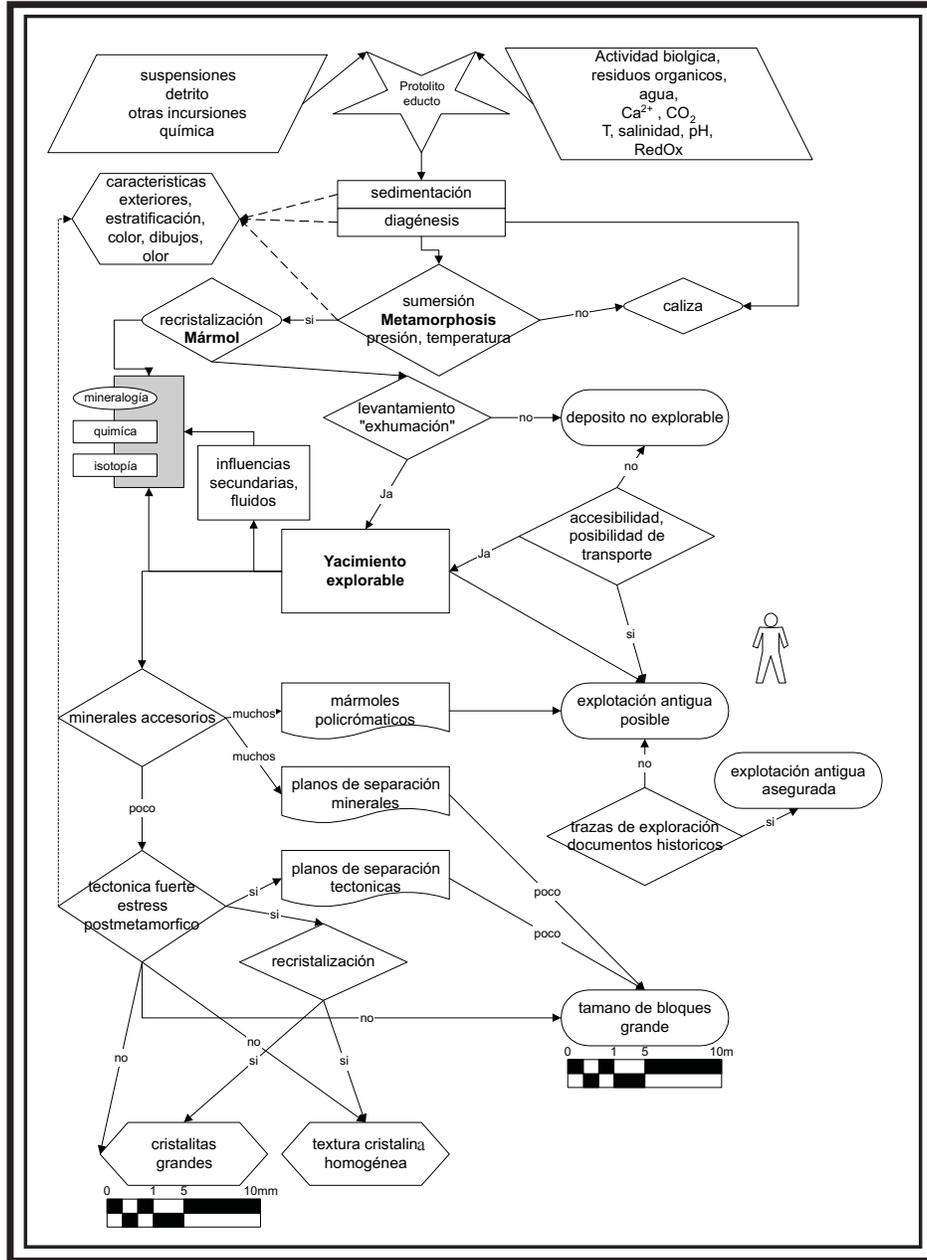


Figura 2: Diagrama de flujo de factores geogénicos relacionados con el posible uso de mármoles en la antigüedad y factores para la determinación de su procedencia (modificado de Cramer 2004)

Figure 2: Flow chart showing geogenic factors related to the possible use of marbles in Antiquity as well as important factors for their provenance determination (modified from Cramer 2004).

Petrografía

Esta investigación ha confirmado que el análisis petrográfico macroscópico y microscópico clásico (Lazzarini *et al.*, 1980; Lepsius, 1891; Mielsch, 1985) sobre las muestras de mano, fragmentos o núcleos de perforación sigue siendo irremplazable. Se registran características exteriores fácilmente detectables como el color y tonos, dibujos, tamaños de grano aproximados,

inhomogeneidades mineralógicas, translucencia en diferentes espesores, fracturas o pátinas, liberación de un olor característico para algunos mármoles en el momento de su destrucción mecánica, etc., características que en muchos casos permiten por lo menos descartar ciertas canteras y reducir el número de posibles sitios de procedencia.

Posteriormente, el análisis microscópico de unas 400 secciones delgadas permitió detectar más detalles petrográficos a menudo significativos. Microfotografías de toda el área de las secciones delgadas, y no solamente de una pequeña parte como usualmente en la microscopía óptica, facilitan la distinción de los granos con diámetros máximos entre menos de 1 mm hasta 100 mm, cuya comparación se mostró ventajoso en vista del gran número de objetos y canteras a considerar.

Bajo el microscopio se midió el tamaño de unos 200 granos por sección delgada para registrar la distribución de granos y definir un tamaño promedio (AGS *Average Grain Size*). Lo más efectivo era usar una magnificación 50x y realizar la medición con nicoles cruzados, pero en mármoles muy heteroblásticos o afectados por estrés mecánico la cuantificación era más difícil o sin sentido. Un parámetro más sencillo de determinar y cuantificar (con lupa con escala milimétrica en superficies limpias, con binocular o microscopio) es el tamaño de grano y especialmente de los granos más grandes (*Maximum Grain Size - MGS*). En cada una de las muestras se registraron los diámetros perpendiculares más largos de los 3 granos más grandes reconocibles macroscópica y microscópicamente. Como MGS final se tomó el promedio de estas 3 mediciones por muestra. Los valores de estas mediciones del MGS (mínimo, máximo, promedio y valores atípicos en mm) para una gran parte de los yacimientos investigados (Fig. 3) muestran en la mayoría de los casos una buena coincidencia entre los diferentes tipos de registro. Pero se confirma también una regla básica del tratamiento estadístico de materiales naturales: el aumento del número de mediciones tiende a aumentar el sesgo estadístico, lo que subraya la necesidad de no confiar ciegamente en una sola medición, sea numérica-cuantitativa o cualitativa.

La determinación de las características texturales (principalmente tamaños, formas y límites de grano, distribución heterogénea u homogénea de los cristales, deformaciones postmetamórficas intragranulares desde maclas torcidas hasta la destrucción de los granos) permite establecer distribuciones características que reflejan las condiciones variantes de recristalización y destrucción parcial de los granos y pueden por eso tener un alto potencial discriminatorio para muestras de diferentes yacimientos (Fig. 6). Igualmente, características mineralógicas como el tipo y la cantidad de minerales accesorios transparentes u opacos o inclusiones submicroscópicas pueden ayudar en diferenciar ciertos yacimientos.

Métodos instrumentales

La baja dureza de calcita o dolomita (3-4 en la escala Mohs) permite moler las muestras de mármol fácilmente con un mortero de ágata para el análisis posterior con difracción de rayos X (XRD); durante la molienda se controló si se liberaron fases volátiles con fuerte olor captadas en los granos y si en el polvo quedaron granos de minerales accesorios como cuarzo, óxidos de Fe, piritita o micas. Pocos miligramos del polvo restante fueron disueltos en ácido nítrico (HNO_3) para el análisis químico con ICP-OES y ICP-MS y en ácido fosfórico para determinar la isotopía estable de los carbonatos con un espectrómetro de masas. Para la espectroscopía de resonancia paramagnética electrónica (EPR) y la catodoluminiscencia (CL) se enviaron fragmentos de mármol como se utilizan normalmente para la preparación de secciones delgadas a los laboratorios colaboradores. Los detalles de la preparación de las muestras se describen junto con las técnicas correspondientes.

La difracción de rayos X (XRD) permite medir en los mármoles blancos principalmente los contenidos de calcita, dolomita y parcialmente de cuarzo, el último como componente principal del residuo ácido-insoluble. La detección de otros minerales en mármoles es muy improbable, porque contenidos menores de 5% no producen picos suficientemente fuertes en XRD. Se usó un difractómetro *Philips PW1710* con condiciones de trabajo ajustadas para detectar el máximo posible de variaciones típicas en mármoles calcíticos (*50 kV, 30 mA, tubo Cu-LFE, monocromador de grafito, 3-80° con 0,02° cada 2,5s*).

El análisis químico con fluorescencia de rayos X (XRF) no permitió diferenciar bien la mayoría de los mármoles químicamente; además puede haber una fuerte influencia de los minerales accesorios en los resultados. Por eso se consiguió la gran mayoría de los datos químicos a través de la fracción ácidosoluble usando ICP-OES (espectrometría de emisión óptica con fuente de plasma de acoplamiento inductivo, equipo *Perkins Elmer Optima 3000 xl*) y ICP-MS (espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo, equipo *Spectrometer DRC-e PerkinElmer/SCIEX*). Subordinadamente se ha usado también AAS (espectroscopía de absorción atómica).

