



Estudio estratigráfico de costras y depósitos en templos del casco histórico de Sevilla

Rocío Ortiz Calderón, Pilar Ortiz Calderón, María Sol Abad Ros, José María Martín Ramírez, Dpto. de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, U. Pablo Olavide de Sevilla; Auxiliadora Gómez Morón, Área de Intervención y Análisis, IAPH; María Auxiliadora Vázquez González, Dpto. de Cristalografía y Mineralogía, U. de Sevilla

Resumen

En este trabajo se presenta el estudio estratigráfico por microscopía electrónica con sonda de energías dispersivas (SEM-EDX) de costras y depósitos superficiales formados en las fachadas de veinticinco templos, del siglo XIII al XIX, del centro histórico y del barrio de Triana en Sevilla.

Entre los indicadores de alteración de las fachadas de estos templos se han detectado depósitos superficiales y costras negras sobre la piedra, mortero y ladrillo, que están formados principalmente por yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Los estudios de azufre por microscopía electrónica (SEM-EDX) se han realizado a lo largo de una línea perpendicular a la superficie. Este análisis combinado con la descripción por microscopio óptico permite calificar las alteraciones superficiales en cuatro grupos: a) costras compuestas por azufre y calcio, las más abundantes; b) muestras con superposición de capas de alteración y reposición; c) costras de origen orgánico (biocostras), que en su composición no contienen azufre; y d) depósitos superficiales en los que no se ha generado ningún tipo de reacción química y están formados fundamentalmente por polvo, terrígenos y otras partículas atmosféricas.

Como consecuencia de este estudio, se puede afirmar que las portadas de las iglesias analizadas están sufriendo un deterioro acelerado por la acción de las emisiones generadas por el tráfico rodado. En los centros históricos es, por tanto, aconsejable la realización de estudios y modelos microclimáticos, para establecer perímetros de vulnerabilidad, discriminar factores de riesgo y definir medidas de prevención del estado de conservación de la fábrica exterior del patrimonio arquitectónico.

Palabras clave

Biodegradación / Centros históricos / Contaminación / Costras / Depósitos / Deterioro / Fachadas / Iglesias / Materiales de construcción / Sevilla (Ciudad) / Tráfico urbano

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Este trabajo se ha llevado a cabo en veinticinco iglesias de la ciudad de Sevilla, veintitrés de ellas ubicadas en el casco histórico y dos en el barrio de Triana. Estas iglesias, cuya construcción data entre los siglos XIII y XIX, están situadas en calles con frecuencias de tráfico muy diferentes. La tabla de la página 60 recoge también el número de fachadas estudiadas en cada templo y su localización.

El diagnóstico de los indicadores de alteración de las fachadas estudiadas se ha realizado mediante la inspección visual, siguiendo la normativa NORMAL 1/88 (1990) y el glosario ICOMOS-ISCS (2008), a los que se han añadido pequeñas variaciones de acuerdo con Ordaz y Eibert (1988), Martín (1990) y Fitzner et ál. (1992).

El estudio de los productos de neoformación se ha realizado a partir de las muestras tomadas en costras y depósitos, teniendo en cuenta las recomendaciones de la comisión técnica CNR-ICR NORMAL 3/80 (1990).

Para la investigación de las características mineralógico-petrográficas de los materiales de construcción y los productos de alteración se han empleado un microscopio óptico Kyowa acoplado a una cámara digital, un difractor de rayos X Bruker (modelo D8 Advance), de anticátodo de Cu, dotado con rendija automática y un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM- 6460 LV con analizador de energías dispersivas de rayos X, modelo INCA X-sight de Oxford.

Con las muestras estudiadas por difracción de rayos X se han preparado pastillas para el análisis químico de elementos mayoritarios y minoritarios, que se ha llevado a cabo en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X marca Panalytical (modelo AXIOS) de tubo de Rh con sistema robotizado para el cambio de muestras.

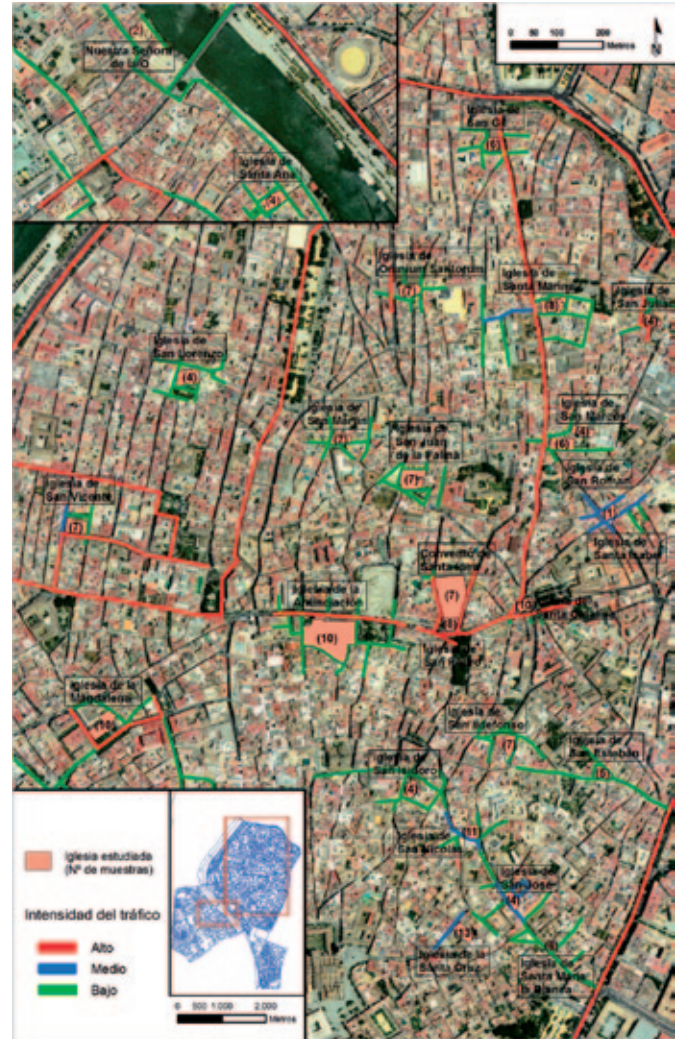
La descripción microtextural y el análisis puntual de las estratigrafías se realizó perpendicular a la superficie de alteración en muestras embebidas en una resina en frío de metacrilato de metilo.

El mapa superior recoge la ubicación de los templos, la intensidad del tráfico en las calles de su entorno y el número de muestras tomadas en cada templo para la realización de este análisis.

