

Fenómenos biogeoquímicos de las rocas monumentales.

Biblioteca Nacional y Museo Arqueológico Nacional en Madrid

JOSÉ MARÍA MUÑOZ CEBRIÁN (*)

RESUMEN La Biblioteca Nacional y Museo Arqueológico Nacional en Madrid sufren desde hace años un proceso de deterioro generalizado de la cerca perimetral del granito que soporta la verja, que le da un aspecto estético lamentable a unos de los monumentos más representativos del siglo XIX. La causa que se ha podido demostrar en esta investigación confirma un origen biológico del problema y ha demostrado también que los intentos de restaurar los desperfectos producidos, no solo no han sido eficaces sino que pueden haber sido contraproducentes.

BIOGEOCHEMISTRY PHENOMENONS OF THE MONUMENTAL ROCKS. *Biblioteca Nacional y Museo Arqueológico Nacional in Madrid*

ABSTRACT For many years now the granite structure supporting the railing that surround these monuments has been steadily deteriorated. The decay is regrettable from an esthetic view point of these most representative nineteenth century buildings. This research confirms the biological origin of the problem and also that every attempt to restore the damage has but been not only inefficient that probably counterproductive.

Palabras clave: Biodeterioración; Contaminación atmosférica; Rocas ornamentales.

1. INTRODUCCIÓN

La deterioración estructural, funcional y estética de los edificios y monumentos constituye un problema que tiene una amplia repercusión social, cultural y política, hasta el punto que los gobiernos de las naciones han tomado conciencia de ello, dictando normas y disposiciones al respecto y los centros de investigación cualificados han trazado, a su vez, programas para el diagnóstico, estudio y posibles soluciones de los problemas presentados.

En este trabajo se estudian los efectos de la biodeterioración sobre materiales pétreos, concretamente el granito, formando parte de la estructura que constituye el muro exterior que soporta la verja de hierro que rodea el museo Arqueológico Nacional y Biblioteca Nacional en Madrid y que presenta un grave deterioro en zonas muy concretas de su perímetro. El proyecto del edificio, al que se denominó Palacio de Bibliotecas y Museos, se debe a Francisco Jarreño que empezó a construirlo en 1866 y no se acabó hasta 1892 y constituye el depósito bibliográfico y arqueológico más importante del estado.

2. CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA ESTUDIADA

El muro exterior, única parte del monumento al que se va a referir este trabajo, está formado con bloques de granito de

1.90 m de largo 0.50 de fondo y 1.25 m de alto a nivel de la calle, desarrollándose por todo el perímetro que rodea los edificios, salvo en las puertas de acceso al Museo y Biblioteca. Una verja de hierro de gran belleza y dimensiones se asienta anclada en los bloques a intervalos regulares y que en ningún caso coinciden con la junta de unión entre bloques. Es precisamente en esta junta donde se ha producido el deterioro afectando a los bloques de granito y es el objeto de esta investigación.

En Madrid, aparte de otras localizaciones, es en el mismo eje Paseo del Prado, Recoletos, Paseo de la Castellana, hay otros monumentos que poseen estructuras semejantes en características, materiales y orientación a la que se está estudiando aquí.

Entre estas edificaciones, las más relevantes son:

- Ministerio de Agricultura.
- Jardín Botánico.
- Jardines del obelisco.
- Palacio de Linares.
- Palacio del Marques de Salamanca (Sobre caliza y granito).
- Ministerio de Defensa.
- Escuela de Estado Mayor del Ejército.
- Antigua Presidencia del Gobierno.
- Ministerio del Ejército.
- Banco de España.
- Museo Thyssen.

(*) Doctor en Ciencias Biológicas y Licenciado en Ciencias Químicas.

Después de un reconocimiento detallado de todos ellos, se ha podido confirmar que en ningún caso se dan los fenómenos de biodeterioración que se observan en la Biblioteca Nacional, lo cual hace suponer que debe haber algunos factores determinantes del fenómeno en este caso.

