

## Estudio del deterioro y conservación de los materiales de la Catedral de Ávila

Adolfo Carlos Iñigo (\*)

*Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (IRNASA), CSIC*

Jacinta García Talegón (\*)

*Universidad de Salamanca*

José Ángel Paredes Rodas

*Universidad de Salamanca*

Eduardo Azofra Agustín (#)

*Universidad de Salamanca*

Alexandra María Gutiérrez Hernández (#)

*Universidad de Salamanca*

Eloy Molina Ballesteros

*Universidad de Salamanca*

Rosa Amanda Sepúlveda Correa (\*)

*Universidad de Salamanca*

Raimundo Moreno Blanco (#)

*Universidad de Salamanca*

María Isabel López Fernández

*Universidad de Salamanca*

RESUMEN. Los estudios previos de un proyecto de restauración, normalmente se realizan antes de las fases de intervención del proyecto original, pero a veces dados los posibles cambios en las fases, también pueden realizarse durante sus ejecuciones, para facilitar el control de calidad en las intervenciones. En este trabajo, se presenta una recopilación de los resultados llevados a cabo por sus autores en la Catedral de Ávila, estos estudios comprenden un trabajo de campo in situ (materiales de construcción empleados y deterioro que presentan, tanto fuera o dentro del monumento, en diferentes ambientes y microambientes); Así también, se han realizado trabajos de laboratorio de caracterización tecnológica (análisis mineralógico y químico, ensayos hídricos, ensayos no destructivos, etc.), determinación de la eficacia de los métodos de conservación y de la durabilidad de los materiales pétreos tanto de cantera como tratados. La durabilidad de

\* G.I.R. Deterioro y conservación de los materiales pétreos en el Patrimonio Arquitectónico. USAL.

# G.I.R. Arte y patrimonio universitario. USAL.

los materiales pétreos se lleva a cabo mediante la realización de envejecimientos artificiales acelerados, bajo condiciones controladas, con el fin de reproducir patologías, presentes en el monumento. Por otro lado, se han ensayado métodos de limpieza como la desalación por aplicación de cataplasmas de arcilla, principalmente sepiolita.

*Palabras clave.* Conservación preventiva. Historia constructiva. Caracterización tecnológica de los materiales pétreos. Deterioro. Tratamientos de conservación.

## INTRODUCCIÓN

Ávila fue declarada Ciudad Patrimonio Mundial de la UNESCO en 1984, <https://www.ciudadespatrimonio.org/ciudades/index.php?cd=2>, por aportar un testimonio único, o por lo menos excepcional, de una civilización que desapareció (criterio iii) y por ser un ejemplo sobresaliente de un tipo de construcción, de un conjunto arquitectónico que ilustre una etapa significativa de la historia (criterio iv). Esto hizo que se llevaran a cabo en su Catedral numerosas intervenciones de restauración, tanto antes como después de dicha declaración, hasta llegar a nuestros días.

A lo largo de la historia de las intervenciones realizadas en monumentos, los criterios y metodología han sido diferentes. Hasta finales del siglo XIX, estas intervenciones respondían a cambios de gusto o uso, lo que sometía a los bienes culturales a severas transformaciones, que alteraban sus características originales. En 1931, se diseñó el primer documento, la Carta de Atenas, en la que se comenzó a establecer criterios y metodología en el ámbito de la conservación y restauración de bienes culturales. En ella, se priorizan las acciones de conservación mediante obras de mantenimiento regular y permanente, teniendo una preocupación por el entorno de los monumentos, dando gran importancia a la investigación y la multidisciplinariedad. Con esta base, se realizaron diferentes documentos, que también han ido evolucionando racionalmente, estando en continua revisión, para la realización de intervenciones de conservación y restauraciones más eficaces y duraderas. Después de la carta de Atenas, se han sucedido la Carta de Venecia de 1964, en la que se refleja la necesidad de documentar todo el proceso de intervención y en las conocidas como Cartas del Restauo, que definen los términos de conservación, prevención, salvaguarda y mantenimiento. Otros documentos a destacar son la Convención para la Salvaguarda del Patrimonio Arquitectónico de Europa (Granada, 1985) y el Convenio Europeo sobre la Protección del Patrimonio Arqueológico (La Valeta, 1992). Unos años más tarde, la UNESCO redacta los Principios para la Conservación y Restauración del Patrimonio Construido (Cracovia, 2000).

Más adelante, ICOMOS publica otros dos documentos [Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del Patrimonio

Arquitectónico (Zimbabwe, 2003) y Declaración sobre la Conservación del entorno de las estructuras, sitios y áreas patrimoniales (Xian, 2005)]. El ICOM-CC edita después la Terminología para definir la conservación del Patrimonio Cultural Tangible (Nueva Delhi, 2008). En este último texto se defiende la necesidad de implantar la conservación preventiva sobre la conservación curativa y la restauración. Entre las últimas aportaciones de ICOMOS, se debe destacar la Declaración para la Gestión de Riesgo del Patrimonio Cultural (Lima, 2010), que promueve un enfoque multidisciplinar para una protección sostenible del Patrimonio y la conservación o restauración de todos los restos culturales, de acuerdo con los criterios de integridad y autenticidad y los principios para la salvaguarda y gestión de las poblaciones y áreas urbanas históricas (La Valeta, 2011), cuyo principal objetivo es proponer estrategias para las intervenciones en poblaciones y áreas urbanas históricas, garantizando en todo momento el respeto al Patrimonio, así como la calidad de vida de sus habitantes.

En general, actualmente cualquier intervención debe enmarcarse en un proyecto de conservación, que tendrá como eje prioritario la estabilización de los procesos de alteración y la aplicación de una estrategia de conservación preventiva fundamentada en la actuación sobre el origen del deterioro y en los factores externos al propio bien cultural. Dada la complejidad de la conservación de un bien cultural, los estudios han de abordarse desde una perspectiva interdisciplinar, donde los técnicos se vinculen a la intervención a lo largo de su desarrollo. El director del proyecto ha de favorecer el diálogo y la comunicación entre ellos. Desde el inicio se han de definir las pautas del diseño y un protocolo de conservación sostenible, integrado en un plan de conservación preventiva, que contemple el seguimiento y control posterior.

En el Proyecto Coremans “Criterios de intervención en materiales pétreos”: 2013, se señalan las áreas globales de posible investigación. Su realización va a depender tanto del conocimiento previo del bien cultural, como de la problemática a abordar: 1) Marco legal y normativa de referencia, 2) Uso y gestión, 3) Documentación gráfica y métrica con las técnicas más adecuadas, 4) Investigación histórica, en todos sus aspectos

y diversidad de fuentes documentales: epigrafías, documentos gráficos, históricos, libros de fábrica, fotografías, memorias de intervenciones anteriores, etc., 5) Estudio del bien cultural: significancia, estudio arqueológico, sistemas y etapas constructivas, análisis estructural, identificación y seguimiento de posibles movimientos, técnicas y procesos de ejecución, caracterización de materiales y localización de canteras históricas, 6) Estudio del medio: geotecnia, hidrogeología, condiciones ambientales y entorno natural y antrópico, 7) Estudio del estado de conservación: examen preliminar, caracterización de la degradación de los materiales, patología estructural, humedades, sales y biodeterioro y 8) Diagnóstico: identificación y localización de indicadores de deterioro, valoración del deterioro y evaluación de los riesgos de deterioro.

Una vez analizados estos puntos, conociendo el diagnóstico del deterioro y la evaluación de las diferentes opciones planteadas de conservación en el laboratorio, se derivará la propuesta de intervención definitiva, que confirma las ideas ya propuestas por García de Miguel: 1999.

En este trabajo, se lleva a cabo una revisión de los trabajos realizados en la Catedral de Ávila por los autores del mismo, para abordar una intervención de restauración y/o conservación en el futuro, proponiendo para el mantenimiento de dicho monumento realizar su conservación preventiva.

## MONUMENTO

### *Historia constructiva de la Catedral de Ávila*

La catedral de Ávila, aún en su estructura una compilación extraordinaria de diferentes periodos constructivos. Su arquitectura, fundamentalmente medieval, fue modificándose con el paso de los siglos, ampliando algunos espacios y transformando otros ya con los nuevos estilos imperantes en cada momento. Su estructura fortificada es uno de los mejores ejemplos conservados en Europa de templo-fortaleza, un «verdadero bastión militar».

Hubo una primera catedral, dedicada a San Salvador, y quizá nunca terminada, de la que no quedan restos en pie y sobre la que seguramente se levantó la actual. Esta, iniciada hacia 1160-1180 y trazada por Fruchel –quien habría modificado un hipotético proyecto inicial–, presenta una cabecera con numerosas capillas absidiales abiertas en la girola. Esta cabecera fortificada, incorporada en la muralla, con saeteras e incluso una barbana –que partía desde el alcázar hasta San Vicente–, se completó con un forro de sillería en el que se dispuso el adarve de la muralla a mediados del XIII. Ya en la segunda mitad del siglo XV,

sería reforzada con un triple almenado con adarve y cuerpo de matacanes que en Ávila se conoce como cimorro y que se ha relacionado con Juan Guas.

En la girola, al presentar un imponente tamaño, se colocaron una serie de apoyos intermedios sobre los que pudieran descansar las bóvedas, logrando un irregular doble deambulatorio. Estos apoyos a base de columnas monolíticas de granito quedan atados con unos toscos dinteles –relacionadas con intervenciones ya del XVI. Las más antiguas tienen varios tambores.