Con ICP-OES se determinaron los contenidos de Mg, Fe, Sr, Mn, Ba y Ca, que son elementos constitutivos

principalmente de la red cristalina de los carbonatos¹ y que por eso están menos afectados por variaciones aleatorias de minerales accesorios en los mármoles. Por la misma razón es preferible usar ácidos suaves para disolver principalmente los carbonatos representativos de los yacimientos y dejar a los minerales accesorios intactos.

La **ICP-MS** se utilizó para medir los elementos de tierras raras (REE incluyendo Y), y también Sr y Ba². Entre las principales ventajas de ICP-MS se destaca – además de su alta capacidad de detección de elementos traza – la posibilidad de medir los contenidos de los REE sin necesidad de su enriquecimiento previo.

Los elementos de tierras raras - **REE** - comprenden la serie IIIA del sistema periódico de elementos menos el Sc, o sea los lantanoides y además se incluye Y. Su comportamiento químico es similar, pero con unas particularidades que permiten conclusiones acerca de las condiciones de formación geológicas (e.g. de Baar *et al.*, 1991; Jones *et al.*, 1996; Lipin & McKay, 1989; McLennan, 1989).

Los REE son muy electrófilos, por lo cual forman muchos compuestos iónicos y complejos (boratos, carbonatos, óxidos, silicatos, fosfatos, etc.), con unos 200 minerales reconocidos por la IMA (*International Mineralogical Association*). Sus radios iónicos – que dependen también del número de coordinación - (e.g. Ce³⁺ 10,1 nm [6] y 11,96 nm [9]) son similares a los de Ca y Sr, y los pueden sustituir en parte. La anomalía negativa de Ce se ha revelado como uno de los factores discriminatorios más importantes de los mármoles investigados, en los cuales refleja la interacción de Ce³⁺ o Ce⁴⁺ con el agua marina y la influencia de componentes detríticos terrestres; ésta anomalía se ha calculado utilizando la normalización PAAS³, según la fórmula:

$$Ce_{neg} = \frac{Ce}{79,6} * \frac{2}{(La/38,2 + Pr/8,83)}$$

con Ce, La, Pr: contenido en ppm

Cifras: Valores normalizadores PAAS (ppm)

Isotopía estable

Para medir la isotopía estable ($\delta^{13}C_{PDB}$ y $\delta^{18}O_{PDB}$) de un total de 378 muestras, se disolvieron 10-15 mg de polvo de mármol en ácido fosfórico según el método estándar

(Craig & Craig, 1972; Herz, 1985; Herz & Wenner, 1978; Herz & Wenner, 1981). En el CO₂ liberado se analizó la relación entre ¹⁸O/¹⁶O y ¹³C/¹²C usando un espectrómetro de masas en el Alfred-Wegener-Institut de Potsdam. Los resultados se presentan en la notación PDB (*Belemnitella americana* del Cretácico de la Formación PD del Sur de Carolina en EE.UU.) en ‰. El valor $\delta(R)$ o sea la desviación positiva o negativa del estándar usado se calcula según la fórmula:

$$\delta(R) = \frac{R_{Pr} - R_{St}}{R_{St}} * 1000$$

$$\text{con } R = {}^{13}C/{}^{12}C \text{ o } {}^{18}O/{}^{16}O$$

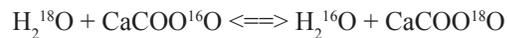
R_{Pr} = Ratio isotópico muestra

R_{St} = Ratio isotópico estándar

La transformación al estándar más conocido para el oxígeno (notación SMOW -Standard Mean Ocean Water) se realiza según la fórmula:

$$\delta^{18}O_{PDB} = 0,97006 * \delta^{18}O_{SMOW} - 29,94.$$

Una posible reacción de intercambio isotópico entre agua y carbonato de calcio es:



Para que se establezca una signatura isotópica característica con o sin un equilibrio termodinámico en la caliza sedimentaria interactúan varios factores como la temperatura y presión del agua, su contenido de CO₂, Ca²⁺, Mg²⁺ y Sr²⁺, su salinidad, el pH y el Eh, las características y el metabolismo de los organismos involucrados en la formación de la calcita o aragonito, etc.

Estas interacciones son la razón principal por la cual se puede usar la isotopía estable del C y del O como marcadores estratigráficos y geocronológicos, siempre y cuando se tenga una buena calibración. Sin embargo, durante la diagénesis y especialmente durante el metamorfismo de las calizas a mármoles, estas signaturas isotópicas tienden a cambiar y a homogenizarse formando, en el caso ideal, campos isotópicos característicos para diferentes yacimientos. Este fenómeno se puede apreciar en figura 8, pero se ve también una fuerte superposición de varios campos isotópicos de yacimientos de mármol clásicos. Además, procesos posteriores que producen

¹ Los resultados para Na, K, Zn, P no parecieron confiables.

² Los valores de Rb, Zr, Cs, Hf, Pb, Th, U y parcialmente Ca no parecieron confiables

³ *Post-Archean Australian Shale (McLennan 1989)*

fluidos hidrotermales o la simple meteorización pueden cambiar de nuevo estas firmas, como se discute posteriormente (Fig. 9). La desviación estándar de los equipos es menor que el 0,1%, pero la variación natural de la isotopía estable de muchos mármoles puede ser mucho más grande, por lo cual siempre se requieren otros análisis complementarios (Germann *et al.*, 1980).

Espectroscopía de resonancia paramagnética electrónica (EPR) y Catodoluminiscencia (CL)

Estos dos métodos se basan fundamentalmente en la interacción de especies de elementos de traza (especialmente de Fe y Mn) en las redes cristalinas de los minerales (en este caso principalmente calcita y dolomita) con la energía de excitación. Algunas de nuestras muestras de mármol fueron analizadas con EPR en laboratorios en Roma, Italia, por el grupo de Attanasio (*e.g.* Attanasio, 2008), otras por el grupo de Polikreti y Maniatis en Atenas, Grecia. Aquí nos limitamos a presentar e interpretar los resultados obtenidos por el último grupo según la metodología descrita en Polikreti & Maniatis (2002). Las muestras limpias fueron trituradas en un mortero de ágata, para evitar picos de trituración en el espectro de EPR y posteriormente fueron tamizadas; la fracción entre 63 y 180 μm se usó para la espectroscopía EPR en un espectrómetro BRUKER ER-200D-SRC en el laboratorio de arqueometría, NCSR Demokritos en Atenas. Se midió la intensidad del primer pico del sexteto de Mn^{2+} (parámetro Mn), del Fe^{3+} con $g = 14.25$ (parámetro Fe) y de la media anchura a media altura del sexto pico prohibido del sexteto de Mn^{2+} (parámetro WIDTH).

Las microficies de catodoluminiscencia se observaron a partir de secciones delgadas con 50 μm de espesor en vez de 30 μm pulidas en ambas caras que posteriormente fueron irradiadas con electrones acelerados en el Instituto de Geología de la Universidad de Berna (Ramseyer *et al.*, 1992).

Análisis estadístico

La estadística multivariada (análisis factorial, de agrupamiento o cluster, y discriminatorio) confirmó la relevancia geológica y la utilidad de las características usadas. Gracias a la combinación de las diferentes características, todos los objetos antiguos pudieron ser asignados a los diferentes yacimientos con un alto grado de confiabilidad.

No obstante, es importante interpretar los resultados estadísticos de manera lógica, crítica y ajustada a los objetos investigados. Adicionalmente se desarrolló un sistema experto que procesa diferentes informaciones lineales y de lógica difusa que orienta y permite también a no expertos llegar a conclusiones acertadas acerca de la procedencia de muchos objetos arqueológicos (Cramer, 2009).

Comparación de los resultados de métodos petrográficos y químicos usados

Entre los resultados del análisis mineralógico-petrográfico, XRD, ICP-MS e ICP-OES debe haber una correlación estrecha, más si se quiere usarlos como una herramienta confiable para la determinación de la procedencia de mármoles. Aquí se destacan algunas observaciones analíticas.

No siempre es fácil diferenciar dolomita en muestras de mano o secciones delgadas. La mayor estabilidad de dolomita en comparación con calcita (que es la base de su diferenciación con HCl) puede expresarse macroscópicamente en un perfil de meteorización positiva, especialmente en objetos arqueológicos o canteras antiguas expuestas durante mucho tiempo al clima. La diferenciación entre calcita y dolomita con alizarina roja S es muy útil en el caso de calizas sedimentarias o diagenéticas, pero propios estudios con mármoles del Altar de Pérgamo revelaron una fuerte dependencia de la coloración con alizarina roja S de la dirección de corte relativa a los ejes cristalinos (Cramer, 1998).

Se mostró una buena correlación entre los contenidos de dolomita medidos con XRD y el Mg medido con ICP-OES. En el caso de ICP-MS la suma de Mg y Ca alcanzó casi siempre alrededor de 100% lo que confirma el buen funcionamiento del equipo y a la vez la composición casi exclusiva calcítica y dolomítica de los mármoles analizados. Hasta unos 0,6-0,8% de Mg entran en la estructura cristalina de las calcitas, contenidos mayores de Mg se expresan casi siempre en la presencia de dolomita en los mármoles.

Para los análisis con ICP-OES y ICP-MS se usó la misma solución⁴, lo que permite comparar los dos métodos.

⁴ 0,2 g muestra disuelta en 10 ml HNO_3 (subboiled, 6 Mol/l) y en baño de vibración con 75 °C extraída durante dos horas. La solución se filtró y pasó en un tubo de vidrio que se llenó después con agua ultrapura (Milli-Q, 18 MO, Millipore) a 50 ml. Para la medición se diluyó la solución con 0,5 Mol/l HNO_3 1:10 (factor de disolución total VF=2500) y se puso Ru/Re como estándar interno.