RESULTADOS

Materiales de construcción

La descripción petrográfica por microscopía óptica permite clasificar las muestras de materiales pétreos de las fachadas estudiadas en cuatro grandes grupos: mármoles, calizas micríticas y esparíticas, calcarenitas y areniscas calcáreas. Los morteros estudiados están constituidos por aglomerante de cal y áridos

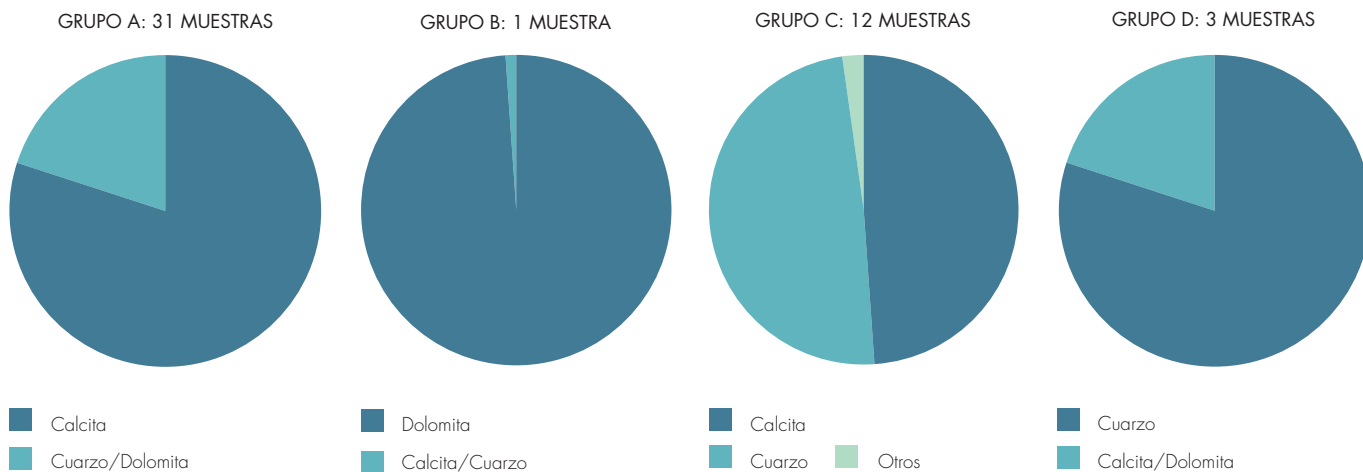


Muestras tomadas en cada templo del estudio e intensidad del tráfico de las vías de circulación

de diferentes tamaños formados por granos de cuarzo y restos de rocas carbonatadas en su mayoría. La mayoría de las muestras pétreas puede proceder de canteras cercanas a Sevilla, como Morón, Estepa, Alcalá de Guadaíra, Carmona y El Puerto de Santa María, entre otras (COLAO et ál., 2010).

Los resultados del análisis por difracción de rayos X muestran un claro predominio de los carbonatos sobre el resto de los componentes minerales en los materiales estudiados, presentándose estos carbonatos en forma de calcita, salvo en los mármoles de la iglesia de San Ildefonso, donde es más abundante la dolomita. El cuarzo también aparece en la mayor parte de las muestras analizadas y lo hace con porcentajes muy variables dependiendo de la naturaleza del material de construcción, salvo en las muestras de mármoles de la fachada de San Ildefonso, y las calizas y mármoles de Santa María la Blanca, en las que no se ha detectado cuarzo por difracción de rayos X. Los feldespatos aparecen en forma de trazas en una de cada tres muestras estudiadas.

Los materiales de construcción utilizados en estas fachadas se pueden clasificar en cuatro grupos de acuerdo a la proporción calcita-dolomita-cuarzo obtenida por difracción de rayos-X.



Clasificación de los materiales de construcción según la proporción de calcita-dolomita-cuarzo



Depósitos en la imposta de la iglesia de Santa Catalina



Restos de depósitos y costras en la imposta de la fachada de San Marcos



Incrustaciones en las jambas estriadas del arco ojival de la portada de la iglesia de Santa Ana
Fotos: P. Ortiz, M. S. Abad



Depósito y costras negras en arquivolta, jamba e imposta de la portada principal de Omnium Sanctorum

- Un primer grupo (A) caracterizado por materiales con predominio de calcita, cuyo contenido es superior al 40%P/P. Son los materiales más abundantes en el análisis realizado, correspondiendo aproximadamente a dos tercios de las muestras estudiadas.
- En el grupo B predomina la dolomita y está sólo representado por la muestra de mármol de la iglesia de San Ildefonso.

- Las materiales del grupo C, correspondiente a un cuarto de las muestras analizadas, presentan proporciones similares de calcita y cuarzo.
- Finalmente, en el grupo D están los materiales con cuarzo como componente mayoritario.

Indicadores de alteración

Durante la fase de diagnóstico in situ, se han identificado veinticinco tipos de indicadores de alteración, cuya frecuencia depende de la textura y ubicación de los materiales de construcción en las fachadas de los templos sevillanos, de acuerdo a los estudios de Ortiz el ál. (2008). Las patologías más frecuentes en las fachadas de las iglesias estudiadas son:

- a) Las incrustaciones y/o reposiciones incompatibles con los materiales originales
- b) Los depósitos superficiales de color grisáceo o negro.

Ambos indicadores de alteración tienen una frecuencia de aparición muy alta, presentándose en un porcentaje del 75% y 78% de las fachadas, respectivamente.

Las reposiciones que con el paso de los años están en mal estado son causadas por reparaciones, no siempre acertadas, que se han sucedido desde el primer tercio del siglo XX. Mientras que los depósitos son de origen antrópico y terrígeno, debidos a la contaminación en la ciudad y a las partículas atmosféricas procedentes del suelo.

- c) Las pérdidas de material y la erosión aparecen en torno del 50% de las portadas de piedra de los templos estudiados, si bien su extensión varía mucho de unos monumentos a otros.

- d) El último factor de alteración en frecuencia son las costras negras, que se detectan visualmente en el 37% de las fachadas estudiadas. Estas costras negras implican una reacción química, cuyo mecanismo se produce por el ataque de los óxidos de azufre a la matriz carbonatada de las rocas, generando una capa de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) de espesor variable, y que a veces puede llegar a desprenderse en zonas localizadas, encontrándose el sustrato interno altamente disgregado.

Influencia de la intensidad del tráfico rodado

El análisis de los diez indicadores de alteración más frecuente en función de la intensidad del tráfico rodado en el entorno de los templos se representa en el diagrama de frecuencias de la página siguiente, en el que se aprecia una relación directa entre la intensidad del tráfico y la alteración por costras negras y depósitos, especialmente marcada en el caso del proceso de yesificación.

Las costras negras se pueden observar a simple vista con más facilidad en las calles con alta densidad de tráfico rodado y donde la cercanía de la fachada al tráfico es alta. En las vías con alta densidad de vehículos motorizados aumenta la frecuencia de esta patología al 58% de los casos, mientras que en las portadas ubicadas en vías de medio y bajo tránsito de vehículos, la presencia de esta patología disminuye considerablemente a porcentajes del 30% y 18% respectivamente (ORTIZ et ál., 2008). La frecuencia



Costras negras en el basamento de la pilastra izquierda de la portada lateral de la iglesia de San José. Debajo, detalle del grado de disgregación y arenización de la roca. Fotos: P. Ortiz, M. S. Abad

de aparición de depósitos sigue también una relación directa con el tráfico rodado, si bien las diferencias entre los porcentajes de aparición no son tan marcadas.