La cabecera presenta gran preocupación estética que se observa en los capiteles –moldeados en yeso de forma sorprendente– y molduras, en las bóvedas de horno de los absidiolos y, sobre todo, en el material empleado para su realización: la piedra sangrante de La Colilla.

Tras la primera etapa constructiva, la románica, se sucedieron diferentes fases que afectaron al templo, al claustro y a otras nuevas dependencias hasta el siglo XVI. El gótico se fue añadiendo sobre lo anterior, provocando en cierta manera, desajustes en la fábrica. Avanzado el siglo XIII se cerrarían con ojivas las naves laterales, y en esta misma centuria se construyó la primera sacristía, se colocó un primer forro a la cabecera, se realizó la Sala Capitular –hoy Sacristía de Comuneros, con una imponente bóveda octogonal con trompas angulares– y el Tesoro o Sacristía de Beneficiados, ambas obras relacionadas con el Maestro Don Varón. A finales del XIII se construye la antigua sacristanía en el extremo oriental de la panda norte del claustro y se ejecuta buena parte del claustro sobre lo que fuese el refectorio de canónigos.

Al inicio de la centuria siguiente se realizaría el Portal de las Imágenes, puerta situada originalmente entre las dos torres a la altura del primer tramo del templo, que sería trasladada –y readaptada para tal fin– a la fachada norte siglo y medio después por Juan Guas. Hacia 1325-1350 se cerraron las bóvedas de la nave central y el crucero, se terminaron los muros de la nave y el occidental del crucero, se dio mayor altura a la nave central y, como consecuencia, se aumentaron los contrafuertes exteriores.

Desde la segunda mitad del siglo XV y primera del XVI, intervendrán en la catedral de Ávila maestros de la talla de Juan Guas o Vasco de la Zarza. El primero de ellos se ocuparía del traslado de la, en su momento, puerta principal hasta la puerta norte. Realizó también la actual puerta principal, que sería reformada en 1779 por Ceperino Enríquez de la Serna dejando la obra de Guas oculta por una profusa decoración barroca. Guas se encargaría, asimismo, del corredor que comunica ambas torres por el interior sobre la puerta, del cerramiento de los vanos del primer cuerpo de las torres y, posiblemente, del cambio

en la salida de las escaleras de ambas torres desde las naves. Por otro lado, realizó el paramento interior de la portada de los pies, oculto en gran medida por el cortavientos de la puerta. También fue Guas quien eliminó la tribuna. En 1495 se abrieron vanos en la capilla de Gracia para iluminar el trasaltar.

Vasco de la Zarza junto a Pedro de Viniegra, colocarían la crestería de granito de gusto plateresco en el claustro a comienzos del XVI. En este siglo también se abrieron las tres capillas de los ángulos en el claustro. Se instalaron los pulpitos y altares de santa Catalina y san Segundo ante la capilla mayor y se procedió a realizar una serie de reformas en la cabecera. Entre ellas: se desmontó la tribuna del deambuladorio y, como consecuencia, se hubo de reforzar el exterior de la cabecera con la instalación de nuevos arbotantes. En 1490 se hace la librería, hoy capilla del Cardenal y obra de Martín de Solorzano que sigue el modelo de Santo Tomás, sobre todo en cuanto al tratamiento de los materiales. Entre 1499 y 1512 se instaló el gran retablo mayor con tablas de Berruguete, Borgoña y Santa Cruz. Entre 1509 y 1511 se cegaron los arcos del testero de la capilla mayor con el sepulcro del Tostado y, entre 1531 y 1547, Lucas Giraldo, Juan Rodríguez y Corneles de Holanda hicieron el nuevo coro y trascoro. También del XVI son las capillas de la Concepción y de la Piedad –o de la Blanca–, abiertas en el lado norte. La primera de ellas se atribuye a Pedro del Valle.

Los siglos XVII y XVIII estuvieron marcados por la decadencia política, económica y cultural que sufrió la ciudad de Ávila. Aun así, se realizaron algunas obras de relevancia como las capillas de Velada y san Segundo, la nueva sala capitular, las rejas y la nueva portada oeste.

Francisco de Mora fue el encargado de realizar la traza de la capilla de san Segundo, construida entre 1595 y 1602 con piedra berroqueña y de Cardeñosa, así como piedra caleña –sangrante– de las canteras de Pozo Airón. La Capilla de Velada, realizada en tres fases, una primera con la piedra gris oscura que desde la cripta llega hasta por encima del escudo se ha relacionado con los Mora. La segunda, con una piedra más clara, se inició en 1691 siguiendo la traza de Juan Sánchez Barba, Joseph Arroyo y Antonio Carasa, llegando hasta la cornisa. A finales del XVIII Juan Antonio Cuervo remataría el último cuerpo con un ochavo de ladrillo. En 1691 se construyó también el arco de entibo sobre el trascoro.

Las actuaciones más destacadas de las emprendidas en el siglo XVIII en la catedral de Ávila fueron la instalación de un nuevo órgano, el cerramiento del claustro, las nuevas rejas del coro y la capilla mayor, la nueva vía sacra, el intento de ampliar con un segundo cuerpo el coro

catedralicio, la nueva sala capitular –con trazas de Alberto de Churriguera–, la nueva portada principal y la finalización de las dependencias de la capilla de La Blanca o de la Trasfixión.

El comienzo del siglo XIX estuvo marcado por la invasión de las tropas napoleónicas que se llevaron buena parte de la platería catedralicia. No existen intervenciones arquitectónicas relevantes en esta centuria.

### *Intervenciones. Restauraciones<sup>1</sup>*

A principios del siglo XX, en 1914, se publica la declaración de la catedral de Ávila como Monumento Nacional. Fue en esta centuria cuando se acometieron una serie de intervenciones no demasiado afortunadas, sobre todo tras la Guerra Civil. No obstante, en la década de los años 20 se creó el Museo y se colocaron en el triforio nuevas vidrieras realizadas por la casa Maumejean. Desde 1941 hasta 1963, Anselmo Arenillas se encargó de la realización de diversas restauraciones en las cubiertas, las vidrieras, las bóvedas de la girola y nave sur, las fábricas de sillería, los ventanales de la epístola, nave central y puerta principal, y se encargó también de intervenir en las torres y el reloj. Sin embargo, el hecho de incorporar cerchas de hormigón armado en la zona sur y perfiles metálicos en la norte no fue una buena elección.

Entre 1972 y 1983, José Miguel Merino de Cáceres se encargó de liberar el claustro del cerramiento que se había instalado en 1773. Fue entonces cuando se descubrió la puerta que comunicaba la sala capitular con el claustro. Posteriormente, Concepción Rodríguez Caro se encargó de la continuación de la restauración de las cubiertas del claustro y del templo iniciada por Arenillas.

El Plan Director aprobado para la catedral de Ávila entre 1994 y 1997, incluyó la instalación de lámparas que después se desmontaron, el desmantelamiento de la reja de la vía sacra y su utilización con fines turísticos, la reforma del presbiterio con hormigonado de algunas zonas y enterrando las lápidas sepulcrales del episcopologio debajo de un nuevo pavimento de granito níveo. Sobre este, se instaló una nueva cátedra, un gran altar y un ambón. Todos estos proyectos fueron definidos por Pedro Feduchi y el resultado fue la desaparición de uno de los espacios más singulares de la arquitectura española. Tras diversos pleitos parte de estas intervenciones se han revertido.

1. Toda la información se ha obtenido de Gutiérrez & Navascués, 2004; Duralde Rodríguez, 2014 y Moreno Blanco (cronología)

En el año 2004, con motivo de la celebración de las Edades del Hombre con sede en Ávila, se colocaron una serie de vitrinas y perfiles metálicos que cerraron los arcos del claustro. En los últimos años el arquitecto José Ramón Duralde ha realizado varias intervenciones en la catedral abulense, sobre todo en las cubiertas de la nave norte con la reubicación de la balaustrada y la liberación de la linterna de la capilla de la Blanca.

La última intervención realizada en la fachada occidental en el año 2015 ha permitido conocer mejor cómo era la portada de Juan Guas. Se consiguió recuperar parte del tímpano calado de la puerta y se descubrió parte del sistema defensivo de la catedral en esa zona.

### *Deterioro de los materiales pétreos*

Los materiales pétreos utilizados en las distintas etapas constructivas de la Catedral de Ávila son las siguientes (Figuras 1, 2, 3), aunque en el presente trabajo no se van a considerar los materiales carbonatados (calizas y dolomías):

Granito silicificado rojo, Piedra Sangrante, Alterita (PSR): compuesto por arcillas, (caolinitas), oxihidróxidos de hierro, y ópalo CT. Se ha empleado, principalmente en la primera etapa de la construcción de la Catedral, en la Girola

Granito silicificado blanco, Piedra Sangrante, Alterita (PSB): compuesto por arcillas, (caolinitas), oxihidróxidos de hierro, y ópalo CT. Se ha empleado, principalmente en la primera etapa de la construcción de la Catedral, en la Girola

Granito alterado ocre, Alterita (GAO): con arcillas, (esmectitas), y oxihidróxidos de hierro.