La exclusión de los resultados de varios elementos químicos como confiables y discriminatorios se debe principalmente a la pureza de la mayoría de los mármoles relevantes o problemas sistemáticos instrumentales (en el caso de Ca, al contrario, los efectos matriz crearon problemas por su alto contenido que requería factores de disolución de hasta 5000).

En el caso de la medición de Sr y Ba de la misma solución con ambos métodos se mostró una buena

coincidencia; una dilución de 250 arrojó desviaciones de $9 \pm 7\%$ (0,41 a 2,5 wt% de Sr en las muestras), en las mediciones con ICP-OES resultaron desviaciones positivas máximas en contenidos de Sr > 150 ppm y desviaciones negativas máximas en el intervalo 42 ppm < Sr < 69 ppm. Eso indica que ambos elementos desde un punto de vista instrumental pueden tener utilidad; sin embargo solamente el Sr ha mostrado tener un alto potencial discriminatorio para diferentes yacimientos de mármol.

Tabla 1: Comparación de contenidos de elementos químicos medidos por AAS (Espectroscopia de absorción atómica) en 1988 y ICP-OES en 2002 en las mismas muestras de Naxos y Paros.

Table 1: Comparison of elements measured by means of AAS and ICP-OES in the same samples from Naxos y Paros in 1988 and 2002

Código muestra	Procedencia muestra	Mg	Fe	Sr	Mn	Fe/Sr	Fe/Mn
		wt%	ppm	ppm	ppm		
Nx21,1 OES	Naxos, Apollon	1,16	64,6	153	48	0,42	1,34
21,1 AAS		0,94	40	115	40	0,35	1,00
Nx21,11 OES	Naxos, Kinidaros	0,26	35	117	9,2	0,3	3,8
21,11 AAS		0,29	50	90	15	0,56	3,33
PaLy38T, OES	Paros Lychnites	0,17	10,7	212	5,19	0,05	2,06
38TUM AAS		0,2	30	180	18	0,17	1,67

En la tabla 1 se comparan datos de las mismas muestras analizadas con AAS (Espectroscopia de absorción atómica) después de la extracción con HCl (Germann *et al.*, 1988) y catorce años más tarde con ICP-OES después de la extracción con HNO₃. También en este caso, las desviaciones son moderadas y corresponden probablemente a variaciones naturales en las rocas, aunque los resultados de ICP-OES indican una tendencia de un aumento sistemático de los valores de Sr y la disminución de Fe y Mn.

Altar de Pérgamo – Mármoles locales o de Proconesos?

Aquí presentamos a manera de ejemplo los análisis realizados y argumentos adicionales que llevaron a asignar los mármoles del Altar de Pérgamo (Friso Grande y Friso Télefo construido 170 a.C. bajo el rey Eumenes II) a las canteras de la isla de Mármara/Proconesos en el Mar Mármara entre el Bósforo y el Mar Egeo a más de 300 km de distancia de Pérgamo y no a las de Akkaya en cercanías de la capital del Reino de Pérgamo (Mapa en Fig. 1). Antes, diferentes autores (Rybach & Nissen,

1965; Schuchhardt, 1912) habían postulado a las últimas como fuentes probables. La muestra Ak3 hace parte de fragmentos de mármol de la cantera de *Akkaya* (en turco: piedra blanca) en el área de Kozak unos 40 km al norte de Pérgamo, que fueron enviados a comienzos del siglo XX a la capital alemana donde quedaron guardados en el Museo Charlottenburg en Berlín como material supuestamente usado para el Altar de Pérgamo. Ya en otros trabajos se ha mostrado que las características de los mármoles del Altar de Pérgamo son prácticamente idénticas a las de Mármara/Proconesos (e.g., Cramer *et al.*, 2002; Cramer *et al.*, 2003; Germann & Cramer, 2005).

En este artículo mostramos más detalladamente porque Akkaya no puede haber sido la fuente del material y discutimos aspectos potencialmente problemáticos en la caracterización de los objetos antiguos. En tabla 2 se comparan las características identificadas de los mármoles del Altar de Pérgamo (Friso Grande y Friso de Télefo) incluyendo los de Proconesos, con los de Akkaya, mientras que en la tabla 3 se presentan los argumentos que las diferencian de manera más extensa.

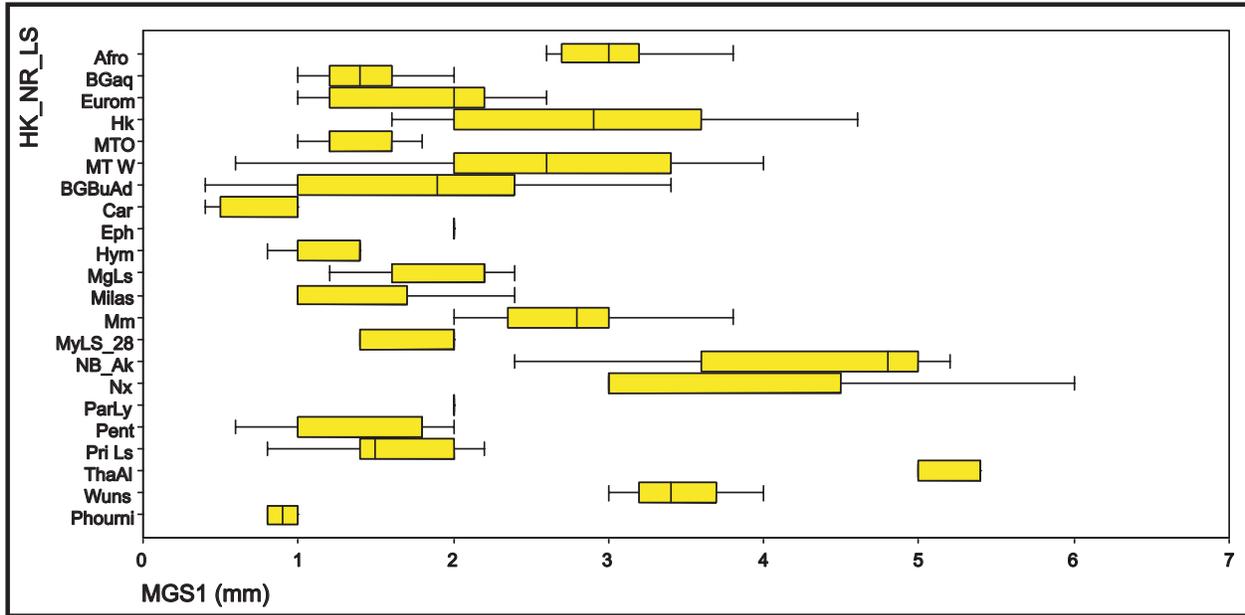


Figura 3: Máximo tamaño de grano (MGS), en mm, obtenido de la medición de los tres granos más grandes por muestra. Las barras amarillas representan los valores mínimo, máximo y promedio, además se indican los valores atípicos de mármoles de diferentes yacimientos investigados. Nótese los bajos valores de MGS de Carrara (Car) y Phourni, los extremadamente altos de Naxos (Nx), los intermedios de Mármara (Mm) y los relativamente más grandes de Akkaya.

Figure 3: Maximum Grain Size (MGS), in mm, as result of the three largest grains per section with minimum, maximum, mean values and outliers of marbles from different investigated quarries. Observe the small MGS from Carrara (Car) and Phourni, the extremely large ones of Naxos (Nx), the middle ones of Marmara (Mm) and the comparatively larger ones from Akkaya.



Figura 4: (Izq.) Una de las pocas figuras del Friso de Télefo (TF48) en las que se pudo detectar sin limpieza el bandeamiento oscuro paralelo, característico de los mármoles de Mármara, (der.) en una cantera moderna con pliegue isoclinal cerca de la localidad Mandira en el suroriente de la isla

Figure 4: (Left) One of the few figures of the Telephos Frieze (TF48) where the dark parallel banding was easily detectable without cleaning, which is characteristic of Marmara marbles, (right) modern quarry front with isoclinal folding nearby Mandira)

Los mármoles de Akkaya situados en cercanías de intrusiones granodioríticas (Altunkaynak & Yilmaz, 1998) al norte de Pérgamo (Brinkmann & Izdar, 1971), obviamente no son resultado de metamorfismo regional sino de metamorfismo de contacto. Pese a sus mayores contenidos de elementos como Fe, Mn y Sr, el color de estos mármoles locales es más blanco que el de los

del Altar y de Mármara y carecen del bandeamiento gris paralelo que es característico de los mármoles de Mármara (ver Fig. 4), poco apreciado por los griegos, pero sí por los romanos imperiales y bizantinos. En los frisos del Altar de Pérgamo expuestos en el Museo de Berlín durante décadas estos bandeamientos casi no eran visibles, obviamente por dos razones: aparentemente los

griegos preferían trabajar las esculturas paralelamente a los bandeamientos para esconderlos, en contraste con los romanos y bizantinos que lo hacían en cortes perpendiculares, con el fin de usar los bandeamientos como elemento decorativo. Adicionalmente, una fina capa de polvo, costras y pátinas cubrieron estos detalles, que solamente después de la restauración, a partir de 2005, se pudieron apreciar con claridad.