Con el fin de evaluar las posibles fuentes de SO_2 en el proceso de formación de costras negras, se han analizados los datos de emisiones de este gas contaminante en tres estaciones de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía: Macarena y Torneo, zonas de alta intensidad de tráfico rodado, y centro, zona de baja intensidad de tráfico. Los valores medios de los datos mensuales de concentración de SO_2 en la atmósfera de las calles indicadas se recogen en la p.55, que pone de manifiesto que en

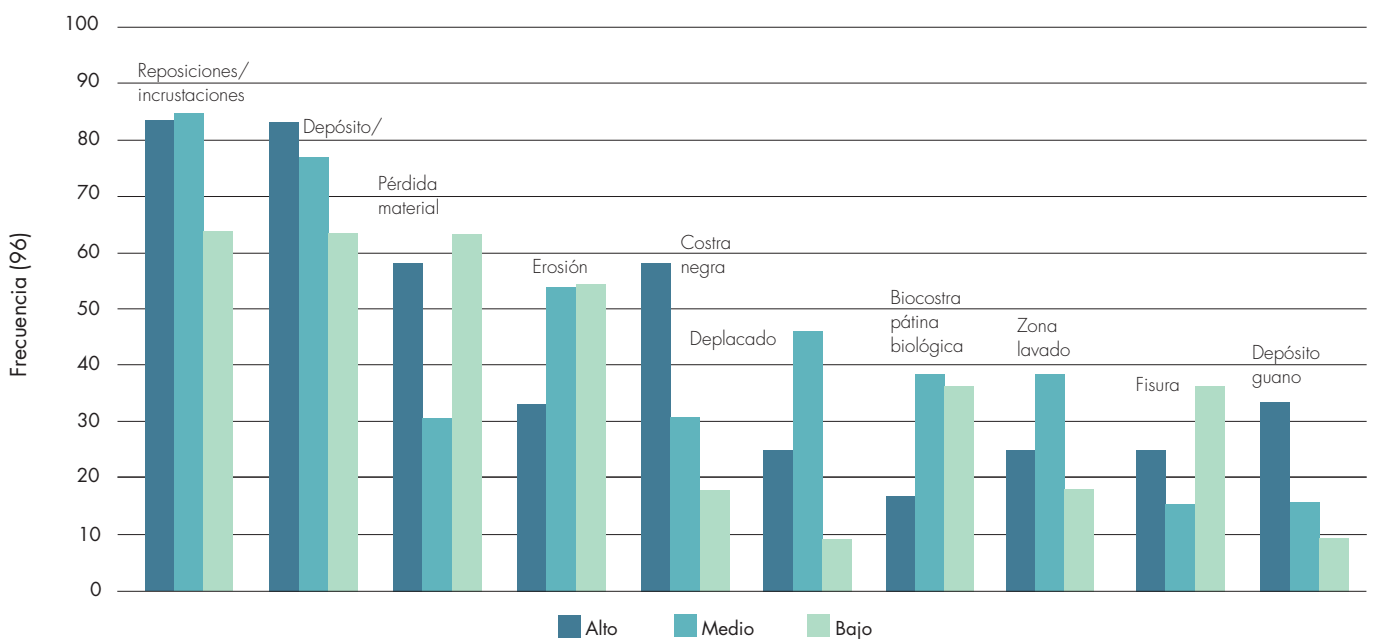
la ciudad de Sevilla, las estaciones de control atmosférico de Macarena y Torneo presentan una mayor concentración de óxidos de azufre en comparación con la estación de la zona centro. El bajo índice de actividades industriales en la ciudad de Sevilla y la variación del SO_2 en función del tráfico rodado hace pensar que la principal fuente de azufre en Sevilla proceda de la circulación de vehículos a motor, y que por tanto es la fuente de óxidos de azufre la principal causante de la formación de las costras negras.

De acuerdo a los datos de contaminación ambiental del centro histórico de Sevilla, la concentración de óxidos de azufre (SO_2) muestra una clara influencia del tráfico de vehículos rodados en el contenido de este contaminante, ya que las zonas con más tráfico tienen un mayor contenido en estos óxidos. Este trabajo revela además que este factor multiplica la aparición de costras negras en las fachadas con alta densidad de tráfico. Estudios similares de la influencia de los óxidos de azufre en los monumentos han sido analizados por Le-

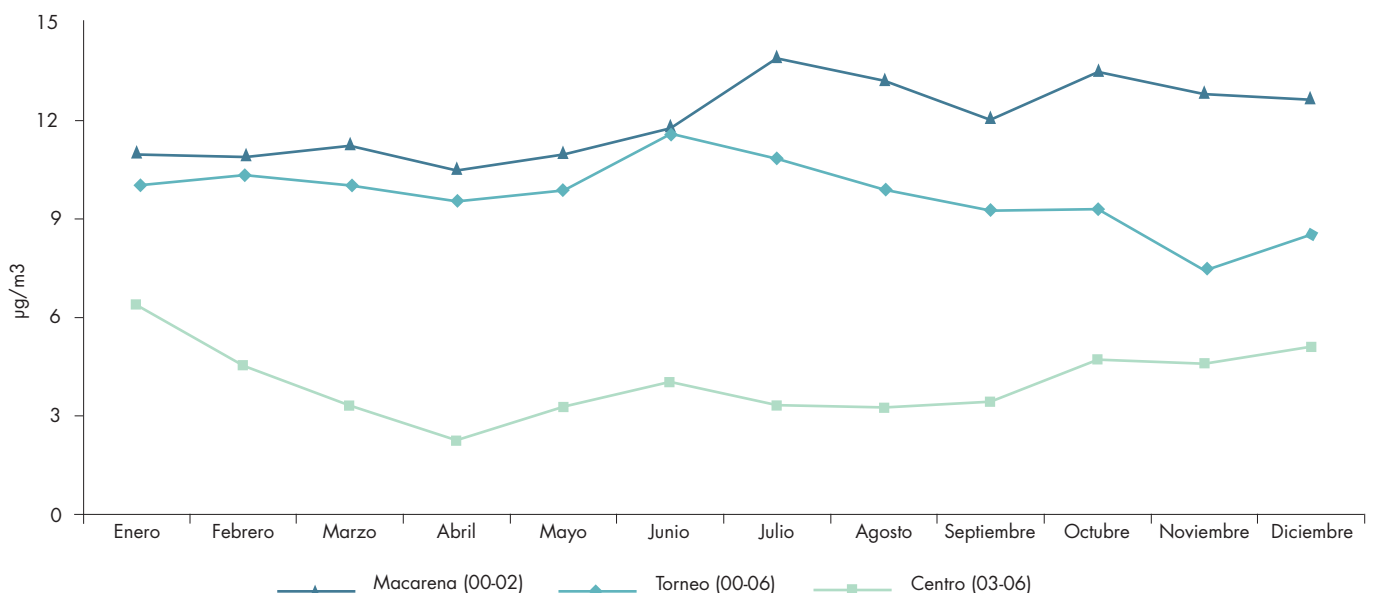
fevre et ál. (2005), Thi Ngoc Lan et ál. (2005), Camuffo et ál. (2006) y Grossi et ál. (2006) en diferentes ciudades.

Caracterización mineralógica y análisis químico de los indicadores superficiales de alteración

La caracterización mineralógica por difracción de rayos X de las fases minerales presentes en los depósitos y costras negras revela que en el 25% de las muestras estudiadas se ha detectado la presencia de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que constituye el principal producto de neoformación en estas patologías. La generación de este sulfato se corresponde con la presencia de costras negras en el diagnóstico, a excepción de algunas muestras de las fachadas de San Ildefonso, San Nicolás y San Martín, donde la procedencia del yeso ha sido atribuida a la disgregación de los morteros de las juntas; y en las muestras de la parte baja de las fachadas de Santa Ana, Santa Inés y Santa Marina, donde puede atribuirse a la ac-



Frecuencia de indicadores de alteración en función del tráfico rodado en los templos estudiados.



Evolución anual de las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) en las estaciones centro, Torneo y Macarena. Fuente: Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía

ción del agua por ascensión capilar, especialmente en la iglesia de Santa Marina, donde proliferan las eflorescencias. En las muestras de Santa Ana y Santa Inés, el yeso también se atribuye a capas internas de reposición.

Otro sulfato encontrado de forma esporádica por difracción de rayos X es la thenardita (Na_2SO_4), que se ha localizado en una de las muestras de eflorescencias procedentes de San Juan de la Palma y cuya aparición se ha asociado a problemas por ascensión capilar.