Granito Gris Ávila, (GGA): es un granito inequigranular, desde grano medio a grueso. Los minerales esenciales son el cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, y biotita. Se emplea fundamentalmente, en la segunda fase de construcción de la Catedral, en las naves, bóvedas, y torres, así también en etapas posteriores, en el Cimorro y en la crestería de estilo plateresco del Claustro.

Granito Fino Airón (GFA): es un granito leucocrático de grano fino. Los minerales

esenciales son el cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y/o moscovita. Se emplea en las capillas abiertas en el lado norte desde el XVI-XVIII.

A finales del XIII y principios del XIV, se emplean en el claustro y en las sacristías los cuatro tipos. PSR, PSB, GAO, y GGA.

El deterioro más generalizado observado en la Catedral de Ávila son las formas de alteración de placas, escamas, desagregación, arenización, y eflorescencias salinas. Las Alteritas (PSR, PSB, y GAO) son las que más grado de alteración presentan, no sólo por sus propiedades intrínsecas (mineralógicas, físico-mecánicas, etc), sino también porque son los materiales pétreos más antiguos utilizados en la Catedral (algunos sillares han perdurado más de 800 años). Las Alteritas son idóneas para zonas no sometidas a fuerte humedad, pero en muros con humedades de cimentación y en bóvedas que han sufrido filtraciones de agua presentan un alto grado de deterioro, y con frecuencia han sido repuestas.

En las Alteritas, el ópalo CT es el componente mineralógico más lábil, seguido por las arcillas (caolinitas y/o emectitas) y los oxihidróxidos de hierro, que muestran una fuerte reactividad superficial, y una susceptibilidad a los cambios debidos a las condiciones del medio (pH, potencial redox, etc.), y a una alta porosidad superior al 20%.

En las distintas partes del monumento se ha podido detectar la existencia de sales solubles en las zonas más deterioradas, afectadas por humedades tanto de ascensión capilar como de filtraciones de tejados y terrazas. En las zonas secas del monumento, sin humedad permanente, pero sometidas a oscilaciones de viento y térmicas, se observa un deterioro consistente en la formación de escamas, placas, arenización, y desagregación.

El fenómeno de gelifracción se da con mucha menos intensidad en el interior de los edificios, como ya han demostrado Iñigo et al. (2001a), aunque hay otro tipo de microambientes, que sustituyen a los del ambiente exterior, provocado por el clima a que está sometido el monumento. En el caso que nos ocupa, en el Claustro de la Catedral de Avila, la ascensión capilar de aguas superficiales, subsuperficiales o subterráneas, que contienen importantes cantidades en sales solubles, dan lugar a fenómenos de haloclastia.



Figura 1. Localización del Granito Gris Avila (GGA), y de la Piedra Sangrante (PSR, PSB) en la Catedral de Ávila. A) Cimorro. B) Ensuciamiento y marcas de cantería en el GGA. C) Desplacación en el GGA. D) Detalle de C). E) Biodeterioro y desagregación en el GGA. F) Desplacación y pérdida de material en la PSR y PSB.

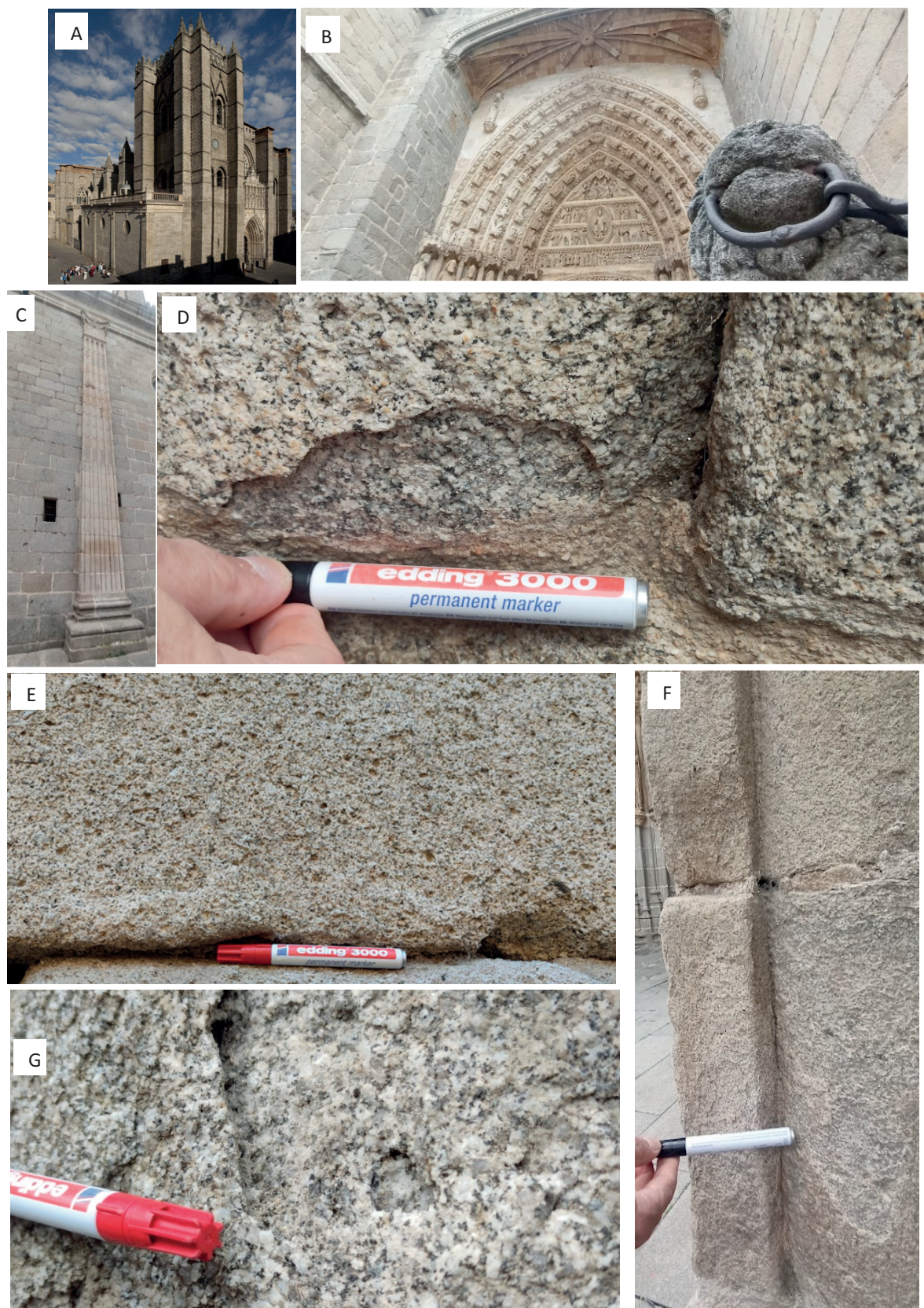


Figura 2. Localización del Granito Gris Avila (GGA), y del Granito Fino Airón (GFA) en las partes Norte y Occidental de la Catedral de Ávila. A) La Torre en GGA, y las capillas del XVI al XVIII (parte norte) alternancia cromática del GGA y el GFA. B) Puerta norte trasladada de la puerta principal. C) Detalle de la pared norte con alternancia de GGA y GFA. D) Desplacación en el GGA. E) Deterioro en forma de picoteado en el GFA. F) Descamación en el GFA. G) Desplacación y eflorescencias salinas en el GGA.