Una de las causantes de estos bandeamientos y del tono gris de los mármoles de Proconesos es su contenido alto de inclusiones muy finas generadas por restos de materia orgánica sin oxidar completamente; este estado reductor se expresa también en la presencia de pirita o marcasita (sulfuros de hierro formados por la reacción del azufre

proveniente de las proteínas de los generadores de caliza primaria y cationes de hierro ubicuos bajo condiciones reductoras) cuyos cristales en algunos casos han empezado a oxidarse a magnetita, limonita y hematita.

Estos restos del material orgánico primario también son los responsables de un olor fuerte como huevos podridos exhalado⁵ cuando se trituran los mármoles. Factores adicionales que debilitan el libre paso de la luz blanca en las muestras del Altar de Pérgamo son la textura muy heteroblástica de los mármoles con MGS entre 2,5 a 3,4 mm en una matriz de grano fino, los límites de granos aserrados y en muchas casos una gran cantidad de maclas dobladas (Fig. 5). En contraste, como se puede apreciar en las figuras 6 y 7, los mármoles de Akkaya son más homeoblásticos y de tamaños en promedio más grandes (MGS ~ 3,6 mm).



Figura 5: Sección delgada de los mármoles muy similares, al Friso de Télefo (TF8, izq.) y de Mármara Silinte (der.), N+, margen corto 2,4 mm. Obsérvese la textura heteroblástica y los sistemas de maclas
Figure 5: Thin section of the very similar marbles of the Telephos Frieze (TF8, left) and from Marmara Silinte (right), N+, short side 2,4 mm. Observe the heteroblastic texture and the strong twinning systems

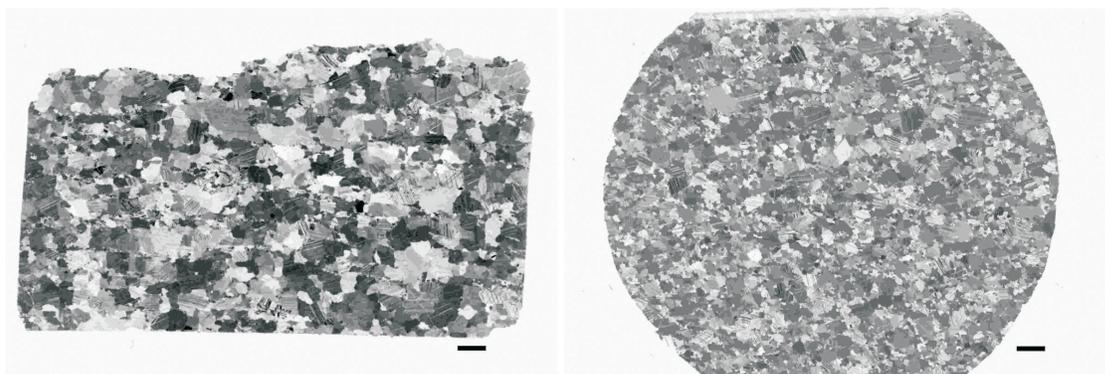


Figura 6: Sección delgada de mármol de Akkaya (Ak3, izq.) con cristales más homogéneos y grandes que los de Proconesos (B16, der.), N+, fotografía blanco y negro, escala 2 mm
Figure 6: Thin section of a marble from Akkaya (Ak3, left) with more homogeneous and larger crystals than the Proconesos ones (B16, right), N+, B&W photo, scale bar 2 mm

⁵ Con cromatografía de gas pudimos mostrar que varias otras sustancias orgánicas volátiles se encuentran encerradas en inclusiones y límites de granos (Cramer, 2004), un fenómeno que actualmente se está investigando más en detalle en el grupo de trabajo del profesor Jürgen Schram en la University of Applied Sciences en Krefeld, Alemania.

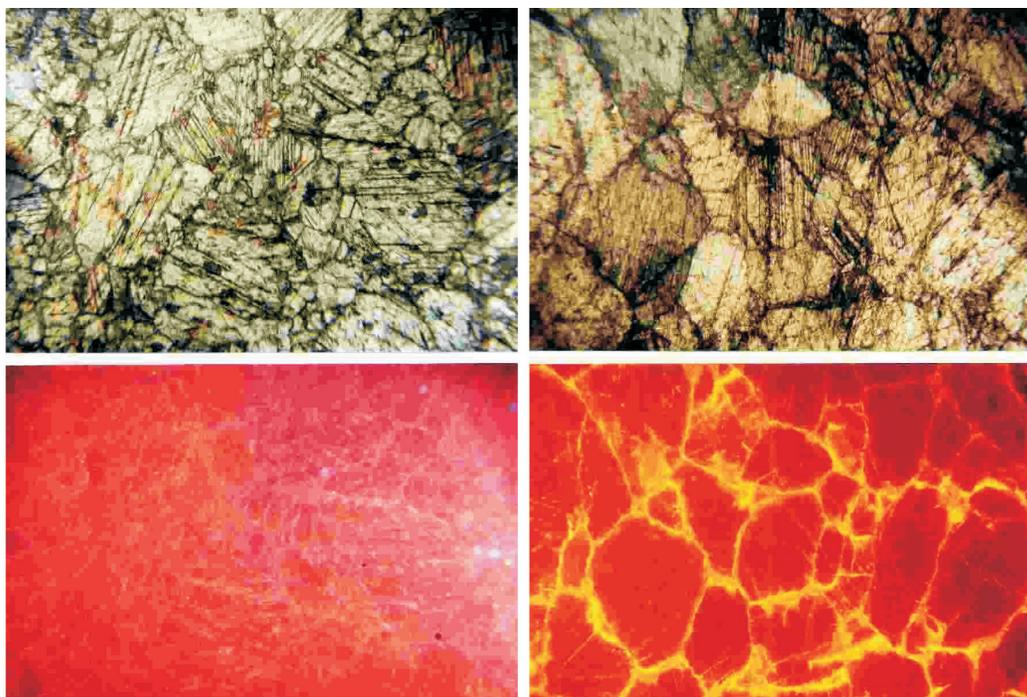


Figura 7: Microfotografía sin (arriba) y con (abajo) catodoluminiscencia de muestras del Friso de Télefo (TF34, izq.) y de Akkaya (Ak3, der.), margen corto 8 mm

Figure 7: Microphotos without (above) and with (below) cathodoluminescence from a marble sample of the Telephos Frieze (TF34, left) and from Akkaya (Ak3, right), short side 8 mm

Entre los métodos que revelan con más claridad la diferencia entre estos dos yacimientos de mármol, se encuentra la catodoluminiscencia. La microfacies de la catodoluminiscencia de todas las muestras de mármoles de Proconesos y del Altar analizadas con CL tiene un aspecto similar a lo expuesto en figura 7 izquierda, algunas con una intensidad mayor o menor, con un tono más rojizo o más azul, como lo han descrito también otros autores para esta localidad (Barbin *et al.*, 1990). Pero los contenidos mayores de elementos como Fe y Mn y también de los REE en las muestras de Akkaya se reflejan en una intensidad mucho mayor de los colores de CL, y además un fuerte enriquecimiento de elementos estimulantes para la luminiscencia en los límites de grano, posiblemente a raíz de fluidos movilizados y precipitados por los procesos relacionados con el metamorfismo de contacto.

Fluidos de este tipo también pueden haber causado el empobrecimiento de isótopos pesados de oxígeno (δO_{PDB} -13,74 – -11,81 ‰ en la Fig. 9). Los mármoles de grano fino de Eski Maden, en la misma región del Kozak al N de Pérgamo, reflejan un empobrecimiento aún mayor. Si se hubiese aplicado solamente la isotopía estable para determinar la procedencia de los mármoles, ésta hubiera sido un argumento fuerte a favor de la procedencia de Akkaya, porque entre las primeras mediciones del Friso de Télefos se dieron valores igualmente negativos. Sin embargo, los análisis isotópicos han revelado que en la isla de Mármara en realidad existen dos campos isotópicos (PR-1 y PR-2 en las figuras 8 y 9) y no

solamente uno (PR) como se sostenía en años anteriores, una observación ya confirmada por otros autores (Attanasio *et al.*, 2008; Gorgoni *et al.*, 2002).

La figura 9 ilustra posibles razones y mecanismos de la variación isotópica de oxígeno. Mayor de lo asumido anteriormente: mientras el metamorfismo que forma los mármoles bajo condiciones de un equilibrio termodinámico tiende a concentrar y agrupar la isotopía de los mármoles en campos isotópicos restringidos y en el mejor de los casos diferente para cada yacimiento los fluidos hidrotermales o meteóricos posteriores suficientemente reactivos, tienden a mover el equilibrio hacia isotopías más livianas; esta tendencia es más clara en el caso del oxígeno que del carbono (solamente en concreciones kársticas que se han formado a través de la disolución y reprecipitación de la calcita donde se observa un fuerte empobrecimiento del carbono pesado ($\delta C_{PDB} < -10$ en Fig. 9). Mármoles directamente en la zona de contacto con esquistos y diques lamprofiricos, que cortan la roca y probablemente están asociados a intrusiones graníticas en el sur de la isla, también sufrieron un empobrecimiento de isótopos pesados de O y de C por los fluidos calientes. Estos fluidos percolaron en áreas más lejanas de mármol con una composición isotópica original en el rango del campo PR-1. Debido a la mayor estabilidad cinética de los enlaces de los isótopos de carbono estos fluidos ya no alcanzaron a variar los valores de δC_{PDB} , pero sí los de δO_{PDB} , lo cual finalmente llevó a la formación del campo isotópico PR-2.