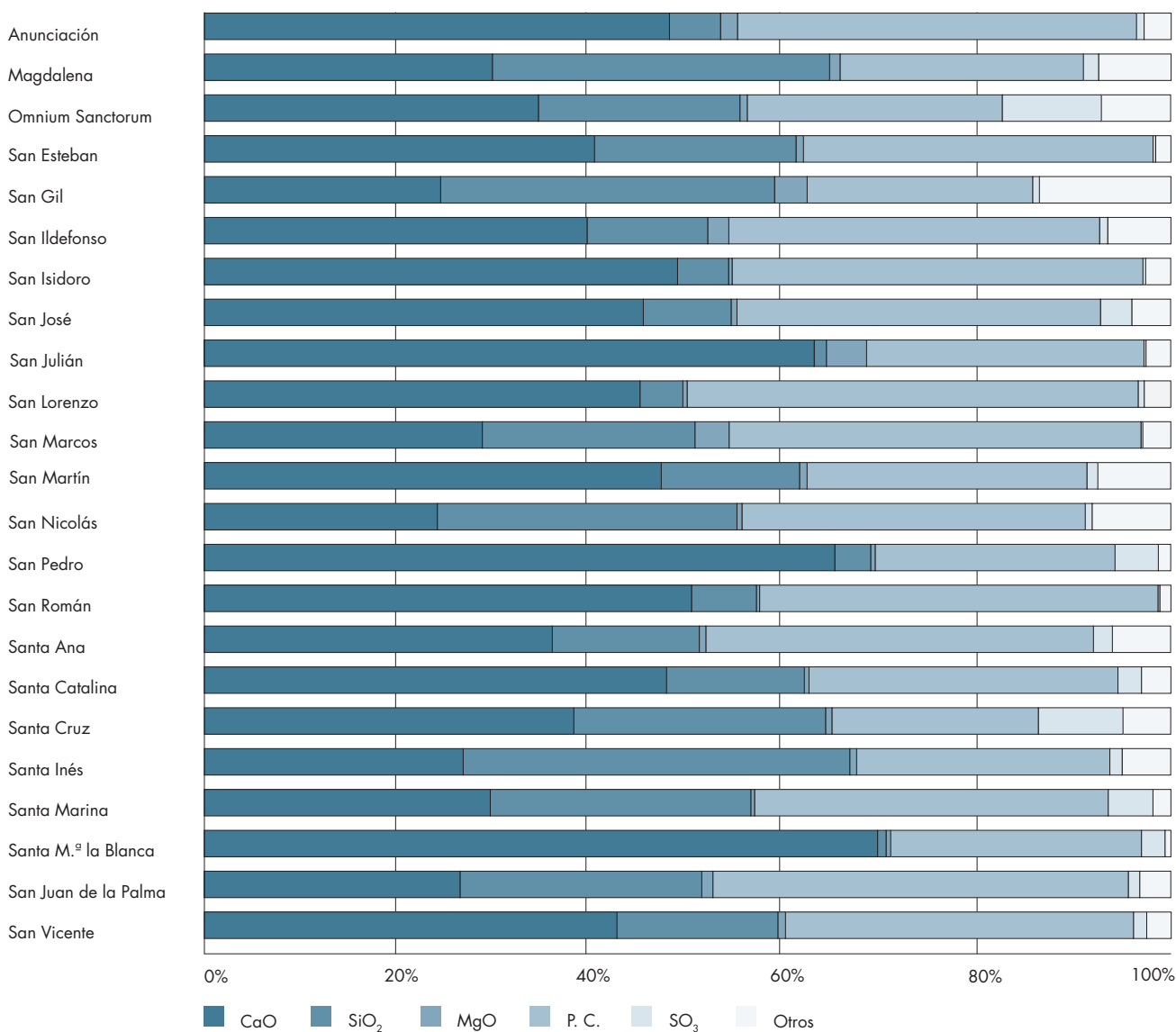
El análisis químico de elementos mayoritarios y minoritarios de las costras y depósitos realizado por fluorescencia de rayos X refleja una alta concentración de óxido de calcio, componente mayoritario en el 75% de las muestras, correspondiente a la calcita de las rocas y los morteros del sustrato. Este parámetro, asociado a los valores de pérdida por calcinación, implica que la mayoría de las muestras presentan un fuerte componente calcáreo de acuerdo con los resultados obtenidos por difracción de rayos-X de los materiales de construcción. Esta composición químico-mineralógica, predominante en los materiales del

patrimonio arquitectónico sevillano, acarrea un factor de alta vulnerabilidad frente a atmósferas contaminadas de óxidos de azufre en las condiciones meteorológicas de Sevilla (ORTIZ et ál., 2009). Ya que esta calcita tiende a reaccionar con cierta facilidad con los óxidos de azufre atmosférico para formar yeso en superficie y generar las costras negras.

El contenido en silicio varía de unas muestras a otras de acuerdo a la naturaleza del material de construcción y es de destacar la presencia de azufre en más de la mitad de las muestras, que está relacionado con las patología por yesificación.

Otros elementos analizados por fluorescencia de rayos-X han sido Al_2O_3 , F_2O_3 , MnO , Na_2O , K_2O , TiO_2 y P_2O_5 , que se encuentran en menor proporción.

La significativa presencia de óxidos de azufre, en porcentajes superiores al 1%P/P en más de la mitad de las muestras analizadas, está en consonancia con los resultados obtenidos por difracción de rayos X. Tan sólo las muestras de San Nicolás,



Composición química de las costras y depósitos analizados por fluorescencia de rayos-X. P.C. corresponde a pérdida por calcinación

Anunciación y San Ildefonso, con contenidos medios en yeso según los datos de difracción, presentan valores inferiores al 1%P/P, que pueden ser generados por el proceso de preparación de la muestra.

El origen de este azufre, de acuerdo con los análisis de visu de las patologías y el estudio mineralógico por difracción realizados, está asociado a la presencia de costras negras en las que se ha formado yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), consecuencia de la reacción de los carbonatos cálcicos de los materiales de las fachadas, con los gases contaminantes de azufre en la atmósfera. Esta alteración se asocia al 70% de las muestras con contenidos superiores al 1%P/P de óxidos de azufre, mientras que el resto se puede deber a alteraciones de juntas, morteros de reposición o fenómenos de ascensión capilar.

Descripción petrográfica y análisis por SEM-EDX de las costras negras y depósitos

Para profundizar en el proceso de formación de las costras y depósitos, es necesario conocer la microtextura de las costras (BROMBLET; VERGES-BELMIN, 1996); por este motivo se llevó a cabo un estudio petrográfico perpendicular a la superficie mediante láminas delgadas y un análisis por microscopía electrónica de barrido con sonda de energía dispersivas (SEM-EDX) de la preparación de estratigrafías de las costras y depósitos embutidos en metacrilato.

La descripción petrográfica de estas láminas perpendiculares a la superficie de alteración permite clasificar las muestras en dos grupos:

- Grupo A: Muestras de rocas calcáreas, que presentan yeso epigenético en la superficie externa; este sulfato cementa micropartículas de otras naturalezas, de posibles orígenes terrígeno o antropogénico.
- Grupo B: El segundo grupo está representado por muestras de San Pedro, Santa Cruz y San Nicolás en las que no se aprecia yeso en la superficie exterior, si bien se observan partículas depositadas y formaciones orgánicas. Estas muestras corresponden con biocostras y depósitos de acuerdo al diagnóstico inicial de visu.