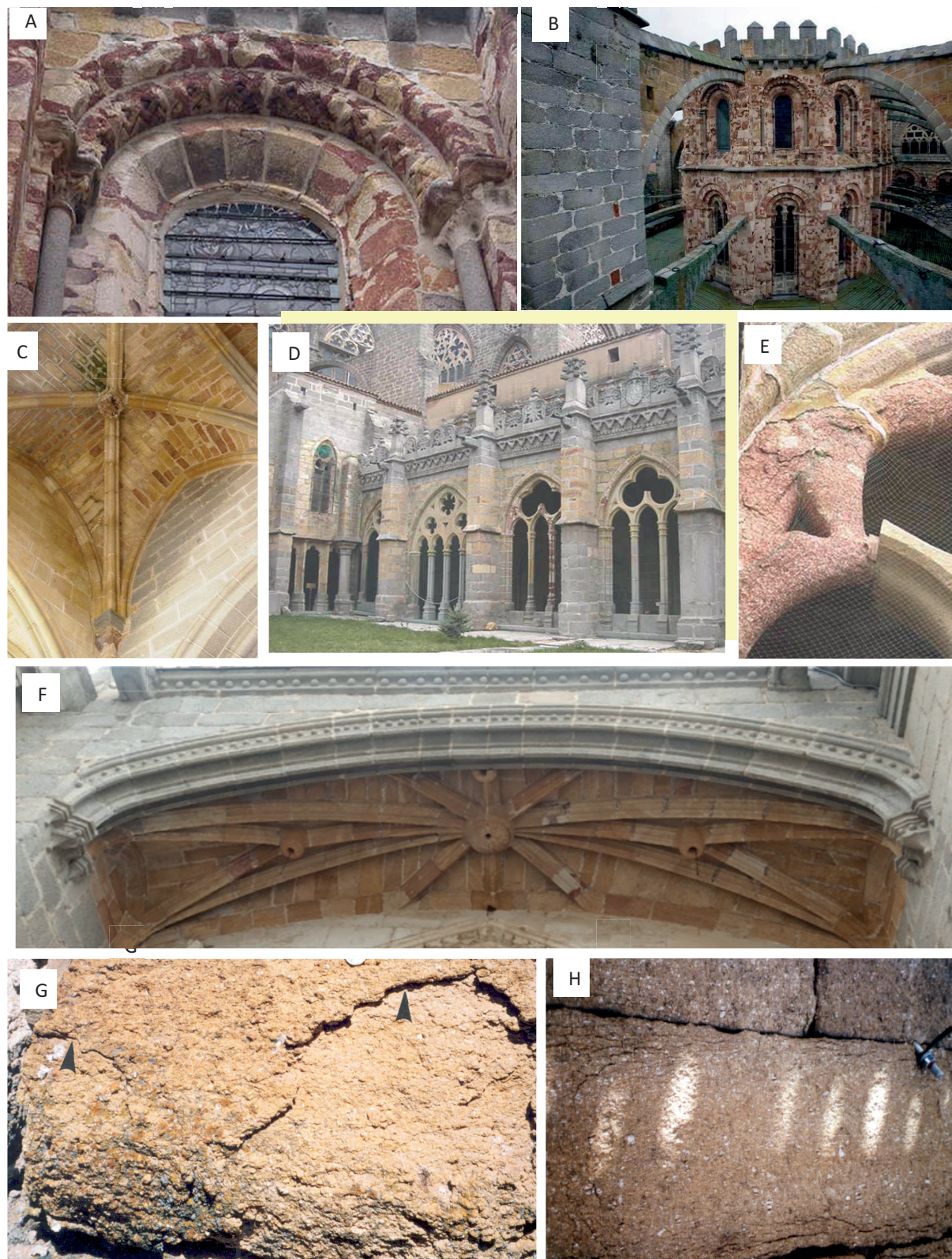


Figura 3. Localización de las Alteritas en la Catedral de Ávila (Piedra Sangrante Roja, PSR, y Blanca, PSB, y Granito alterado ocre, GAO). A) Detalle de la Girola en PSR, PSB y en menor medida sillares en GAO. Desplacación en PSR y PSB . B) Girola en PSR y PSB. C) Bóveda del Claustro, principalmente en GAO, y con humedades. D) Claustro en GAO, GGA, y en menor medida PSR y PSB. E) Detalle de la descamación en PSR del Claustro. F) Bóveda de la puerta norte de la Catedral en GAO. G) Desplacación en GAO. H) Agrietamiento y fisuración en GAO.



### *Estudio del clima/microclimas*

En el monumento, además de la determinación de las patologías (García-Talegón y col: 2015a, Iñigo y col: 2017) y materiales pétreos utilizados para su construcción, proponiendo la localizando de sus posibles canteras de extracción, para realizar reposiciones de material en el mismo (García-Talegón y col: 1999, 2015b; Iñigo y col: 2005), también se puede realizar la toma de datos ambientales (García-Talegón y col: 2006, 2013; Iñigo y col: 2019). En este sentido, se han determinado microclimas y microambientes, determinando la temperatura y humedad relativa en el exterior del edificio, mediante la instalación de una estación meteorológica, en la que se almacenan, en un STARLOG de la casa UNIDATA, los datos cada cuatro horas del sensor de humedad relativa y temperaturas ambientales (Sensor SKYE, modelo SKH 2013), Figura 4E, y en posiciones en el interior del Claustro con diferentes orientaciones (sur y norte) se dispusieron dos sensores inteligentes autónomos SKYE, modelo SDL 2545, que también recogían datos de temperatura y humedad relativa cada hora.

En las Figuras 4a y 4b, se muestra a lo largo del día, en el exterior del edificio, en las estaciones de otoño y verano respectivamente, los cambios bruscos medios de temperatura y en las Figuras 4c y 4d, los de la humedad relativa, que se suavizan en ambos casos en las posiciones del interior del Claustro. Por otra parte, solo hay variaciones entre las posiciones interiores del Claustro en la estación de verano, tanto en temperatura, Figura 4b, como en humedad relativa, Figura 4d, demostrando que existen solamente microclimas entre estas dos posiciones solo en esta estación. Por otra parte, entre estas dos posiciones respecto al

ambiente del exterior de la Catedral hay microclimas en todas las estaciones del año (Iñigo y Vicente-Tavera: 2001a).

Por otra parte, en la estación de meteorología instalada en el exterior de la Catedral se almacenan además en el STARLOG los datos cada cuatro horas, de los siguientes sensores: Dos células de flujo energético (EKO, modelo MF-130) y cuatro termistores (modelo UNIDATA, rojo, 15 W), que miden la temperatura en la superficie y en el interior de los bloques a 10 cm de profundidad en las variedades GGA y GAO, Figura 5A.

Los sensores de flujo de energía superficiales están constituidos por una lámina de sensores de flujos de calor, que están rodeados por dos láminas protectoras de resina epoxi reforzada con fibra de vidrio, Figura 5B. Este sensor se coloca entre el bloque de piedra y una fina lámina de 1 cm de espesor del mismo tipo de roca. Para evitar la discontinuidad entre la superficie de la piedra y del sensor se utiliza una pasta superconductor del calor, compuestas por silicona y OZn, Figura 5A.

La diferencia de temperatura entre los dos termistores instalados en la superficie del bloque y a 10 cm en profundidad en el interior del bloque, nos da el gradiente térmico de las rocas en esa distancia (GAO y GGA), Figura 5A. En las Figuras 5C y 5D, en la estación de verano se aprecia los mayores gradientes de temperatura entre la superficie y 10 cm de profundidad en el interior del bloque de GGA y GAO respectivamente. En el bloque de GGA se observan unos gradientes de temperatura mayores que en el GAO, debido a su color superficial, más oscuro (gris frente a ocre) y a su menor porosidad, disipando más difícilmente el calor absorbido (Iñigo y Vicente-Tavera: 2002).

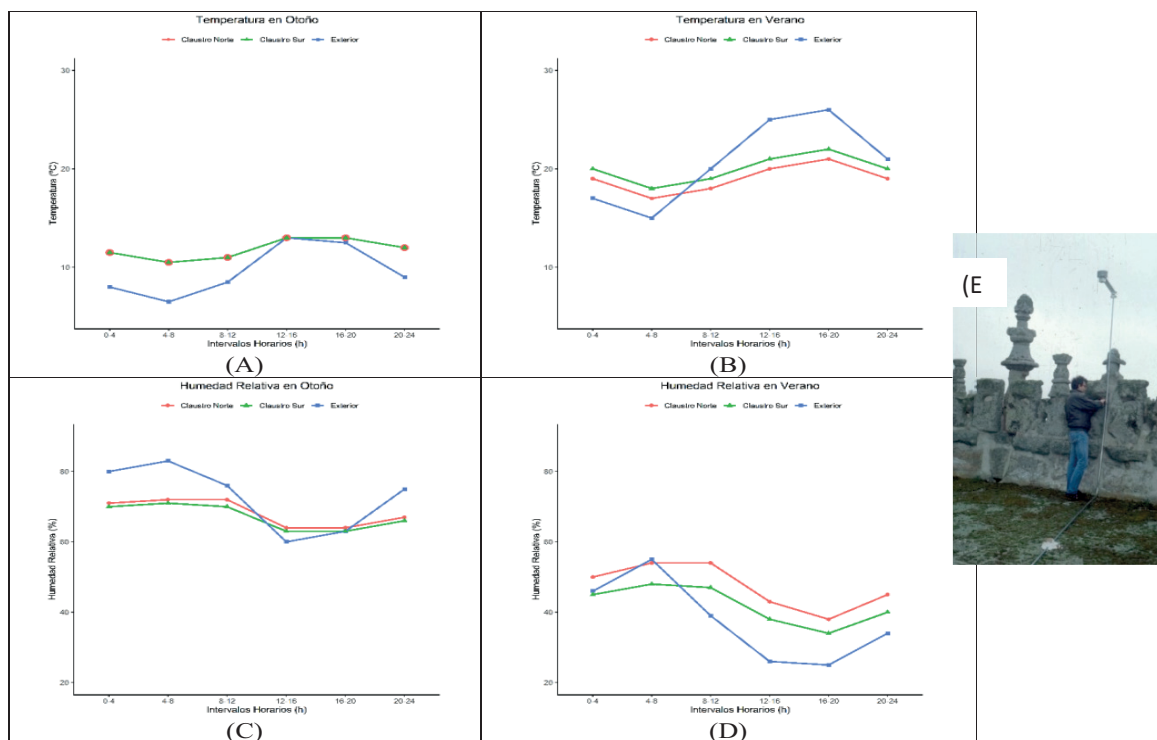


Figura 4. A) y B) Variaciones de temperatura media a lo largo del día en todas posiciones en la estación de otoño y verano respectivamente, C) y D) Variaciones de humedad relativa media a lo largo del día en todas posiciones en la estación de otoño y verano respectivamente y E) Sensor de temperatura y humedad relativa (SKYE, modelo SKH 2013), utilizado en la estación meteorológica instalada “in situ” en la Catedral de Ávila.