Puesto que el granito es de la misma procedencia, parece lógico que la causa esté en el mortero que une los bloques de granito y la naturaleza de la verja que, en un principio, no estaba pintada como actualmente, así como la exposición a la humedad capilar del basamento; la deterioración es algo mayor en los bloques que se apoyan directamente en el suelo que los que se apoyan en muros elevados construidos para nivelar el conjunto de la cerca.

3. PROBLEMAS DE CARÁCTER GENERAL

Entre los factores que contribuyen al problema de la biodeterioración de este tipo de estructuras, unos se refieren a los materiales en sí mismo y otros al medio ambiente que los rodea. En el primer caso, las características mineralógicas, textura, porosidad y capilaridad de los materiales, así como los morteros y argamasas que los une, colaboran en el tipo e intensidad del proceso de deterioración. En el segundo caso, por un lado, el ambiente natural: humedad capilar y relativa, lluvia, vientos, grado de insolación, temperatura, etc., y, por otro, los contaminantes de origen antrópico: humos, gases, etc., contribuyen entre todos a establecer unas condiciones idóneas para la colonización por seres vivos de edificios y monumentos; los agentes contaminantes atmosféricos que juegan un importante papel, tanto en la alteración fisicoquímica de los materiales, como en la biológica, tienen una

composición media aproximada de un 52% de CO₂, 18% de SO_x, 12% de hidrocarburos, 10% de sales, hollín y sedimentos, y la 6% de NO_x, para una zona urbana con una gran densidad de tráfico.

Desde el punto de vista biológico, la colaboración que los organismos vivos tienen en el problema de la deterioración de edificios y monumentos, va desde líquenes, algas, musgos y plantas superiores, hasta hongos y bacterias, estos últimos los responsables más directos del problema que se está estudiando aquí, como se pondrá de manifiesto a continuación.

Todos estos factores no actúan independientemente, sobre todo cuando la roca forma parte de construcciones, sino que están relacionados entre sí, dependiendo sus efectos principales del micro ambiente y de las situaciones particulares de cada caso.

4. ESTUDIO DE LOS MATERIALES AFECTADOS

4.1. ESTUDIO "IN SITU"

Como se viene indicando, el material que ha sufrido y sigue sufriendo el proceso de biodeterioración, es el granito que sustenta la verja que constituye el conjunto perimetral que delimita el edificio de la Biblioteca Nacional y Museo Arqueológico Nacional, con el Paseo de Recoletos y calles de Serrano, Villanueva y Jorge Juan.

A primera vista, el deterioro consiste en la disgregación y desaparición del material rocoso de la unión entre bloques, tanto en anchura como en profundidad variando entre 4, 10 y 25 cm según la junta observada, como puede apreciarse en las fotografías 1 a 4. Las juntas afectadas constituyen prác-



FOTO 1. Biblioteca Nacional, restaurada y posteriormente deteriorada.



FOTO 2. Museo Arqueológico, restaurada y en vías de deterioración.



FOTO 3. Museo Arqueológico, restaurada.



FOTO 4. Biblioteca Nacional, restaurada y posteriormente deteriorada.

ticamente la totalidad de la construcción, lo que aparte de su alteración estructural, es de un efecto estético lamentable.

Con el fin de poder investigar el origen de estas alteraciones se hizo una selección representativa de las juntas más afectadas de manera que abarcase todo el perímetro de la construcción, orientaciones y situaciones particulares, y se llevó a cabo una valoración visual de la misma con medidas del pH "in situ" y toma de muestras del granito para su posterior análisis en laboratorio, conservándolas en frigorífico hasta su posterior ensayo.