El análisis estratigráfico de las secciones perpendiculares a la superficie por microscopía electrónica de barrido con sonda de energías dispersivas (SEM-EDX) permite subdividir estos dos grupos en cuatro categorías, atendiendo a las características microtexturales y la naturaleza de los agentes de alteración implicados en el proceso:

- A1: Costras compuestas por azufre y calcio. La mayoría de las muestras analizadas están en este grupo, lo que implica una relación directa con la presencia de contaminantes de azufre en la atmósfera del entorno del edificio. La porosidad y textura de estas muestras influye en la forma y extensión de este indicador de alteración, pudiendo diferenciar a su vez dos grupos A11 y A12, el primero formado por yeso de crecimiento epigenético que penetra por el entramado

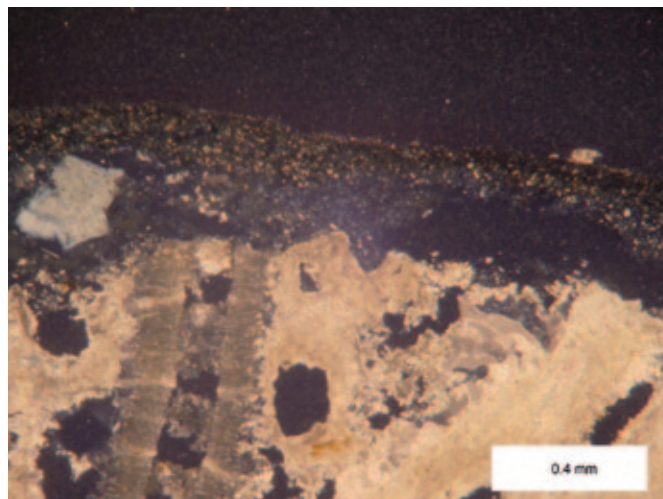


Lámina delgada perpendicular a la superficie correspondiente a costra tipo A. Imagen tomada por microscopio petrográfico con nicoles perpendiculares de una muestra de costra de la iglesia de San José

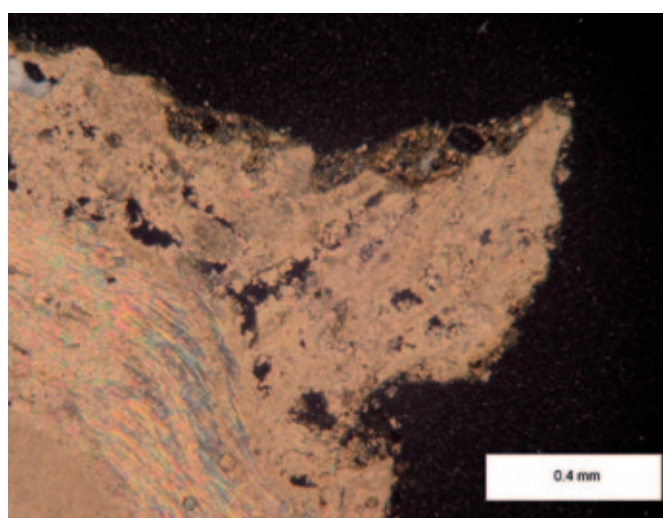


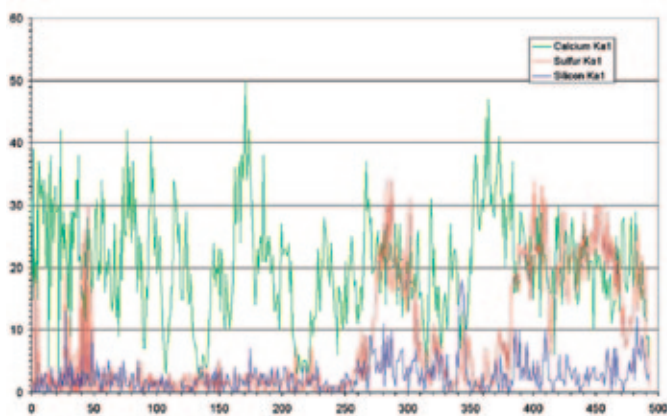
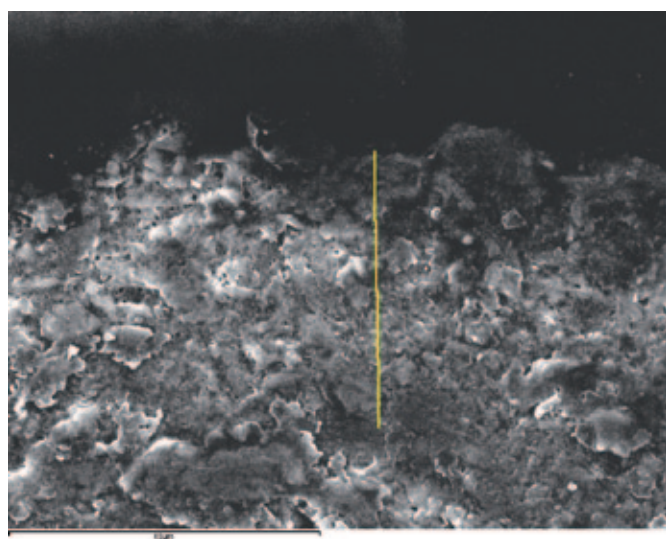
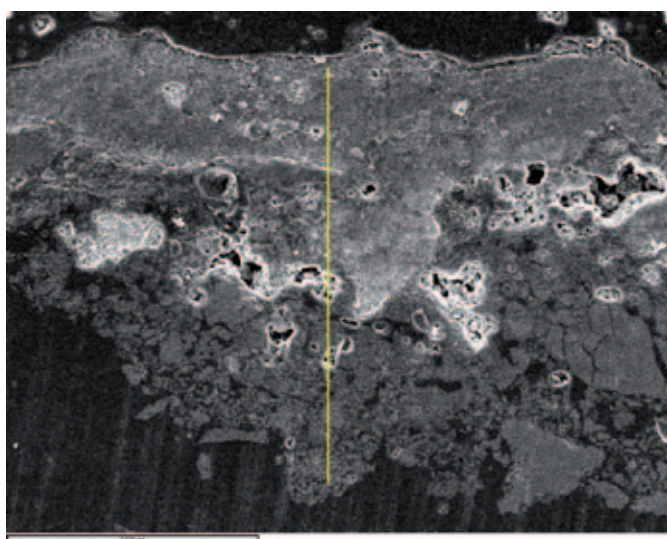
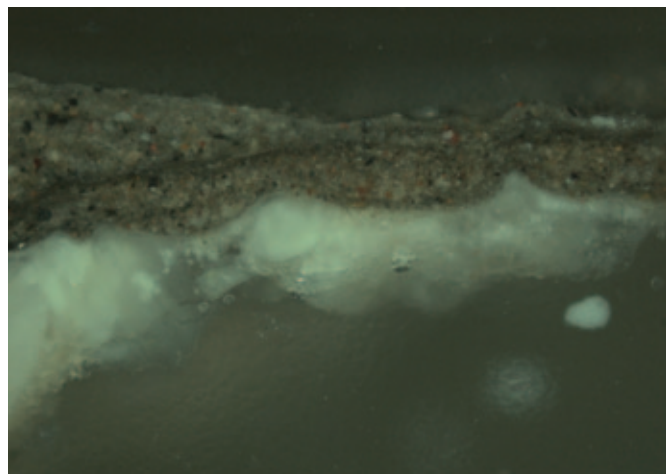
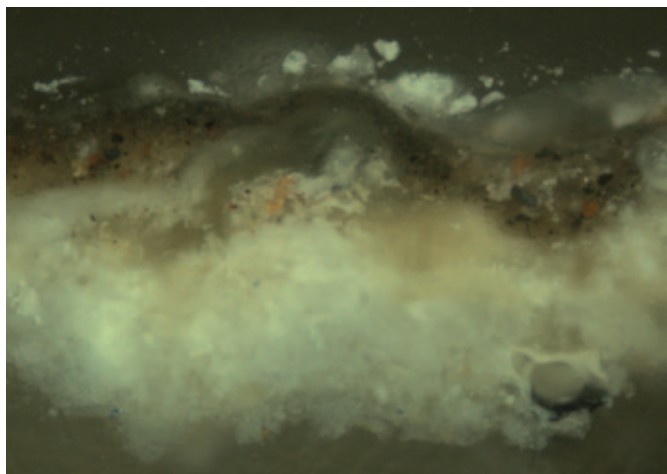
Lámina delgada perpendicular a la superficie correspondiente a depósito tipo B. Imagen tomada por microscopio petrográfico con nicoles perpendiculares de una muestra de depósito de la iglesia de San Pedro