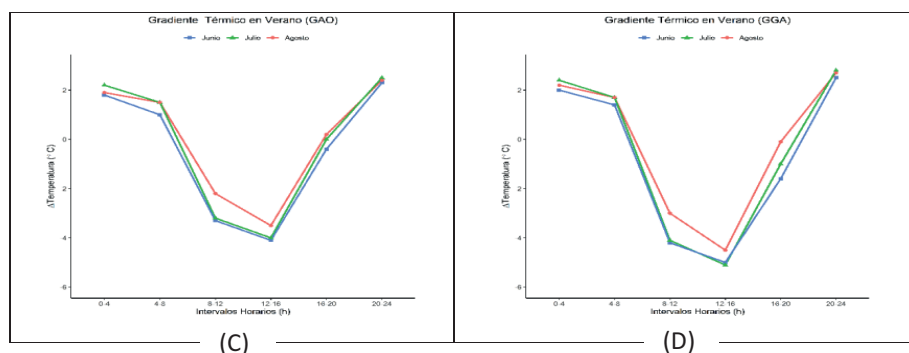
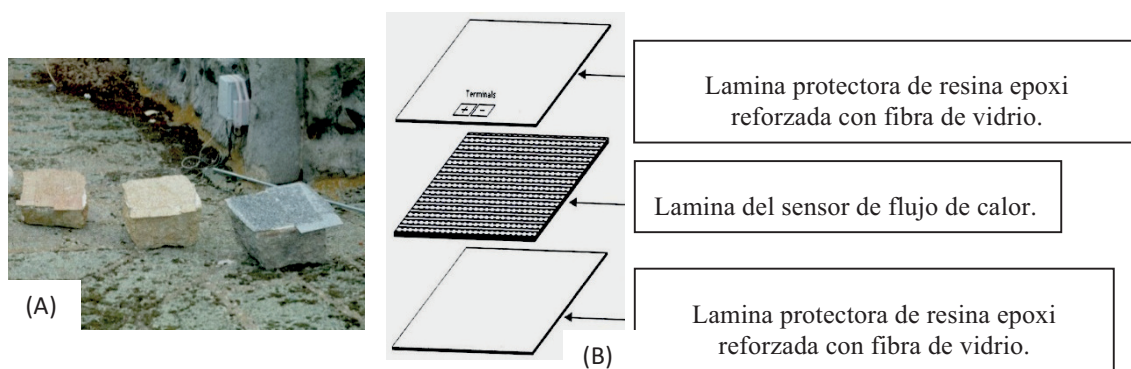


Figura 5. A) Sensores de flujo de energía superficiales (marca EKO, modelo MF-130) utilizados en la estación meteorológica instalada “in situ” en la Catedral de Ávila, B) Componentes de los sensores de flujo de energía superficiales y C) y D) Gradientes de temperatura medios a lo largo del día entre la superficie y 10 cm en profundidad en la estación en bloques de las variedades GAO GGA respectivamente.

## LABORATORIO

### *Caracterización*

Los materiales pétreos utilizados en la construcción del monumento son (Figuras 1, 2 y 3):

Granito silicificado rojo, Piedra Sangrante, Alterita (Figura 6): nivel de alteración superior, con arcillas, filosilicatos 1:1 oxihidróxidos de hierro, y ópalo CT.

Granito silicificado blanco, Piedra Sangrante, Alterita (Figura 6): nivel de alteración superior, con arcillas, filosilicatos 1:1 oxihidróxidos de hierro, y ópalo CT.

Granito alterado ocre, Alterita (Figura 6): nivel de alteración medio, con arcillas, filosilicatos 2:1, y oxihidróxidos de hierro.

Granito Gris Ávila, Cardeñosa, Ávila (Figura 7): nivel inferior del perfil, es un granito inequigranular, ligeramente porfídico, con megacristales de feldespato, que tienden a sobresalir en una mesostasis de tendencia seriada. Los minerales esenciales son el cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, y biotita; los minerales accesorios cordierita, apatito, moscovita y zircón.

Granito Fino Airón, procedente de La Alamedilla del Berrocal, Ávila (Figura 8): es un granito leucocrático de grano fino, con textura hipidiomórfica. Los minerales esenciales son el cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y/o moscovita; los minerales accesorios cordierita, apatito y zircón.

Se ha realizado el muestreo de bloques en el yacimiento “La Colilla” (Reserva Natural del Estado) y de los sillares que forman parte de la Catedral de Ávila. En la cantera se estudian cuatro tipos de roca que se sitúan en tres niveles:

- Nivel inferior: granito sano “Gris Ávila”, de grano grueso (GGA). Aparecen en bolos y en diques.

- Nivel medio: granito alterado ocre (GAO). Presenta una potencia de 10m.
- Nivel superior: granito silicificado rojo (PSR), y granito silicificado blanco (PSB). Aparece en la cumbre de la cantera, con un espesor de 1m. Muestra variaciones de color. Para su estudio hemos separado las partes rojas y las blancas.

Trabajos anteriores de los autores (García-Talegón y col:1999; García-Talegón y col: 2016b) indican que las variedades, GAO, PSR, PSB, son consecuencia de fuertes procesos de alteración (paleoalteraciones) que afectaron al Zócalo Hercínico (granitos, pizarras, calizas, esquistos, etc.); son pues, productos de alteración del granito “Gris Ávila”, que es la facies sana. Los datos geoquímicos indican que en las muestras de cantera los contenidos en SiO<sub>2</sub> aumentan al pasar del Granito Gris Ávila (GGA), al Granito alterado ocre (GAO) y sobre todo PSR y PSB. Los cambios mineralógicos sufridos en las paleoalteraciones explican dicho aumento, así como las variaciones químicas que se han observado.

### *Ensayos de alterabilidad*

Para determinar la alterabilidad o durabilidad, se realizan ensayos de envejecimiento acelerado, bajo condiciones conocidas y controladas. Así, en este trabajo se ha evaluado la durabilidad de parte de las variedades estudiadas frente a los ensayos de envejecimiento acelerado más agresivos en clima semiárido y tendencia continental, con baja contaminación atmosférica, como es el de la ciudad de Ávila (Iñigo y col: 2000a, 2021) y se han reproducido parte de las patologías presentes en los monumentos. En la Figura 9 (A-D), se estudia la durabilidad de las variedades de Granito Fino Airón (GFA) y del Granito Gris Ávila (GGA) de cantera frente al envejecimiento de 90 ciclos de hielo/deshielo junto a frío/calor + cristalización de sales (sulfatos).

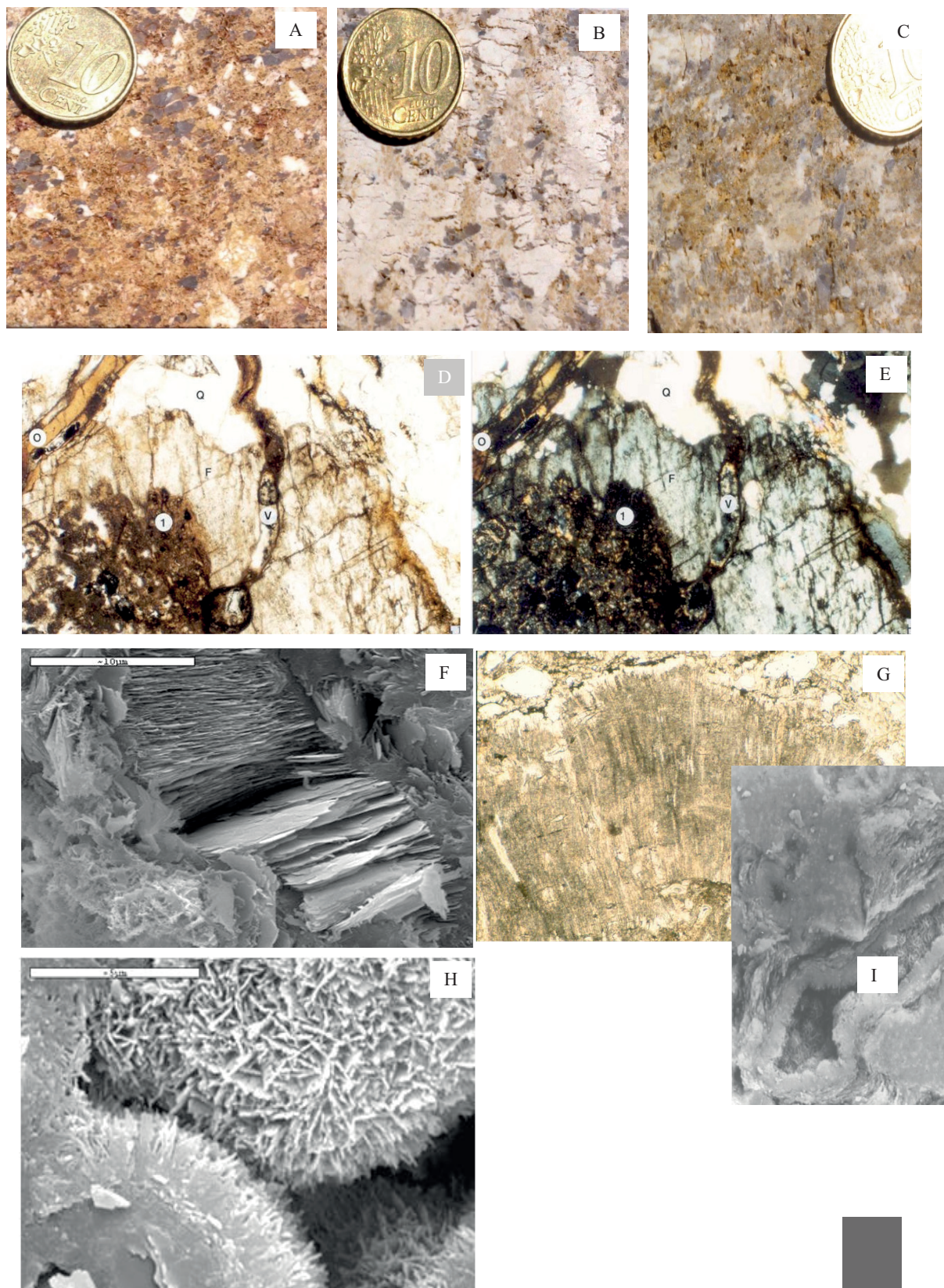


Figura 6. A) Piedra Sangrante, Granito silicificado rojo, PSR. B) Piedra Sangrante, Granito silicificado blanco, PSB. C) Granito alterado ocre, GAO. D) y E) microfotografías de láminas delgadas (nícoles paralelos y cruzados) del nivel intermedio de alteración, GAO. Feldespato (F) alterado con fisuras rellenas de ópalo CT (O) y arcillas (1), huecos (V), y cuarzo (Q). F) Microfotografía de macrocaolinita al MEB y G) Microfotografía de macrocaolinita al microscopio petrográfico. H) e I) Microfotografías al MEB de lepiesferas de ópalo CT en el nivel superior de alteración (PSR y PSB).