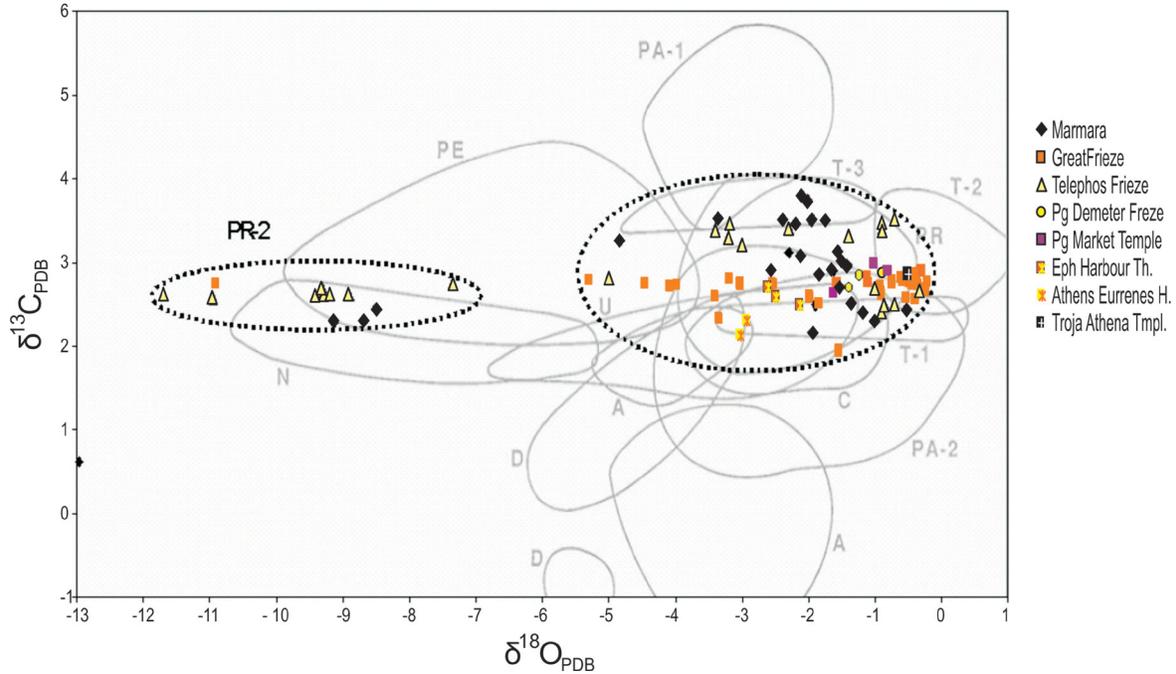


Figura 8: La isotopía estable de C y O de objetos antiguos y de muestras de canteras de mármoles de Proconnesos investigados que muestran la existencia de un segundo campo isotópico (PR-2). Campos delimitados por líneas grises de mármoles clásicos según Moens *et al.* (1992) y Herz (1987) A: Afrodiasias, C: Carrara, D: Dokimeion-Afyon, Ef: Ephesos, Hym: Himeto, N: Naxos, PA: Paros, PE: Pentélico, PR: Proconnesos-Mármara, T: Thásos, U: Uşak.

*Figure 8: The stable C-O isotopy of researched ancient marble objects and quarry samples from Proconnesos exhibit the existence of a second isotopic field (PR-2) in this important quarry district. The fields in grey circles of classical marbles after Moens *et al.* (1992) and Herz (1987) A: Aphrodisias, C: Carrara, D: Dokimeion-Afyon, Ef: Ephesos, Hym: Hymettos, N: Naxos, PA: Paros, PE: Penteli, PR: Proconnesos-Marmara, T: Thassos, U: Uşak*

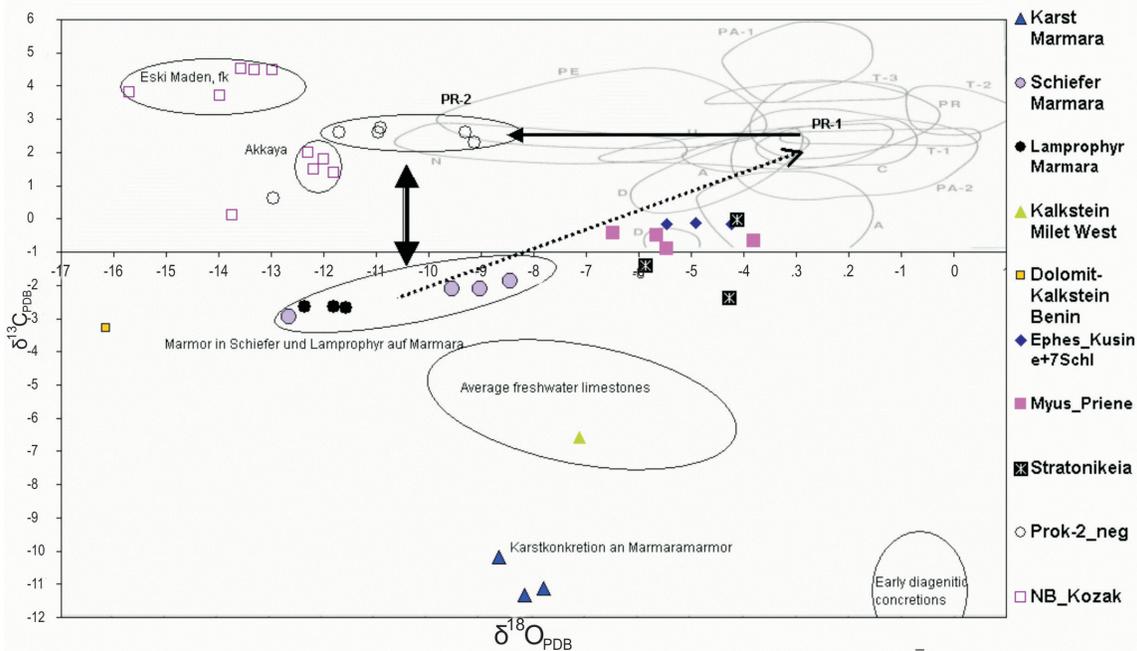


Figura 9: Muestras de mármol y otras rocas con empobrecimiento de isótopos estables pesados. En la isla Mármara (Proconnesos) el campo isotópico PR-2 se separó del campo PR-1 por la interacción con soluciones empobrecidas en isótopos pesados de O, producto de la formación de esquistos y lamprófiros (flecha interrumpida). Tomado de Cramer (2004)

Figure 9: Marble and other rock samples with impoverishment of heavy stable isotopes. In Marmara Island (Proconnesos) the isotopic field PR-2 separated from field PR-1 as a result of the interaction with heavy O isotopes impoverished fluids produced by the formation of schists and lamprophyres (dashed arrow). Taken from Cramer (2004)

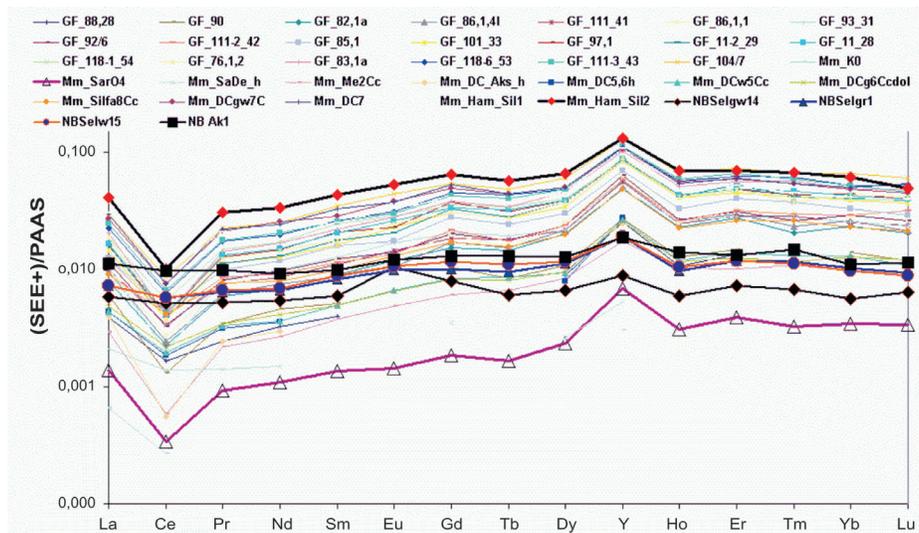


Figura 10: Contenido de los Elementos de Tierras Raras de los mármoles de Akkaya (NB, al norte de Pérgamo) normalizados con PAAS muestran una curva casi horizontal, mientras los mármoles provenientes de Proconnesos (GF y Mm), con una gran variación de los contenidos absolutos, tienen una curva de distribución similar y se destacan por una fuerte anomalía negativa de cerio como también por una relación de $\Sigma\text{REE}/\text{Y}$ alrededor de 1, en contraste con 2,5-4,3 en el caso de los mármoles de Akkaya
Figure 10: PAAS-normalized Rare Earth Elements of Akkaya marbles (NB, northern of Bergama) show a nearly horizontal distribution pattern, whereas the Proconnesos marbles with a high variation of absolute element contents exhibit similar distribution patterns among them with a pronounced negative Cerium anomaly, as well as $\Sigma\text{REE}/\text{Y}$ ratios around 1 contrasting with 2,5-4,3 in the case of Akkaya marbles

Igualmente las curvas de distribución de los REE apoyan la tesis de que Akkaya no puede haber sido la fuente del material de construcción para el Altar de Pérgamo.