de poros y el segundo por yeso de crecimiento superficial, que se forma en las muestras con menor porosidad abierta.

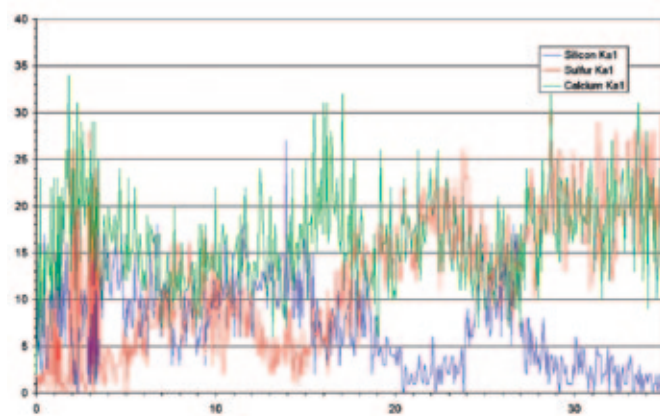
- A2: Muestras con superposición de capas de alteración y reposición. La estratigrafía de estas superficies es la consecuencia de sucesivas degradaciones de la piedra, por lo que se pueden apreciar zonas compuestas por azufre y calcio, intercaladas con capas de otros elementos, fundamentalmente calcio y silicio, consecuencia de sucesivas reposiciones sin la limpieza de la alteración subyacente.
- B1: Costras de origen biológico (biocostras), que en su composición no contienen azufre.
- B2: Depósitos superficiales en los que no se ha generado ningún tipo de reacción química y están formados fundamentalmente por polvo, terrígenos y otras partículas atmosféricas.

A1: Costras compuestas por azufre y calcio

La subclase A11 predominante en las muestras del grupo mayoritario A. Se caracterizan por que la reacción de yesificación se



Estratigrafía de muestra tipo A11 de la iglesia de San Lorenzo estudiada por microscopía óptica y electrónica. a) MO; b) SEM-EDX; c) Línea de barrido de silicio, azufre y calcio



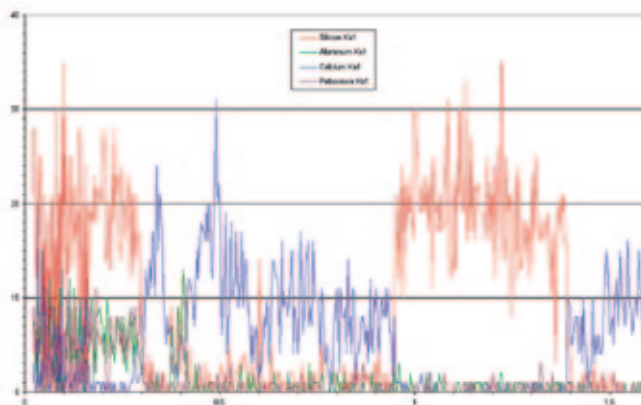
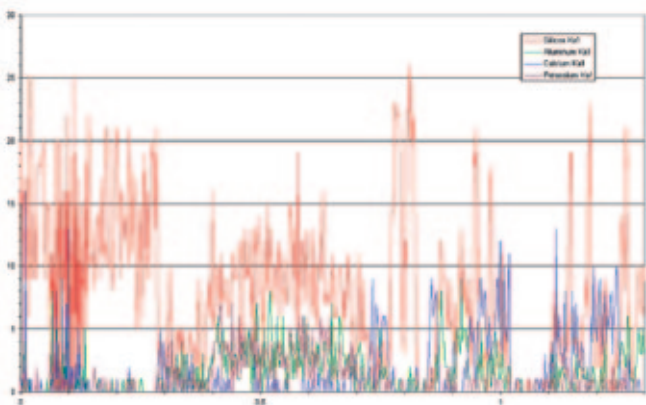
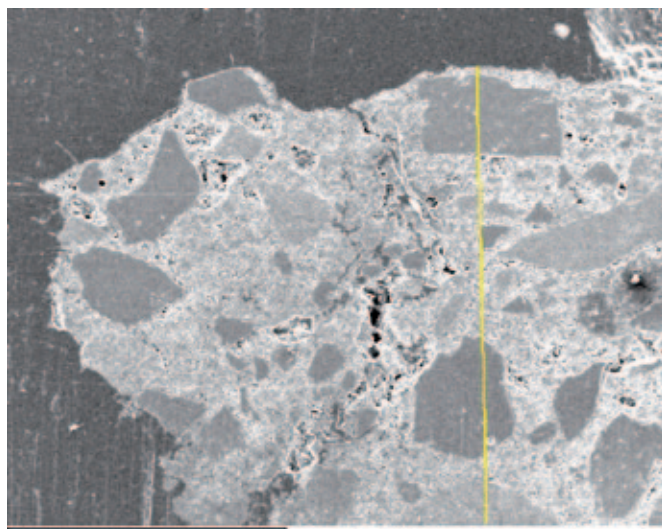
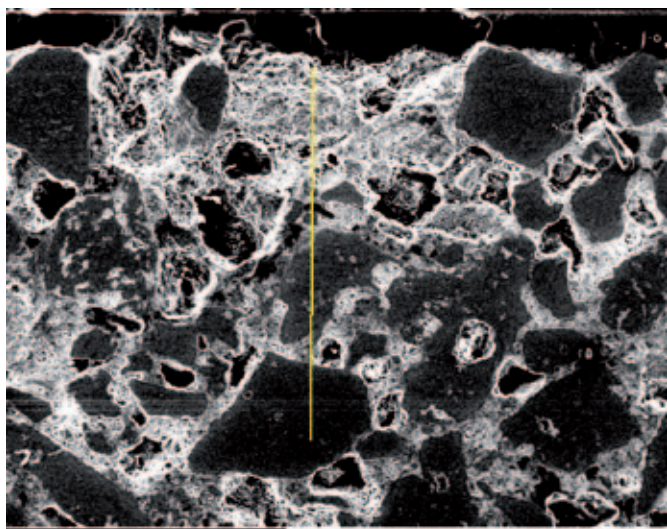
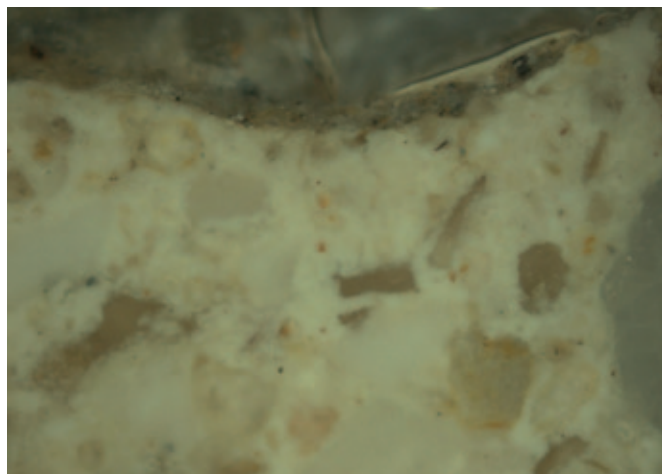
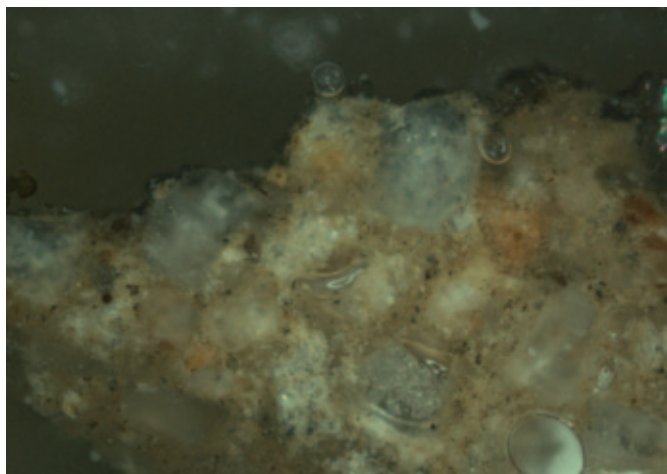
Estratigrafía de una muestra tipo A2 de la iglesia de San Vicente estudiada por microscopía óptica y electrónica. a) MO; b) SEM-EDX; c) Línea de barrido de silicio, azufre y calcio