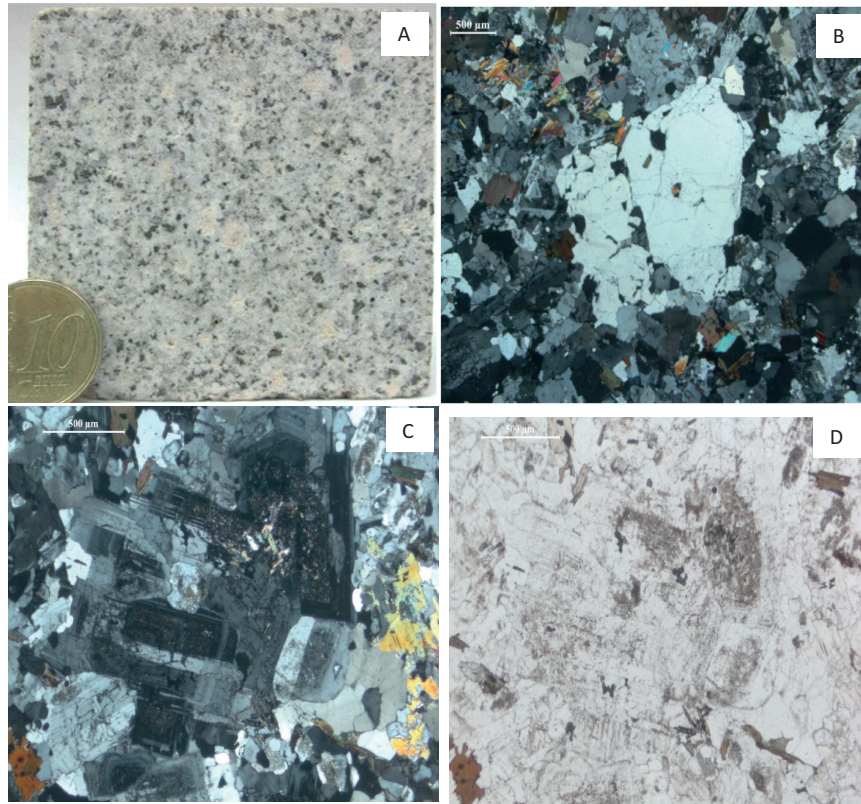


Figura 7. A) Granito Fino Airón, GFA B) Microfografía de agregados de cuarzo (nícoles cruzados) de GFA. C) y D) Agregados de cristales de plagioclasa (syneussis) de GFA. (Nícoles cruzados y paralelos respectivamente)

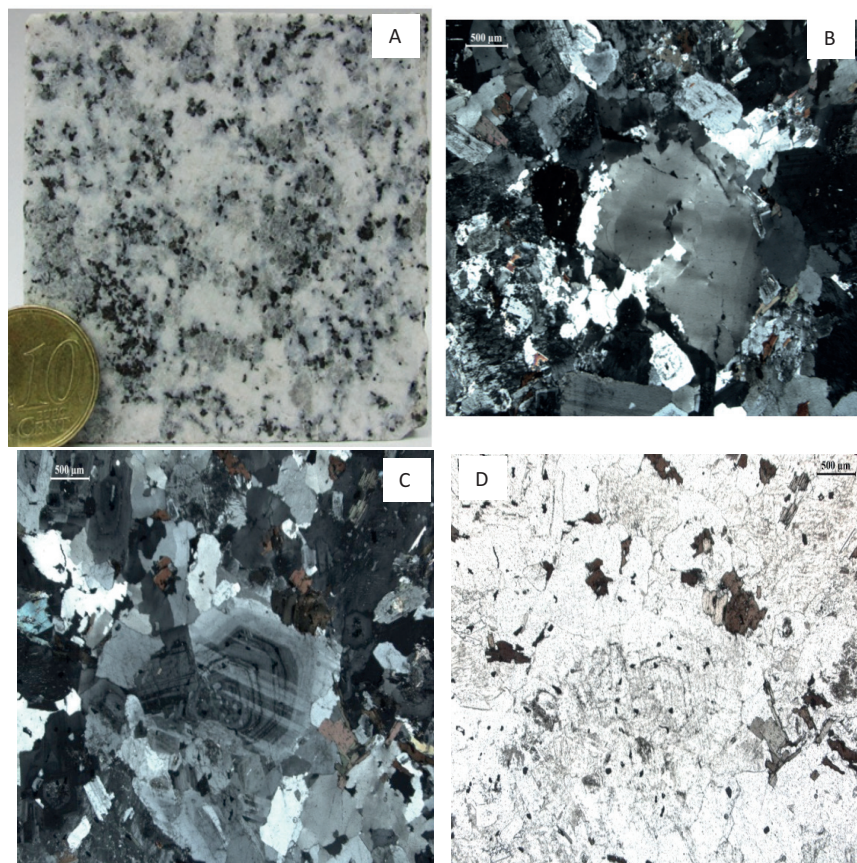


Figura 8. A) Granito Gris Ávila, GGA B) Microfografía de agregados de cuarzo (nícoles cruzados) de GGA. C) y D) Cristal de plagioclasa zonada de GGA. (Nícoles cruzados y paralelos respectivamente)

En la variedad GFA, Figura 9C, se observan fisuras y grietas inicialmente, que posteriormente pasan a grietas mayores junto a arenización, que llega casi a la destrucción de la probeta. Por otro lado, el envejecimiento artificial acelerado de la variedad GGA, Figura 9D, el deterioro es mucho menor, y solamente sobre la superficie de las probetas, con pequeñas pérdidas de material.

En la Figura 10, se estudia la durabilidad de la variedad Granito alterado ocre (GAO). En la izquierda, Figura 10 A, se observa el aspecto de la

variedad de cantera antes de ser envejecida; en el centro, Figura 10 B, se muestra el mismo tipo de piedra, que ha sido sometida a 10 ciclos de cristalización de sales, con fuerte deterioro superficial, en que la probeta ha perdido parte de las aristas y vértices. Por otra parte, a la derecha, Figura 10 C, tenemos una probeta del mismo tipo de piedra, que ha sido sometida a 18 ciclos de hielo/deshielo junto a frío/calor + cristalización de sales, en que en la probeta aparecen fisuras, grietas y se comienza a arenizar.

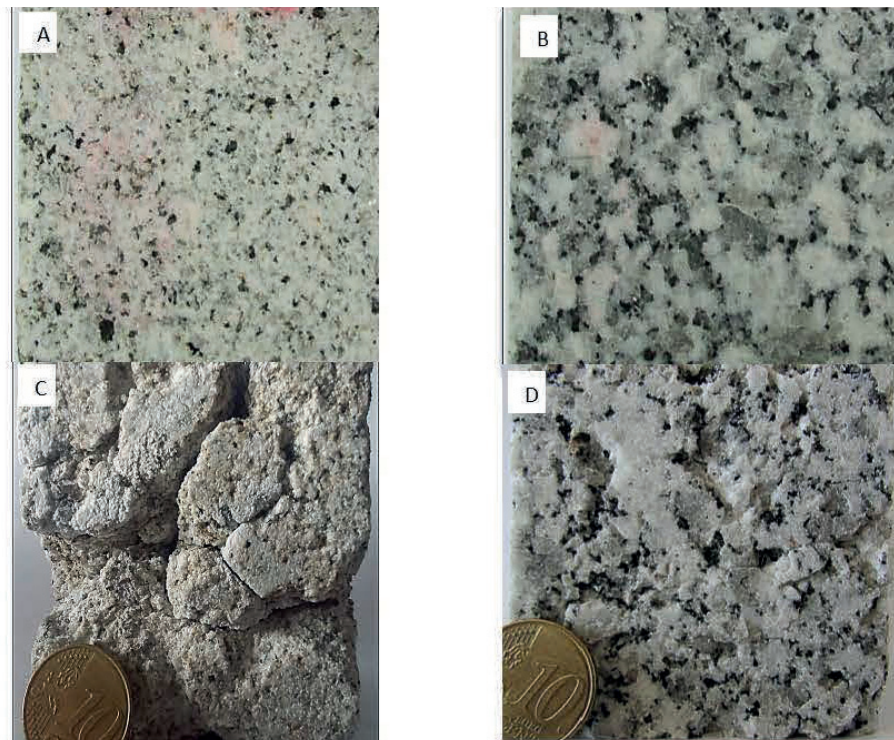


Figura 9. A) Variedad GFA de cantera, B) Variedad GGA de cantera, C) Durabilidad de la variedad GF A frente a envejecimientos de hielo/deshielo junto a frío/calor + cristalización de sales (sulfatos) y D) Durabilidad de la variedad GGA frente a envejecimientos de hielo/deshielo junto a frío/calor + cristalización de sales (sulfatos).