Las características de las muestras tomadas son las siguientes, anotando su situación, orientación, grado de deterioración aspecto superficial y pH:

- Muestra 1. c/ Jorge Juan; Norte; Muy deteriorado; Caolinización de los feldespatos dando materiales sueltos; coloración pardo amarillenta; pH 2,5.
- Muestra 2. c/ Jorge Juan; Norte; Junta restaurada hace años pero prácticamente despegada; el mismo fenómeno de caolinización; coloraciones ocre y amarillo de azufre elemental y manchas negruzcas de SFe; pH3.
- Muestra 3. c/ Serrano; Saliente; Junta restaurada en 2001 y en buen estado; No se mide pH ni se toma muestra.
- Muestra 4. c/ Serrano; Saliente; muy deteriorada; Manchas de herrumbre procedente de la verja; Manchas pardo amarillentas de óxido e hidróxido de hierro; Azufre elemental; pH 2,5; Había sido restaurada en 2001.
- Muestra 5. c/ Villanueva; Sur; Muy deteriorada; Caolinización; Coloraciones pardo verdosas (oxidación de biotita a fluorita?); pH2.

- Muestra 6. c/ Villanueva; Sur; Semejante a la anterior.
- Muestra 7. Paseo de Recoletos; poniente; Muy deteriorada, materiales sueltos; coloraciones amarillentas de óxido e hidróxidos de hierro; Azufre elemental; pH 2,5.
- Muestra 8. Paseo de Recoletos; Poniente; Semejante a la anterior.

En principio, no parece que la orientación haya influido de forma significativa en el grado de alteración, aunque en N y S parece mayor la deterioración.

No se sabe cuando empezaron estos problemas, aunque en el año 1986 ya se habían reparado algunas juntas pertenecientes a la Biblioteca Nacional no dando el resultado deseado ya que no se había atacado el origen del problema; en la actualidad casi todas las restauradas están en la misma situación inicial. Únicamente se conservan bien actualmente algunas de las pertenecientes a la zona del Museo Arqueológico restauradas en 2001, pero con tendencia a deteriorarse en corto plazo.

Por otra parte, parece que el responsable directo para que se hayan iniciado estos fenómenos, junto con la naturaleza de la verja, sea el mortero de unión entre bloques, algún tipo de cal o yeso, ya que en todas las demás construcciones semejantes a esta y que se ha comentado anteriormente, no se ha producido el deterioro generalizado que se da en esta estructura.

4.2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS PREVIAS

Lo que sí está suficientemente claro, a la vista de la descripción de los diferentes aspectos observados en las muestras, es el origen biológico del problema, responsable de unos proce-

Los bioquímicos de oxidación-reducción en los que intervienen bacterias de los ciclos del azufre y del hierro, con la colaboración de los productos procedentes de la contaminación atmosférica.

El hierro es un elemento muy reactivo pudiendo existir en varios estados de oxidación dependiendo del pH y, debido a las reacciones de oxidación-reducción por los microorganismos, este elemento juega un papel importante en su ciclo en la naturaleza y por tanto en los problemas de deterioración de materiales, siendo uno de los procesos biogeoquímicos mejor estudiados al tener la evidencia de la participación en estos fenómenos del *Thiobacillus ferrooxidans*, junto con algunas otras bacterias.

El Azufre, también puede existir en diferentes estados de oxidación, -2, 0, +2, +4, +6, pudiendo servir como fuente de energía por lo que el azufre tiene gran importancia en las reacciones bioquímicas y como consecuencia en muchos problemas de alteración y deterioración de materiales por bacterias quimiolitotrofas en procesos cíclicos de oxidación-reducción.

Los microorganismos que se han identificado con más frecuencia, son, entre otros, *Thiobacillus thiooxidans*, capaces de oxidar tanto los sulfuros como el azufre elemental, cuando la humedad, temperatura y aireación se encuentran cerca de valores óptimos. En los suelos o ambientes que se vuelven deficientes en oxígeno el nivel de sulfuro aumenta, la concentración de sulfato ferroso y un aumento de bacterias que reducen el sulfato como son las del género *Desulfovibrio* que son anaerobias estrictas y producen H₂S a partir de sulfato, cerrando el ciclo natural.