inicia en la superficie e invade el interior de la muestra a través de las zonas más porosas y descohesionadas. De acuerdo con algunos autores (BROMBLET; VERGES-BELMIN, 1996), este proceso corresponde con un crecimiento epigenético por reacción del azufre atmosférico con la matriz de calcita.

En el segundo subgrupo (A12), se encuentran las muestras de las columnas de mármol de las fachadas principal y lateral de Santa

María la Blanca, cuya baja porosidad abierta y textura influye en el proceso de formación de la costra. El yeso en estos casos se presenta en una capa homogénea superficial de acuerdo al modelo estudiado para mármoles de Bromblet y Verges-Belmin (1996).

El espesor de las costras negras en el grupo A1, medido mediante microscopio óptico, tiene unos rangos de variación amplios, que nos permiten distinguir tres grupos:



Estratigrafía de una muestra tipo B1 de la iglesia de San Gil estudiada por microscopía óptica y electrónica. a) MO; b) SEM-EDX; c) Línea de barrido de aluminio, silicio, potasio y calcio

Estratigrafía de una muestra tipo B2 de la iglesia de San Marcos estudiada por microscopía óptica y electrónica. a) MO; b) SEM-EDX; c) Línea de barrido de silicio, aluminio, calcio y potasio

- Muestras de costras superficiales con espesores inferiores a 150 μm , que se han encontrado en las fachadas de San José, Santa Catalina, Santa Cruz, Santa Isabel y Santa Marina.
- Muestras de alteración en superficie con grosores medios que pueden llegar a alcanzar en torno a 300 μm en las estratigrafías de la Anunciación, San Lorenzo, San Pedro y Santa María la Blanca.
- Muestras con alteraciones superficiales con un espesor muy elevado que alcanza aproximadamente 2000 μm de profundidad,

encontrados en las fachas de Omnium Sanctorum, San Isidoro, Santa Cruz y Santa María la Blanca.

A2: Muestras con superposición de capas de alteración y reposición

En un segundo grupo (A2) encontramos muestras de las fachadas de Omnium Sanctorum, San Pedro y San Vicente, que presentan varias capas de alteración. Esta estratigrafía es la

Templo	Época de construcción	Fachadas Estudiadas	Código	Localización	Frecuencia tráfico
Anunciación	XVI	1	ANUN	C/ Laraña	Alto
Magdalena	XVII-XVIII	2	MAG1 MAG2	C/ San Pablo C/ Cristo del Calvario	Alto Alto
Ntra. Sra. de la O	XVII-XVIII	1	O	C/ Castilla	Alto
Omnium Sanctorum	XIII-XIV	2	OS1 OS2	C/ Feria C/ Peris Mencheta	Alto Bajo
San Esteban	XIV-XV	2	SES1/ SES2	C/ San Esteban C/ Medinaceli	Alto
San Gil	XIV	1	SGI	Plaza de San Gil	Bajo
San Ildefonso	XIX	1	SIL	Plaza de San Ildefonso	Medio
San Isidoro	XIV-XVI	2	SISI1/ SISI2	C/ San Isidoro C/ Luchana	Bajo Bajo
San José	XVII	1	SJO	Esquina C/ San José con C/ Levies	Medio
San Juan de la Palma	XV	1	SJP	C/ Feria	Medio
San Julián	XIV	1	SJU	C/ San Julián	Alto
San Lorenzo	XIV	2	SLO1 SLO2	Plaza de San Lorenzo C/ Hernán Cortés	Medio Medio
San Marcos	XIV	1	SMARC	Plaza de San Marcos	Medio
San Marín	XV	1	SMTIN	C/ Divina Enfermera	Bajo
San Nicolás	XVIII	2	SNI1 SNI2	C/ San José Plaza Ramón Ybarra Lloset	Medio Medio
San Pedro	XIV	1	SPE	C/ Imagen	Alto
San Román	XIV	1	SRO	Plaza de San Román	Medio
San Vicente	XIV	2	SVI1 SVI2	C/ Cardenal Cisneros C/ San Vicente	Alto/ Medio
Santa Ana	XIII-XIV	1	STA	C/ Vázquez de Leca	Bajo
Santa Catalina	XIV	1	STCA	Esquina C/ Alhóndiga con C/ Juan de Mesa	Alto
Santa Cruz	XVII-XVIII	1	STCR	C/ Mateos Gagos	Medio
Santa Inés	XIV	2	STIN1 STIN2	C/ Doña María Coronel Patio interior del Convento	Alto Bajo
Santa Isabel	XVII	1	STIS	Plaza de Santa Isabel	Bajo
Santa María la Blanca	XIII-XVII	2	STMB1 STMB2	C/ Santa María la Blanca C/ Archeros	Medio Bajo
Santa Marina	XIV	3	STMA1 STMA2 STMA3	C/ San Luis C/ Santa Marina C/ Manjón	Medio Bajo Bajo

Épocas de construcción de las iglesias estudiadas en el centro histórico de Sevilla y en el barrio de Triana, localización y frecuencia de tráfico

consecuencia de sucesivas degradaciones de la piedra, por lo que se pueden apreciar zonas compuestas por azufre y calcio, intercaladas con capas de otros elementos, fundamentalmente calcio y silicio, posible fruto de sucesivas intervenciones con morteros de cal.

La capa correspondiente al yeso suele presentar una mayor porosidad y deterioro en relación con las correspondientes capas que han sido superpuestas sobre dicho material.