Aunque los valores absolutos de los REE de Akkaya se encuentran entre el mínimo y máximo de las muestras del

Altar y de la isla (Fig. 10), las últimas exhiben una fuerte anomalía negativa de Ce y mucho más Y, mientras que la curva de los mármoles de Akkaya es casi horizontal. Estos patrones de distribución obedecen a condiciones de formación de las calizas en agua marina bien distintas (e.g. Bau *et al.*, 1995; Bau *et al.*, 1996).

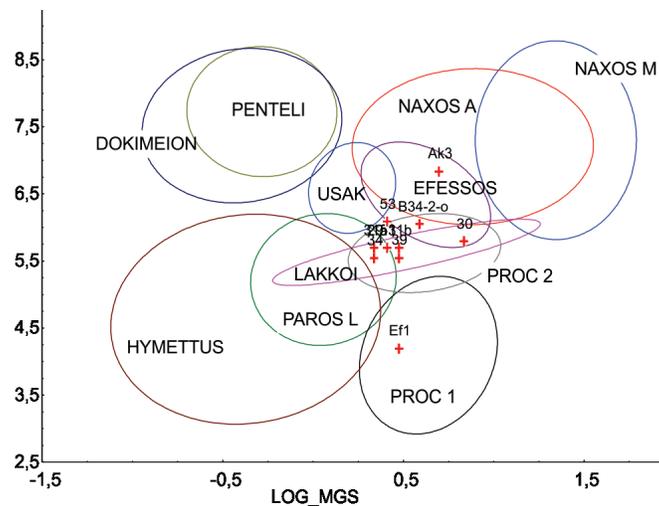


Figura 11: Mn^{2+} de EPR vs. \log_MGS de mármoles de Proconnesos y Akkaya (Ak3). Los mármoles de Proconnesos se agrupan principalmente en el campo PROC 2; la muestra Ef1 de los Termals del Puerto de Éfeso fue asignado a Proconnesos también por otros aspectos. Campos definidos por Polikreti & Maniatis (2002).
Figure 11: Mn^{2+} by EPR vs. \log_MGS of marbles mainly from Proconnesos and Akkaya (Ak3). The Proconnesos marbles are grouped in the field PROC 2; the sample Ef1 of the Ephesus Harbour Thermae were assigned to Proconnesos also by other criterions. Fields defined by Polikreti & Maniatis (2002)

Tabla 2: Comparación de valores medidos para mármoles de Proconnesos en objetos antiguos en Pérgamo y Mármara con los de Akkaya; en mayúscula material de cantera. N: número de muestras, MGS: Máximo tamaño de grano, za: aserrados, Dol: dolomita, REE: elementos de tierras raras, Cer_{neg}: anomalía negativa de Ce
Table 2: Comparison of measured values of Proconnesos marble in ancient Pergamonean objects and in Marmara with the Akkaya marbles. N: number of samples, MGS: Maximum grain size, za: dentated, Dol: dolomite, Cer_{neg}: negative cerium anomaly

Muestra (Museo/ CANTERA)	N	MGS mm	Textura	Dol wt%	Olor	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	ΣREE Ppm	$\Sigma\text{REE}/\text{Y}$	Cer _{neg}	Sr ppm	Fe ppm	Fe/Sr	Mg wt%	Mn ppm
Altar de Pérgamon (Friso Grande)	62	2,3-3,1	Het/za	0-0,1	+++	2,5/2,9	-0,2/-5,3 -10,3	0,6-4,1	0,7-1,2	0,2-0,5	166-266	10-40	0,05-0,25	0,27-0,42	5,1-10,4
Friso de Teléfono (1995 y 2001)	29	2,5-3,6	Het/za	0-1,6	+++	2,4/3,5	-0,3/-5,0 -7,4/-11,7	0,7-6,1	0,8-1,4	0,1-0,5	141-229	23-80	0,13-0,43	0,2-0,69	4,2-10,6
Templo de Demeter (Friso)	3	2,5	Het/za	-	+++	2,7/2,9	-0,9/-1,4	2,2-2,3	1,168-1,319	0,33-0,36	127-138	17,4	0,13	0,3	8
Templo Helenístico Mercado Superior	3	2	Het/za	0	+++	2,6/3,0	-0,8/-1,6	1,694	1,113	0,3	176	18,2	0,11	0,31	5,2
MÁRMARA (esp. Doğu Camlik)	21	2-3,5	Het/za	0-4	+++	0,6/3,5	-0,5/-3,4 -8,5/-13	0,046-5,222	0,32-1,46	0,2-0,5	113-275	8-91	0,1-0,3 (1x0,68)	0,21-1,1	2,5-10,1
AKKAYA (N-Bergama)	6	2-3,5	Het-hom	0-2,5	-	0,1/2	-11,8/-13,7	1-1,9	2,5-4,3	0,8-0,9	342-695	102-284	0,28-1,03	0,16-0,55	18,7-38,7

Tabla 3: Comparación extensa de las características de los mármoles de Mármara del Altar de Pérgamo con los de Akkaya; los argumentos con más relevancia para esta diferenciación están en negrilla
Table 3: Extended comparison of the Pergamon Altar marbles properties with the Akkaya ones; the most important arguments are in bold

	Mármara/ Altar de Pergamon	Akkaya
Características Petrográficas:		
Color	Blanco con tono gris	Blanco más claro homogéneo
Bandeamiento / estratificación	Bandeamiento gris paralelo (en el Altar normalmente paralelamente a la superficie de elaboración)	Escaso bandeamiento y si se da, solamente de manera discontinua
Distribución de granos, Tamaño de Grano Máximo (MGS)	Bimódalo a lognormal 2 – 3,5 mm	Más homogénea 2,3 – 3,6 (4) mm
Maclas en los cristales de calcita	Muchas, en partes dobladas	Pocas
Límites de granos	Serradas, irregulares	Más regulares con tendencia a “triple-junction”
Fases minerales	En promedio 98 wt% calcita, 0-4 wt% dolomita; accesoriamente cuarzo, micas, pirita, óxidos de Fe	97-99 % calcita, 0,76-2,5 wt% dolomita; Acs.: algo más de cuarzo, micas, óxidos de Fe
¿Liberación de olor durante destrucción mecánica?	Fuerte como H₂S o huevos podridos	Libre de olor detectable
Composición química:		
Mg wt%	0,21 – 1,1	0,16 – 0,5
Sr (ICP-MS + ICP-OES) ppm	113 – 275	342 – 695
Fe (ICP-OES) ppm	8 – 91	342 – 695
Mn (ICP-OES) ppm	2,5 – 10,1	19 – 39
Σ REE (ICP-MS) ppm	0,05 – 5,2	1,03 – 1,89
Σ REE/Y	0,32 – 1,46	2,47 – 4,30
Anomalía negativa de Ce	Si, 0,2 – 0,5	No, 0,82 – 0,93
Y/Ho (valores más bajos en partes bandeadas)	86 – 150	67 – 98
EPR	Pico Mn ²⁺ 5,5-6 PROC2	Pico Mn ²⁺ 6,8
Catodoluminiscencia	Azul a naranja débil	Rojo y naranja intenso
Isotopía estable O/C:		
$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$	-8,5 – -9,13 / -0,5 – -4,8	-12 a -16
$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	1,1 – 3,5	1 - 2
Otros argumentos:		
Disponibilidad de mármol	Yacimiento muy grande, todavía uno de los más grandes proveedores de Turquía hoy en día.	Lentes de mármol pequeños
Situación logística	Pese a la distancia >300 km posibilidad de transporte por barco al lugar de utilización	Aunque es cerca solamente transporte por tierra y áreas montañosas difíciles

Para la clasificación con espectroscopía de resonancia paramagnética electrónica (EPR) realizado por el grupo de trabajo de Yannis Maniatis, se usó la intensidad del primer pico del sexteto de Mn^{2+} (parámetro Mn) combinándola con un criterio petrográfico, la MGS (Mn^{2+} vs. \log_MGS en Fig. 11). Como se puede apreciar en figura 11, todos los mármoles del Altar de Pérgamo (que contienen alrededor de 10 ppm de Mn) se agrupan perfectamente en el campo PROC 2 de Proconesos; la muestra Ef1 de los termales del puerto de Efeso ubicada en el campo PROC1 igualmente es de Proconesos, pero contiene menos Mn (2,5ppm), lo que se refleja también en un pico Mn^{2+} menor. Al contrario, la muestra Ak3 de Akkaya con dos a 4 veces más Mn que las muestras de Proconesos, tiene también un pico mayor de Mn^{2+} y cae en el área de superposición de los campos de Efeso y Naxos A.

CONCLUSIONES

Aplicando un enfoque multivariado que utiliza métodos analíticos geocientíficos adecuados, se puede determinar la procedencia de mármoles y, como en el caso tratado aquí, descartar Akkaya como posible fuente de mármol para el Altar de Pérgamo. Los análisis muestran que las canteras de mármol de Mármara/Proconesos, arqueológicamente muy importantes (Asgari, 1978; Asgari, 1992), habían empezado a producir en gran escala como “*global player*” del mundo helenístico y romano unos 150 años antes de lo supuesto hasta entonces, y, si consideramos el Friso de Deméter (ver Tabla 2) de 260 a.C., aún antes.