4.3. ESTUDIO EN LABORATORIO

Para confirmar estos posibles mecanismos, se prepararon 7 matraces con medio de cultivo Starkey específico para el desarrollo de estos microorganismos, se esterilizaron y se inocularon con aproximadamente 5 gramos de las muestras tomadas, incubándolas en incubador orbital durante 18 días, midiéndose el pH a intervalos de 9 y 18 días y anotando los cambios producidos en el medio de cultivo.

TABLA 1.

Matraz	PH inicial	PH 9 días	PH 18 días	Observaciones
1	4,5	2,5	2,0	Turbidez gris, sedimento amarillo
2	4,5	3,5	3,5	Depósito verdoso, turbidez
3	4,5	2,5	2,5	sedimento gris, turbidez
4	4,5	2,0	2,5	Depósito marrón
5	4,5	2,5	2,5	Turbidez verdosa
6	4,5	3,0	3,0	Sedimento amarillento
7	4,5	2,5		Turbidez gris

Muestra	PH	Microorganismos
1	2,0	<i>Thiobacillus</i> , bacterias Gram
3	2,5	Bacterias filamentosas, Gram+, <i>Thiobacillus</i> Gram-
5	2,5	Estructuras gonoidales, Gram+, <i>Thiobacillus</i> Gram-
7	2,5	Bastones pequelos, <i>Thiobacillus</i> Gram-

TABLA 2.

Los resultados obtenidos fueron los que aparecen en la Tabla 1.

Tras detectar una bajada de pH generalizada y comprobar mediante una preparación vista al microscopio la presencia de thiobacilos, se inocularon con 1 ml de las muestras 1, 3, 5 y 7 cuatro placas Petri y se mantuvieron en estufa durante 7 días, preparándose tinciones Gram (Tabla 2).

Por dificultades técnicas no se investigó la presencia de bacterias reductoras de sulfatos, aunque el azufre elemental contenido en las muestras indican su presencia en el proceso de biodeterioración.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis realizados ponen de manifiesto la presencia de microorganismos que metabolizan compuestos de azufre y compuestos ferrosos. Algunos de los efectos causados por estos microorganismos, se han atribuido, por ser sensiblemente análogos y relacionados, a los producidos por las lluvias ácidas, aunque la actividad bacteriana es la que tiene un importante papel en la aceleración de las reacciones químicas producidas.

El fenómeno popularmente conocido como "corrosión de la piedra" o "mal de la piedra", es un proceso de deterioración irregular de su superficie, producido generalmente por la acción conjugada de bacterias del ciclo del azufre y nitrógeno, aprovechando la porosidad de la roca y su contenido de humedad, con producción de sulfato cálcico y nitrato cálcico.

Se producen alteraciones alveolares por una disgregación y posterior separación de la arena de la matriz de la piedra produciendo unos surcos que poco a poco van progresando en profundidad y extensión creando zonas pulverulentas que se van desprendiendo con el tiempo, dejando al descubierto la zona dura, expuesta a nuevos ataques.

Se ha considerado durante mucho tiempo que este fenómeno era debido al efecto, en las grandes ciudades, de productos de la contaminación atmosférica, con la formación de los ácidos correspondientes y la investigación se ha orientado también a un origen microbiano combinado, comprobando

la participación simultánea de bacterias del ciclo del azufre y bacterias del ciclo del nitrógeno.

A continuación se expone como ejemplo el mecanismo de la deterioración bacteriana de una piedra de matriz calcárea que se puede hacer extensivo para otras rocas (figura 1);