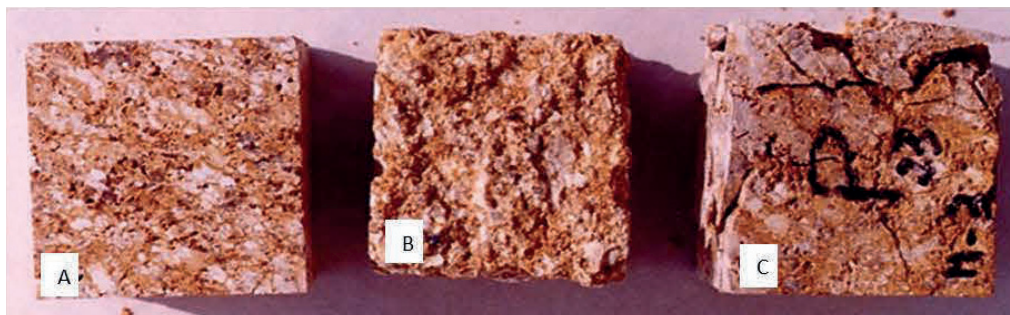


Figura 10. A) Variedad GAO de cantera, B) Variedad GAO sometida a 10 ciclos de cristalización de sales (sulfato) y C) Variedad GAO sometida a 18 ciclos de hielo/deshielo junto a frío/calor + cristalización de sales (sulfatos).

## EFICACIA DE LOS TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

Para la determinación de la eficacia de los tratamientos de consolidación suministrados por Siliconas Hispania S. A. [RC70 (silicato de etilo) y RC80 (silicato de etilo, junto a una resina metilénica y derivados polisiloxánicos, que tienen acción hidrófuga)] sobre las variedades GSR, GSB y GAO, se determinaron propiedades hídricas (porosidades total y libre, densidades real y aparente y coeficiente de absorción) antes y después de los tratamientos (Iñigo y col: 2007, 2020).

Los tratamientos de consolidación se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento descrito por Iñigo y col: 2001b, 2006.

En la Tabla 1, aparecen los datos medios de las propiedades hídricas de los materiales de cantera estudiados y en la Tabla 2, las mismas propiedades determinadas tras los tratamientos de

consolidación (RC70 y RC80) en las variedades GSR, GSB y GAO. Entre ellas se encuentra la porosidad abierta, que es la que está directamente conectada con la superficie, que va a ser la más importante a la hora de decir que tratamiento es más eficaz sobre una determinada roca. Así, se pueden determinar estas propiedades antes y después de los tratamientos y ver la evolución de los datos obtenidos, pudiendo concluir que ambos consolidantes son eficaces para los tres tipos de roca sin producir efectos adversos en las mismas por su naturaleza. Dentro de los dos consolidantes, es más eficaz el RC80, por su doble acción, como consolidante (silicato de etilo y resina metilénica) e hidrofugante (polisiloxano resinoso), por disminuir más la porosidad libre de las rocas tratadas (Tabla2) frente a las correspondientes de cantera (Tabla 1) que en el caso de utilizar RC70 (silicato de etilo), con acción únicamente de consolidante.

Tabla 1. Datos medios de propiedades hídricas de las variedades de cantera de las piedras estudiadas

Muestra	PT*	PL**	CA***	DR****	DA*****
PSR	20	13	67	2,48	1,98
PSB	22	13	57	2,37	1,87
GAO	28	21	74	2,47	1,77
GGA	0,65	0,62	95	2,68	2,66
GFA	2,01	1,68	84	2,66	2,60

\*Porosidad total (%), \*\*Porosidad libre (%), \*\*\*Coeficiente de absorción (%), \*\*\*\*Densidad real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) y \*\*\*\*\*Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (Iñigo et al: 2007)

Tabla 2. Datos medios de las propiedades hídricas de las variedades de cantera (PSR, PSB y GAO), una vez que han sido tratadas con los consolidantes RC70 y RC80

Muestra	PT*	PL**	CA***	DR****	DA*****
PSR-RC70	19	4	21	2,43	1,99
PSB-RC70	21	11	52	2,40	1,87
GAO-RC70	27	10	37	2,47	1,79
PSR-RC80	18	2	12	2,43	1,96
PSB-RC80	18	3	18	2,39	1,90
GAO-RC80	24	5	22	2,46	1,86

\*Porosidad total (%), \*\*Porosidad libre (%), \*\*\*Coeficiente de absorción (%), \*\*\*\*Densidad real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) y \*\*\*\*\*Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (Iñigo et al: 2007)

Además, un control de calidad a realizar es que los tratamientos no produzcan cambios bruscos del color superficial de los bloques y/o probetas tratados frente a los de cantera (Iñigo y col: 1997).

Por otra parte, el ensayo de desalación de rocas, se llevó a cabo sobre la variedad GAO, cuyas características mineralógicas y petrofísicas han sido publicadas por García-Talegón et al. (2016b). Primeramente, se envejecieron artificialmente bloques

de 5 x 5 x 5 cm por cristalización de sales, siguiendo el procedimiento descrito por García-Talegón et al. (2016a). A continuación, se procedió a la desalación de las rocas por un método no agresivo para el sustrato, aplicación de cataplasmas de arcilla (Trujillano y col., 1995). En este trabajo, se emplearon sepiolita y bentonita suministradas y comercializadas por la compañía TOLSA. Se aplicaron ambas arcillas mediante dos protocolos (húmedo y seco), de acuerdo al procedimiento descrito por Vicente y Vicente-Tavera: 2001. La eficacia de la limpieza se puede evaluar mediante la metodología propuesta por Iñigo y col: 2001c. También, si se emplean diferentes arcillas, además

de la sepiolita, la orientación de sus partículas con diferentes contenidos en agua es un factor que va a influir en la eficacia de su desalación (Iñigo y col: 2000b).

En la Figura 11, se muestran los resultados de la desalación realizada sobre la variedad GAO, mediante cataplasmas de arcilla de Sepiolita y Bentonita, con los protocolos de extracción descritos en la metodología (seco y húmedo), observándose que la cantidad de iones extraídos es mayor con la Bentonita que con la Sepiolita y con respecto a los protocolos se extraen mayor cantidad de iones en el protocolo húmedo que en el seco, tanto aplicando la Sepiolita como la Bentonita.

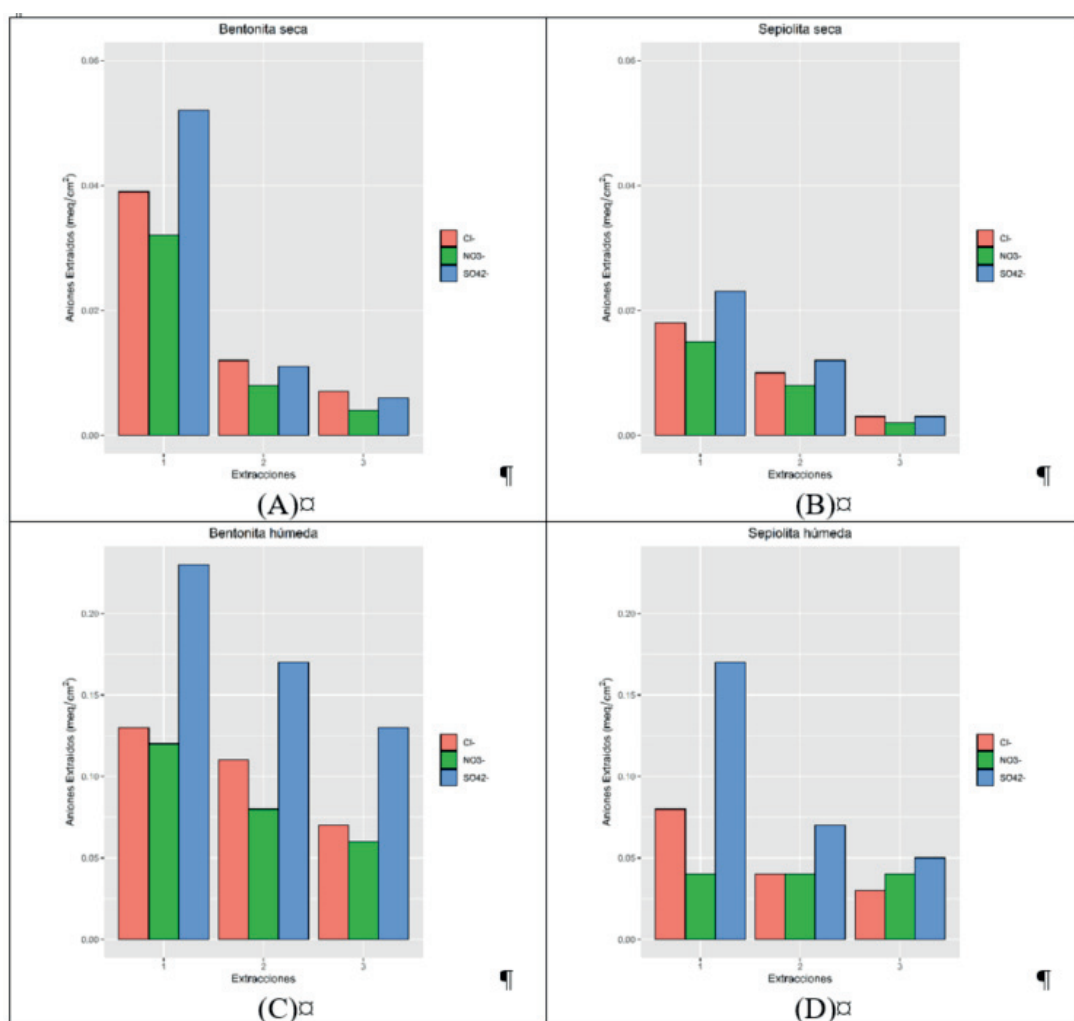


Figura 11. Cantidades medias de iones extraídos (Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) de la variedad GAO por los siguientes tipos de extracciones: A) Bentonita seca, B) Sepiolita seca, C) Bentonita húmeda y D) Sepiolita húmeda.



## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero para este trabajo desde el Ministerio de Ciencias, Innovación y Universidades (PGC2018-098151-B-I00) y Proyecto “CLU-2019-05 – IRNASA/CSIC Unidades de Excelencia”, financiado por la Junta de Castilla y León y cofinanciado por la Unión Europea (ERDF “Europe drives our growth”).

## BIBLIOGRAFÍA

- COREMAN PROJECT. *Criterios de intervención en materiales pétreos*. Ed. Ana Laborde Marqueze. Catálogo de publicaciones del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2013: www.mecd.gob.es. ISBN: 978-84-8181-562-7
- GARCÍA DE MIGUEL, José María. “Tema IV. Piedras naturales, prefabricados y otros materiales”. En *Procedimiento y técnicas constructivas del patrimonio*. Eds. Antonio José Más-Guindal Lafarga, F. Martín-Sánchez, Enrique Nuere Matauco, José María García de Miguel. Editorial Munilla-Lería, Madrid, 1999, 3, pp. 173-213.
- GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta, VICENTE, María Ángeles, MOLINA-BALLESTEROS, Eloy, VICENTE-TAVERA, Santiago. “Determination of the origin and evolution of building stones as a function of their chemical composition using the inertia criterion based on an HJ-biplot”. *Chemical Geology*, 1999, 153, pp. 37-51.
- GARCIA-TALEGON, Jacinta, GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, María, IÑIGO, Adolfo Carlos, VICENTE-TAVERA, Santiago, RIVES, Vicente. “Microenvironments in the inner and outer of the Zamora Cathedral”. En *Heritage, weathering & conservation*. Eds. Rafael Fort, Mónica Álvarez de Buergo, Miguel Gómez-Heras, Carlos Vázquez-Calvo. Leiden: Taylor & Francis, The Netherlands Eds., 2006, 1, pp. 457-461.
- GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta, IÑIGO, Adolfo Carlos, VICENTE-TAVERA, Santiago. “Canonical Biplot as tool to detect microclimates in the inner and outer parts of Salamanca Cathedrals”. En *Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage*. Eds. Miguel Ángel Rogerio-Candelera, Massimo Lazzari, Emilio Cano. London: Taylor & Francis Group, 2013, pp. 59-62.
- GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta, CALABRÉS, Sergio, FERNÁNDEZ-LOZANO, Javier, IÑIGO, Adolfo Carlos, HERRERO-FERNÁNDEZ, Hernando, ARIAS-PÉREZ, Benjamín, GONZÁLEZ-AGUILERA, Diego. “Assessing pathologies on Villamayor stone (Salamanca, Spain) by terrestrial laser scanner intensity data”. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015a, XL-5/W4, pp. 445-451.
- GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta, IÑIGO, Adolfo Carlos, VICENTE-TAVERA, Santiago. “Villamayor stone (Golden Stone) as a Global Heritage Stone Resource from Salamanca (NW of Spain)”. *Journal of Geological Society of London, Special Publication*, 2015b, 407, pp. 109-120.
- GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta, IÑIGO, Adolfo Carlos, VICENTE-PALACIOS, Victor. “A laboratory simulation of desalting on calcareous building stone with wet sepiolite”. *Environment Earth Sciences*, 2016a, 75, pp. 925-932.
- GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta, IÑIGO, Adolfo Carlos, VICENTE-TAVERA, Santiago, MOLINA, Eloy. “Silicified Granites (Bleeding Stone and Ochre Granite) as Global Heritage Stones Resources from Avila (Central of Spain)”. *Geoscience Canada*, 2016b, 43/1, pp. 53-62.
- ICOMOS-ISCS. “Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns”. 2010. <<https://www.ciudades-patrimonio.org/ciudades/index.php?cd=2>> [25 Noviembre 2021].
- IÑIGO, Adolfo Carlos, VICENTE-TAVERA, Santiago, RIVES, Vicente, VICENTE, María Angeles. “Color changes in the surface of granitic materials by consolidated and/or water repellent treatments”. *Color Research and Application*, 1997, 22, pp. 133-141.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, RIVES, Vicente, VICENTE, María Angeles. “Reproducción en cámara climática de las formas de alteración más frecuentes detectadas en materiales graníticos, en clima de tendencia continental”. *Materiales de Construcción*, 2000a, 50/257, pp. 57-60.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, TESSIER, Daniel, PERNES, Miguel. “Use of X-ray transmission diffractometry for the study of clay-particle orientation at different water contents”. *Clays and Clay Minerals*, 2000b, 48, pp. 682-692.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, VICENTE-TAVERA, Santiago. “Different degrees of stone decay on the inner and outer walls of a Cloister”. *Building and Environment*, 2001a, 36, pp. 911-917.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, VICENTE-TAVERA, Santiago, VICENTE, María Angeles, RIVES, Vicente. “Effect of treatments on the pore network of granites”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2001b, 13, pp. 166-168.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, ALONSO, Rafael, VICENTE-TAVERA, Santiago. “Dissolution of salts crystallised in building materials using ultrasound: an alternative to the NORMAL (1983) standard methodology”. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001c, 8/2, pp. 127-130.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, VICENTE-TAVERA, Santiago. “Surface-Inside (10 cm) thermal gradients in granitic rocks. Effect of environmental conditions”. *Building and Environment*, 2002, 37, pp. 101-108.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, LOPEZ-MORO, Francisco Javier, VICENTE-TAVERA, Santiago, RIVES, Vicente.

- “Monitoring of origin and evolution of building stones through their major components”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2005, 17, pp. 440-446.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, VICENTE-TAVERA, Santiago, RIVES, Vicente. “Statistical design applied to hydric property behaviour for monitoring granite consolidation and/or water-repellent treatments”. *Materiales de Construcción*, 2006, 56/281, pp. 17-28.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, SUPIT, Jenny Fransien Doortje, PRIETO, Olga, RIVES, Vicente. “Change in microporosity of granitic building stones upon consolidation treatments”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19, pp. 437-440.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta, VICENTE-TAVERA, Santiago, CASADO-MARÍN, Soledad, MARTÍN-GONZÁLEZ, Sara. “Multivariate analyses of soluble salts responsible for pathologies in granites of the Roman Aqueduct of Segovia, Spain”, *International Journal of Conservation Science*, 2017, 8/1, pp. 59-66.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta, VICENTE-PALACIOS, Victor, VICENTE-TAVERA, Santiago. “Canonical Biplot as a tool to detect microclimates in the inner and outer parts of El Salvador Church in Seville, Spain”, *Measurement*, 2019, 136, pp. 745-760.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta, VICENTE-PALACIOS, Victor, VICENTE-TAVERA, Santiago. “Evaluation of effectiveness of silicoorganic treatments using hydric properties”. *Archaeological and Anthropology Science*, 2020, 12/4, 86.
- IÑIGO, Adolfo Carlos, GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta, VICENTE-PALACIOS, Victor, VICENTE-TAVERA, Santiago. “Measuring the effectiveness and durability of silicified sandstones and conglomerates subject to silico-organic treatments and/or freezing/thawing processes”. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54/6, pp. 2697-2705.
- MOLINA, Eloy, GARCIA-TALEGON, Jacinta, HERRERO-FERNANDEZ, Hernando, IÑIGO, Adolfo Carlos. “Changes of porosity due to weathering in quartzites and slates of a raña profile (Montes de Toledo, Central Spain)”, *Estudios Geológicos-Madrid*, 2013, 69/ 2, pp. 179-191.
- TRUJILLANO, Raquel, GARCIA-TALEGON, Jacinta, IÑIGO, Adolfo Carlos, VICENTE, María Angeles, RIVES, Vicente, MOLINA, Eloy. “Removal of salts from granite by sepiolite”. *Applied Clay Science*, 1995, 9, pp. 459-463.
- VICENTE, María Angeles, VICENTE-TAVERA, Santiago. “Clay poultices in salt extraction from ornamental stones: A statistical approach”. *Clays and clay Minerals*, 2001, 49/3, pp. 227-235.