Es importante resaltar que los materiales de construcción y de arte son materiales geológicos que requieren una comprensión y un procesamiento adecuados (ver Fig. 2). El análisis de las 232 muestras de 39 objetos antiguos y 362 muestras de 20 yacimientos de mármol constituyen una amplia base de datos para el desarrollo de un sistema experto que permite también a no-geocientíficos hacer por lo menos una preselección de posibles fuentes de mármoles utilizados en la antigüedad.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece especialmente a su tutor y profesor Dr. Klaus Germann de la *Universidad Técnica de Berlín (TUB)*, al entonces director de la *Antikensammlung - Stiftung Preussischer Kulturbesitz Berlin*, Profesor Dr. Wolf-Dieter Heilmeyer y al Dr. Volker Kästner, por su dedicación y gran interés; igualmente a todos los

colaboradores de la TUB, del *GeoForschungszentrum y del Alfred-Wegener-Institut Potsdam*. Gracias a Karl Ramseyer (Universidad de Berna) por los análisis de CL, y a Yannis Maniatis y Kyriaki Polikreti por los análisis EPR aquí presentados. Una gran parte de la financiación la asumió la *Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*.

El primer autor agradece a la Universidad Nacional de Colombia brindar la posibilidad de continuar estas investigaciones iniciadas en Alemania. Dos evaluadores anónimos contribuyeron a mejorar el presente artículo, asimismo Marta Lucía Quiroga y Gustavo Sarmiento; un agradecimiento especial a Cristina Dimaté por sus sugerencias adicionales

REFERENCIAS

- ALTUNKAYNAK, S. & YILMAZ, Y. (1998): The Mount Kozak magmatic complex, western Anatolia - In: Gourgaud, Alain (ed.) *Volcanism in Anatolia*, Elsevier - Amsterdam. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **85** (1-4) 211-231.
- ASGARI, NUSIN (1978): Roman and early Byzantine Marble Quarries of Proconnesus - In: *The Proceedings of the Xth International Congress of Classical Archaeology, Ankara-Izmir 1973*, 467-480.
- ASGARI, NUSIN (1992): Observations on two types of quarry-items from Proconnesus; column-shafts and column-bases - In: Waelkens, Marc; Herz, Norman & Moens, Luc (ed.) *Ancient stones: Quarrying, trade and provenance: Interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period*, 73-80, Leuven University Press - Leuven, Belgium. - *Acta Archaeologica Lovaniensia. Monographiae*, 4.
- ATTANASIO, D.; ARMIENTO, G.; BRILLI, M.; EMANUELE, M. C.; PLATANIA, R. & TURI, B. (2000): *Multi-method marble provenance determinations: The Carrara marbles as a case study for the combined use of isotopic, electron spin resonance and petrographic data* - *Archaeometry*, **42**: 257-272.
- ATTANASIO, DONATO; BRILLI, MAURO & BRUNO, MATTHIAS (2008): *The Properties and Identification of Marble from Proconnesos (Marmara Island, Turkey): A New Database including Isotopic, EPR and Petrographic Data* - *Archaeometry*, **50**(5): 747-774.
- ATTANASIO, DONATO; BRILLI, MAURO & OGLE, N (2006): *The isotopic signature of classical Marbles*, L'Erma di Bretschneider, Roma, 297 p.

- BARBIN, VINCENT; RAMSEYER, KARL; BURNS, STEPHEN J; DECROUEZ, DANIELLE & FALTERMEIER, KARL (1990): Cathodoluminescence et isotopes stables des marbres blancs de quelques statues de l'Antikenmuseum de Bale - In: *13e reunion des sciences de la terre*, 9, Societe Geologique de France - Paris, France. - Reunion Annuelle des Sciences de la Terre, 13.
- BAU, M; DULSKI, PETER & MÖLLER, P. (1995): *Yttrium and holmium in South Pacific seawater: Vertical distribution and possible fractionation mechanisms* - *Chemie der Erde*, **55**: 1-15.
- BAU, M; MÖLLER, P. & DULSKI, PETER (1996): *Yttrium and lanthanides in eastern Mediterranean seawater and their fractionation during redox-cycling* - *Marine Chemistry*, **56**: 123-131.
- BRINKMANN, ROLAND & IZDAR, E. (1971): Excursion to Bergama (Pergamon) and Kinik - In: *Geology and history of Turkey.*, 509-511, Campbell, A.S., Tripoli, Libya - Petroleum Exploration Society of Libya, Annual Field Conference, [Guidebook].
- CARLSON, DEBORAH N. & AYLWARD, WILLIAM (2010): *The Kizilburun Shipwreck and the Temple of Apollo at Claros* - *American Journal of Archaeology*, **114**(1), 145-159.
- CRAIG, HARMON & CRAIG, VALERIE (1972): *Greek Marbles: Determination of Provenance by Isotopic Analysis* - *Science*, **176**(2): 401-403.
- CRAMER, THOMAS (1998): *Die Marmore des Telephosfrieses am Pergamonaltar* - *Berliner Beiträge zur Archäometrie*, 15 ISSN 0344-5089: 95-198.
- CRAMER, THOMAS (2004): *Multivariate Herkunftsanalyse von Marmor auf petrographischer und geochemischer Basis - Das Beispiel kleinasiatischer archaischer, hellenistischer und römischer Marmorobjekte der Berliner Antikensammlung und ihre Zuordnung zu mediterranen und anatolischen Marmorlagerstätten*, Dissertation FG Lagerstättenforschung, Berlin URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:83-opus-7426>
- CRAMER, THOMAS (2005): Procedencia de mármoles usados en la antigüedad griega - In: *Memorias del X Congreso Colombiano de Geología, 26-29 de julio 2005, CD-ROM, ISBN 958-701-577-6*, 11 p., - Bogotá D.C. -
- CRAMER, THOMAS (2009): An expert system for marble provenance determination based on the investigation of marbles from Greece and Turkey - In: Philippe Jockey (ed.) *Marbres et autres roches de la Méditerranée antique: études interdisciplinaires - Interdisciplinary Studies on Mediterranean Ancient Marble and Stone - Proceedings of the VIIIth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity (Aix-en-Provence, 12-18 June, 2006)*, p. 449-461, Maison Méditerranéenne des Sciences de l'Homme - L'Atelier méditerranéen - Paris.
- CRAMER, THOMAS (in press): *Petrographische und geochemische Herkunftsbestimmung antiker Marmore - Archäometrische Zuordnung archaischer, hellenistischer und römischer Marmorobjekte Kleinasiens in der Berliner Antikensammlung zu Marmorlagerstätten*, VDM Verlag Dr. Müller, 480 p.
- CRAMER, THOMAS; GERMANN, KLAUS & HEILMEYER, WOLF-DIETER (2002): Petrographic and geochemical characterization of the Pergamon Altar marble in the Pergamon Museum, Berlin - In: Lazzarini, Lorenzo (ed.) *ASMOSIA VI - Proceedings of the Sixth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity, Venice, June 15-18, 2000. Interdisciplinary Studies on Ancient Stone*, 285-292, Aldo Ausilio - Bottega d'Erasmus Editore - Padova.
- CRAMER, THOMAS; GERMANN, KLAUS & HEILMEYER, WOLF-DIETER (2009): Marble objects from Asia Minor in the Berlin Collection of Classical Antiquities: stone characteristics and provenance - In: Maniatis, Yannis (ed.) *ASMOSIA VII, The Study of Marble and Other Stones in Antiquity - Proceedings of the 7th International Conference of the Association Congress of the International Mineralogical Association IMA2010, Budapest, 21st- 27th August 2010*: 130.
- CRAMER, THOMAS; GERMANN, KLAUS & WINKLER, F J (1996): Caratteristiche dei Marmi del Fregio di Telefo - In: Memmo, Fondazione (ed.) *L'Altare di Pergamo, Il Fregio di Telefo*, 146-148, Leonardo Arte ssl, ISBN 8878137286 - Milano.
- CRAMER, THOMAS; GERMANN, KLAUS; WINKLER, F. J. & SCHMIDT, H. L. (1998): *Isotope-geochemical and mineralogical-petrographic characteristics of the Pergamon altar marble - Isotopes in Environmental and Health Studies*, **34**(1-2), 1025-6016, Online ISSN: 1477-2639: 169-176.
- DE BAAR, H.J.W.; SCHIJF, J. & BYRNE, R.H. (1991): *Solution chemistry of the rare earth elements in seawater* - *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.*, **28**: 357-373.
- DUERRAST, HELMUT; SIEGSMUND, SIEGFRIED & PRASAD, MANIKA (1999): Die Schadensanalyse von Naturwerksteinen mittels Ultraschalldiagnostik; Möglichkeiten und Grenzen - In: Vossmerbaeumer, Herbert (ed.) *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft - Marmorkonservierung*, 359-374,