Esta estratigrafía genera una alta debilidad superficial por lo que favorece fenómenos de descohesión, desplazado y pérdidas de mate-

riales que son abundantes en las tres iglesias: Omnium Sanctorum, San Pedro y San Vicente.

Dentro de este grupo, los espesores de las capas son muy variables en una misma muestra, extendiéndose los estratos más gruesos desde 1000 μm , mientras que las capas más finas no sobrepasan las 20 μm .

En ambos subgrupos (A1 y A2), las muestras con fases minerales silicatadas evidencian el hecho de que el ataque químico de los óxidos de azufre se reduce a los minerales carbonatados. Se observan granos de cuarzo, feldspatos y/o otros minerales inalterados y ais-

lados en mitad de las costras de yeso. Frantzikinaki et ál. (2005) y Bromblet y Verges Belmin (1996) han descrito capas de costras negras similares, debidas también a la formación epigenética de yeso.

B1: Costras de origen biológico

Las muestras del tercer grupo (B1), procedentes de la Anunciación, San Gil y Santa Cruz, presentan costras de origen orgánico (biocostras), que en su composición no contienen azufre.

La alta porosidad del sustrato en estas muestras favorece la penetración de los microorganismos a través de las zonas intergranulares. Estos depósitos biológicos alcanzan espesores entre 10-400 µm

B2: Depósitos superficiales

En el último grupo (B2), constituido por muestras de San Marcos y Santa Cruz, se aprecian capas de depósito superficiales en las que no se ha producido ningún tipo de reacción química.

Los depósitos generados están formados fundamentalmente por terrígenos u otras partículas atmosféricas. Estas capas de alteración alcanzan espesores de 20-50 µm y 0-80 µm, en las muestras San Marcos y Santa Cruz, respectivamente.

Esta clasificación obtenida mediante el estudio estratigráfico de las costras y depósitos en los templos del casco histórico de Sevilla por combinación de microscopía óptica y electrónica ha resultado una metodología muy útil para profundizar en el mecanismo de alteración superficial y su relación con la contaminación atmosférica.

CONCLUSIONES

Este trabajo pone de manifiesto la necesidad de realizar estudios estratigráficos de los indicadores de alteración perpendiculares a la superficie mediante microscopía óptica y electrónica, junto al análisis de los indicadores de alteración para establecer la acción de la contaminación atmosférica como principal agente de alteración en las zonas urbanas.

El deterioro que las fachadas de los templos analizados han sufrido a lo largo del tiempo se ha acelerado por las emisiones generadas por el tráfico rodado, lo que supone en los centros históricos una clara proliferación de depósitos y costras negras. La diferencia de ubicación de estas fachadas en calles con mayor o menor número de tráfico rodado y la cercanía del paso de los coches a sus paramentos es una de las causas diferenciales de su degradación.

Para la minimización del proceso, es esencial estudiar la distribución de las emisiones en el perímetro que rodea los edificios históricos, definiendo su vulnerabilidad. En este sentido, se hace necesario la revisión de los niveles límites de emisión en sitios históricos y modificar los planes urbanísticos, en los que se deberían de tomar medidas tales como el control de tráfico mediante limi-

tación en el número de vehículos y áreas de restricción, teniendo en cuenta parámetros e indicadores propios y definidos para la prevención del estado de conservación de la fábrica exterior del patrimonio arquitectónico.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al Proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía RIVUPH (HUM-6775).

Bibliografía

- BROMBLET, P.; VERGES-BELMIN, V.** (1996) L'élimination des sulfates sur la statuaire calcaire de plein air: une habitude discutable. En *Le DESALEMENT des matériaux poreux: 7èmes journées d'études de la SFIC, Poitiers, 9-10 mai 1996*. Champs-sur-Marne: SFIC, 1996, pp. 55-64
- CAMUFFO, D.; PAGAN, E.; MONTE, M. DEL et ál.** (2006) Modeling the penetration of SO₂ within the pores of calcareous stones and the concentration of gypsum in the near surface layer. En FORT, R.; ÁLVAREZ DE BUERGO, M. GÓMEZ-HERAS, M. et ál. (ed.) *Heritage, weathering and conservation (Madrid, 21 al 24 June 2006)*. Londres: Taylor & Francis, 2006, pp. 435-440
- COLAO, F.; FANTONI, R.; ORTIZ, P. et ál.** (2010) Quarry Identification of Historical Building Materials by Means of Laser Induced Breakdown Spectroscopy, X-Ray Fluorescence And Chemometric Analysis. *Spectrochimica part B: atomic spectroscopy*, vol. 65, Issue 8, 2010, pp. 688-694
- FITZNER, B.; HEINRICHS, K.; KOWNATZKI, R.** (1992) Classification and mapping of weathering forms. En DELGADO-RODRIGUES, J.; HENRIQUES, F.; TELMO JEREMIAS, F. (ed.) *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. Lisboa: Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, 1992, pp. 957-968
- FRANTZIKINAKI, K.; MARAKIS, G.; PANOU, A. et ál.** (2005) The cleaning of the Parthenon West Frieze by Means of combined IR- and UV- Radiation. En NIMMRICHTER, J.; KAUTEK, W.; SCHREINER, M. (ed.) *Lasers in the Conservation of Artworks LACONA VI Proceedings*. Viena: Springer, 2005
- GROSSI, C. M.; BRIMBLECOMBE, P.** (2006) Sulfate and carbon compounds in black crusts from the Cathedral of Milan and Tower of London. En FORT, R.; ÁLVAREZ DE BUERGO, M. GÓMEZ-HERAS, M. et ál. (ed.) *Heritage, weathering and conservation (Madrid, 21 al 24 June 2006)*. Londres: Taylor & Francis, 2006, pp. 441-446
- ILLUSTRATED glossary on stone deterioration patterns** (2008) ICOMOS-ISCS, 2008, 78 pp.
- LEFEVRE, R. A.; JONESCU, A.; AUSSET, P. et ál.** (2005) Modeling the calcareous stone sulphation in polluted atmosphere after exposure in the field. En PRIKLYL, R.; SMITH, B. (ed.) *Natural Stone Decay*. London: Geological Society, 2005
- MARTÍN, A.** (1990) *Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés Histórico-Artístico*. Madrid: Fundación Ramón Areces, 1990
- NORMAL 1/88** (1990) *Alterazione macroscopiche dei materiali lapidei: Lessico*. Roma: CNR-ICR, Comas Grafia, 1990, pp.1-36
- NORMAL 3/80** (1990) *Materiali lapidei: Campionamento*. Roma: CNR-ICR, Comas Grafia, 1990, pp.1-6
- ORDAZ, J.; ESBERT, R. M.** (1988). Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción. *Materiales de Construcción*, 1988, 38, 209, pp. 39-45
- ORTIZ, P.; ABAB, M. S.; GUERRERO, M. A. et ál.** (2008) Estudio de indicadores de alteración y perímetros de vulnerabilidad en la ciudad de Sevilla (España). En *ACTAS IX Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*. Sevilla: CICOP, 2008, pp. 117-122
- ORTIZ, P.; VÁZQUEZ, M. A.; MARTÍN, J. M. et ál.** (2009) Estado de Alteración de la Fachada Principal de La Iglesia de Santa Catalina (Sevilla). *Macla. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, vol. 11, 2009, pp. 139-140
- THI NGOC LAN, T.; THI PHUONG THOA, N.; NISHIMURAB, R. et ál.** (2005) New model for the sulphation of marble by dry deposition Sheltered marble-the indicator of air pollution by sulphur dioxide. *Atmospheric Environment*, vol. 39, 2005, pp. 913-920