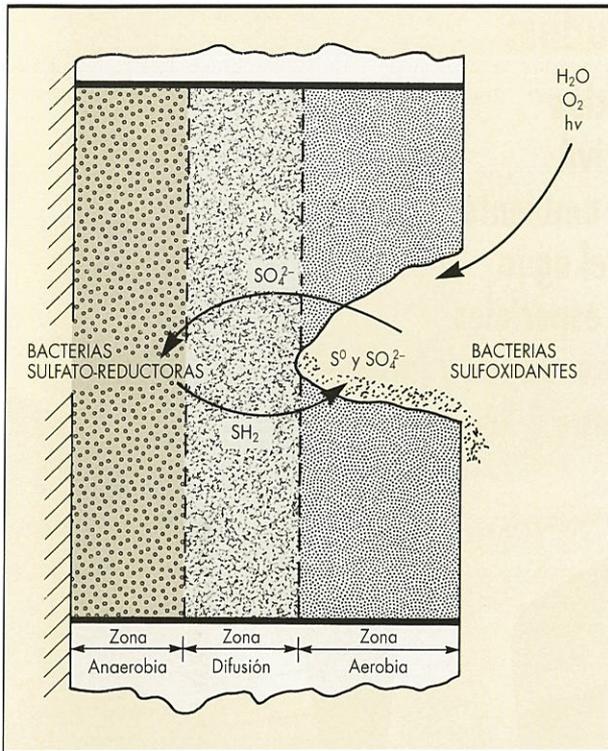


FIGURA 1.

1. La piedra debido a la porosidad, deja penetrar la humedad.
2. El agua filtrada contiene bacterias sulfato-reductoras presentes que penetran hasta la profundidad en la que encuentran condiciones anaerobias para su desarrollo.
3. En la superficie de la piedra otras bacterias sulfoxidantes comienzan a proliferar a partir de metabolizar compuestos de azufre reducido transformándolos en ácido sulfúrico.
4. Este ácido ataca a la roca con formación de sulfatos que se difunden al interior a través del agua hasta la zona donde permanecen las bacterias reductoras de sulfatos las cuales los reducen a sulfuros de hidrógeno.

5. El sulfuro de hidrógeno formado emigra hacia la superficie, donde las bacterias sulfoxidantes lo oxidan primero a azufre y luego a ácido sulfúrico, comenzando un nuevo ciclo.

Como resultado de este proceso se forman sales solubles que son lixiviadas de la roca, produciendo con el tiempo, descamaciones y arenización. Por otra parte, según el tipo de material afectado se forman sulfatos secundarios que con las presiones de cristalización ejercida por el aumento de volumen (entre 30% y 350%, según los casos), contribuyen de forma importante al deterioro de estos materiales, repitiéndose sucesivamente estos procesos cíclicos.

6. RECOMENDACIONES

A la vista de los resultados obtenidos y a la evidencia de la participación de bacterias del ciclo del azufre en el desarrollo de la deterioración que presentan las juntas entre bloques de granito, cabe hacer algunas consideraciones.

1. Posiblemente el mortero empleado originariamente para la unión entre bloques, y la naturaleza de la verja, hayan sido los causantes de que se iniciaran estos procesos
2. La solución adoptada hace años, con fines de embellecimiento, para restaurar la superficie de las juntas de la Biblioteca Nacional, aplicando un mortero en toda su profundidad, no sólo no ha dado el resultado perseguido si no que puede haber contribuido a crear un ambiente anaerobio en su interior con el siguiente proceso de reducción-oxidación, ya que prácticamente todas las juntas separadas se han vuelto a descubrir.
3. La solución llevada cabo en este mismo sentido en 2001 en la zona del Museo Arqueológico y que tampoco ha tenido en cuenta el problema original, es el motivo por el que se están volviendo a descubrir las juntas restauradas.
4. La solución consistiría en sanear previamente de una manera eficaz toda la superficie de la junta hasta su fondo, antes de aplicar cualquier tipo de tratamiento.
5. Entre los procedimientos que hoy en día sería posible aplicar cabe considerar los siguientes:
 - Agua a presión de 2-4 atmósferas, con un detergente.
 - Vapor de agua a presión a 150° C.
 - Chorro de arena o vidrio micronizado.
 - Tratamiento con ácidos clorhídrico o acético.
 - Ultrasonidos, láser.
 - Tratamiento final con biocidas.
 - Relleno de las juntas, una vez tratadas, con un material sintético tratando de conseguir un aspecto exterior compatible con el de los bloques, desde el punto de vista estético.