- Ferdinand Enke - Stuttgart. - Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 150 (2).
- GAST, REINHARD; GERMANN, KLAUS & EILERT, ELEONORE (1979): Petrographische und geochemische Untersuchungen zur Herkunftsbestimmung von Marmoren hellenistischer Grabstellen Thessaliens - In: *La Thessalie - Actes de la Table-Ronde 21-24 Juillet 1975*, Maison de l'Orient Méditerranéen - Lyon. - Série Archéologique, 6.
- GERMANN, KLAUS (1981): *Lagerstätteneigenschaften und herkunftstypische Merkmalsmuster von Marmoren am Südwestrand des Menderes-Massivs (Südwestanatolien)* - Jahrbuch des Deutschen Archäologischen Instituts, **96**: 214-235.
- GERMANN, KLAUS & CRAMER, THOMAS (2005): *Methoden der Herkunftsbestimmung für Naturwerksteine - das Beispiel des Marmors* - Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften - ZDGG, **156**(1), ISSN 1860-1804: 25-31.
- GERMANN, KLAUS; GRUBEN, GOTTFRIED; KNOLL, H; VALIS, V & WINKLER, F J (1988): Provenance characteristics of Cycladic (Paros and Naxos) marbles - a multivariate geological approach - In: Herz, Norman & Waelkens, Marc (ed.) *Classical marble: geochemistry, technology, trade*, 251-262, Kluwer Academic Publishers - Dordrecht. - NATO ASI Ser. E.; 153.
- GERMANN, KLAUS; HOLZMANN, G & WINKLER, F J (1980): *Determination of Marble Provenance: Limits of Isotopic Analysis* - Archaeometry, **22**(1): 99-106.
- GORGONI, CARLO; LAZZARINI, LORENZO; PALLANTE, PAOLO & TURI, BRUNO (2002): An updated and detailed mineropetrographic and C-O stable isotopic reference database for the main Mediterranean marbles used in antiquity - In: Herrmann, John; Herz, Norman & Newman, R. (ed.) *ASMOSIA 5, Interdisciplinary Studies on Ancient Stone - Proceedings of the Fifth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity, Museum of Fine Arts, Boston, June 1998*, 110-131, Archetype Publications - London.
- HANNIBAL, J. & SAJA, D.B. (2010): *Stones for a monument: geological aspects of the rehabilitation of the Cuyahoga County Soldiers" and Sailors" Monument in Cleveland, Ohio, USA* - Acta Mineralogica-Petrographica, Abstract Series 6(Abstracts of the 20th World Congress of the International Mineralogical Association IMA2010, Budapest, 21st- 27th August 2010): 130.
- HEILMEYER, WOLF-DIETER (2008): Berliner Marmore aus Kleinasien - Bericht über ein geologisch-archäologisches Projekt 1994-2004 - In: Deutsches Archäologisches Institut (ed.) *Jahrbuch des Deutschen Archäologischen Instituts*, Walter de Gruyter - Berlin New York. Vol. 122, p.127-161.
- HERZ, NORMAN (1985): Isotopic analysis of marble - In: Rapp, George, Jr. & Gifford John, A. (ed.) *Archaeological Geology*, 331-351, Yale Univ. Press - New Haven, CT, United States.
- HERZ, NORMAN (1987): *Carbon and oxygen isotopic ratios: a data base for classical Greek and Roman Marble* - Archaeometry, **29**: 35-43.
- HERZ, NORMAN & WENNER, DAVID B (1978): *Assembly of Greek marble inscriptions by isotopic methods* - Science, **199**: 1070-1072.
- HERZ, NORMAN & WENNER, DAVID B (1981): Provenance of classical marble; the state of the art - In: *The Geological Society of America, 94th annual meeting*, p. **472**, - Abstracts with Programs.
- JARC, S.; MANIATIS, Y.; DOTSIKA, E.; TAMBAKOPOULOS, D. & ZUPANCIC, N. (2010): *Scientific Characterization Of The Pohorje Marbles, Slovenia* - Archaeometry, **52**(2): 177-190.
- JONES, ADRIAN P.; WALL, FRANCES & WILLIAMS, C. TERRY (ED.) (1996): *Rare Earth Elements - Chemistry, origin and ore deposits*, - Mineralogical Society Series, 7, Chapman & Hall, London, 372 p.
- KANELLOPOULOU, D. G. & KOUTSOUKOS, P. G. (2003): *The calcitic marble/water interface: Kinetics of dissolution and inhibition with potential implications in stone conservation* - Langmuir, **19**(14): ISBN 5691-5699.
- KOCH-MOECK, MATTHIAS (2005): *Computer-based geological decision support system for the planning and optimizing of underground marble mining - Computergestützte geowissenschaftliche Entscheidungshilfen bei Planung und Optimierung der untertägigen Gewinnung von Marmor*, <http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2005/1029/>, Dissertation TU Berlin, Berlin.
- LAPUENTE, PILAR M. TURI, BRUNO & BLANC, PHILIPPE (2000): *Marbles from Roman Hispania: stable isotope and cathodoluminescence characterization* - Applied Geochemistry, **15**(10): 1469-1493.
- LAZZARINI, LORENZO; MOSCHINI, G. & STIEVANO, A.M. (1980): *A contribution to the identification of Italian, Greek and Anatolian marbles through a petrographical study and the evaluation of the Ca/Sr ratio* - Archaeometry, **22**(2): 173-183.

- LEPSIUS, RICHARD (1891): *Griechische Marmorstudien*, Abhandlungen Königl. Akademie der Wissenschaften, Phil.-Hist. Kl. 1890, Berlin, 135 p.
- LIPIN, B.R. & MCKAY, G.A. (ED.) (1989): *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*, - Reviews in Mineralogy, 21, Mineralogical Society of America, 348 p.
- LUQUE, A; LEISS, B; CULTRONE, G; SEBASTIÁN, E & SIEGESMUND, S (2010): *Anisotropic behaviour of calcitic and dolomitic Spanish marbles* - Acta Mineralogica-Petrographica, Abstract Series, 6 (Abstracts of the 20th World Congress of the International Mineralogical Association IMA2010, Budapest, 21st- 27th August 2010), ISSN 0365-8066: p. 137.
- MCLENNAN, S.M. (1989): Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes - In: Lipin, B.R. & McKay, G.A. (ed.) *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*, 169-200, Reviews in Mineralogy Vol. 21.
- MIELSCH, HARALD (1985): *Buntmarmore aus Rom im Antikenmuseum Berlin*, Staatliche Museen Preussischer Kulturbesitz, Berlin, 70 p+ 24 Bildtafeln.
- MOENS, LUC; ROOS, PETER; DE PAEPE, PAUL & LUNSINGH SCHEURLEER, R. (1992): Provenance determination of white marble sculptures from the Allard Pierson Museum in Amsterdam, based on chemical, microscopic and isotopic criterias - In: Waelkens, Marc; Herz, Norman & Moens, Luc (ed.) *Ancient stones : quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period*, 269-276, Leuven University Press - Leuven. - Acta Archaeologica Lovaniensia. Monographiae 4,
- ÖCAL, ALI DURAN; CRAMER, THOMAS & SIEGESMUND, SIEGFRIED (2009): Caracterización de agentes del deterioro de los monolitos de piedra arenisca del Infiernito - Colombia - In: Palacios, Tulio; Palacios, Oscar Martín; Vázquez, Cristina & Cabanillas, Edgardo (ed.) *Arqueometría latinoamericana : Segundo Congreso Argentino y Primero Latinoamericano, 6-8 de julio de 2007*, ISBN 978-987-1323-09-8, 413-419, Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA - Buenos Aires.
- ORIGLIA, FRANCESCA; GLIOZZO, ELISABETTA; MECCHERI, MARCO; SPANGENBERG, JORGE E. & TURBANTI MEMMI, ISABELLA (2010): *Mineralogical, petrographic and geochemical characterisation of white and coloured Iberian marbles in the context of the provenancing of some artefacts from Thamusia (Kenitra, Morocco)* - Acta Mineralogica-Petrographica, Abstract Series, 6 (Abstracts of the 20th World Congress of the International Mineralogical Association IMA2010, Budapest, 21st- 27th August 2010), ISSN 0365-8066: 121.
- POLIKRETI, K. & MANIATIS, Y. (2002): *A new methodology for the provenance of marble based on EPR spectroscopy* - Archaeometry, 44: 1-21.
- RAMSEYER, KARL; DECROUEZ, DANIELLE; BARBIN, VINCENT; BURNS, STEPHEN J; MOENS, LUC; DE PAEPE, PAUL; ROOS, PETER; CHAMAY, JACQUES & MAIER, J.L. (1992): Provenance Investigation of marble artifacts now in the collection of the Museum of Art and History in Geneva - In: Waelkens, Marc; Herz, Norman & Moens, Luc (ed.) *Ancient stones: quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period*, 287-292, Leuven University Press - Leuven, Belgium. - Acta Archaeologica Lovaniensia. Monographiae 4.
- RYBACH, L. & NISSEN, H. U. (1965): *Neutron activation of Mn and Na traces in marbles worked by the ancient Greeks* - Proc. Radiochemical Methods of Analysis, 1: 105-107.
- SCHUCHHARDT, CARL (1912): Stadt und Land - In: Conze, Alexander (ed.) *Altertümer von Pergamon*.
- SIEGESMUND, SIEGFRIED (ED.) (2005): *Geowissenschaften und Denkmalpflege. Bauwerkskartierung, Natursteinverwitterung, Konservierungsstrategien*, - Themenheft der "Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften", 156 (1), Schweizerbart, Stuttgart.
- ŠŤASTNÁ, ANETA; PŘIKRYL, RICHARD & ČERNÍKOVÁ, ALENA (in press): *Comparison of quantitative petrographic, stable isotope and cathodoluminescence data for fingerprinting Czech marbles* - Environmental Earth Sciences, 63(7).
- UNTERWURZACHER, MICHAEL; UHLIR, CHRISTIAN F & KREMER, GABRIELLE (2010): *The provenance of marble artefacts from the Roman metropolis of Carnuntum (Austria)* - Geología Colombiana, 35 (este número).