



Acta Universitaria

ISSN: 0188-6266

actauniversitaria@ugto.mx

Universidad de Guanajuato

México

Puy-Alquiza, María Jesús; Gómez Peralta, Marlene; Miranda-Avilés, Raúl; Reyes-Zamudio, Veridiana; Salazar-Hernández, Ma. del Carmen; Ordaz Zubia, Velia Yolanda
El rol de las comunidades de líquenes en el deterioro superficial de su substrato rocoso:
estudio de la interfase liquen-roca en dos monumentos históricos de la ciudad de

Guanajuato, México

Acta Universitaria, vol. 25, núm. 4, julio-agosto, 2015, pp. 35-47

Universidad de Guanajuato

Guanajuato, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41641384004>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

El rol de las comunidades de líquenes en el deterioro superficial de su substrato rocoso: estudio de la interfase liquen-roca en dos monumentos históricos de la ciudad de Guanajuato, México

The role of lichen communities in superficial deterioration of their rock substrates: studies of the lichen-rock interface of two historical buildings in the City of Guanajuato, Mexico

María Jesús Puy-Alquiza*, Marlene Gómez Peralta**, Raúl Miranda-Avilés*, Veridiana Reyes-Zamudio***,
 Ma. del Carmen Salazar-Hernández****, Velia Yolanda Ordaz Zubía*****

RESUMEN

En este trabajo se analizan los procesos de deterioro que ejercen las comunidades de líquenes en las areniscas siliceas de dos monumentos del siglo XIX y XX de la ciudad de Guanajuato: escalinatas de la Universidad de Guanajuato y la Escuela de Música de la Universidad de Guanajuato. Además de contribuir al conocimiento del deterioro, se aportan datos sobre las especies líquénicas encontradas, las causas de su crecimiento y su papel en el desgaste del material pétreo, con la finalidad de implementar medidas de protección y prevención. Se observó la interfase liquen-roca usando técnicas complementarias como microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (MEB), microscopía electrónica de transmisión (MET), método analítico de plasma acoplado por inducción (ICP-MS, por sus siglas en inglés) y espectroscopía por energía dispersiva de rayos X (EDS, por sus siglas en inglés). Se identificaron cinco especies de líquenes: *Xanthoparmelia mexicana*, *Xanthoparmelia tasmanica*; *Caloplaca aff. brouardii*, *Caloplaca aff. ludificans* y *Aspicilia sp.* Dichos líquenes penetran de 0.5 µm a 50 µm en el substrato a través de sus rizinas, ocasionando la disgregación de minerales en la superficie rocosa (cuarzo, plagioclasa y feldespato). La disgregación de minerales junto con una disminución en la concentración de SiO₂, Al₂O₃, Zn y K₂O y un aumento en CaO, Fe₂O₃ y MgO demuestra un proceso de deterioro de los líquenes en los monumentos históricos de la ciudad de Guanajuato.

ABSTRACT

In this paper we present the deterioration processes that exert lichen communities in siliceous sandstones of two historical monuments of the nineteenth and twentieth Centuries of the Guanajuato city (steps of the Guanajuato University and the School of Music at the Guanajuato University). In addition to contributing to the knowledge of deterioration, data on the lichen species found, is provided, the causes of its growth and its role in the deterioration of the stone material, in order to implement measures of protection and prevention. The lichen-rock interface was observed using complementary techniques such as, optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), Inductively Coupled Plasma (ICP), and energy dispersive spectroscopy X-ray (EDS). Were identified five species of lichens: *Xanthoparmelia mexicana*, *Xanthoparmelia tasmanica*; *Caloplaca aff. brouardii*, *Caloplaca aff. ludificans* and *Aspicilia sp.* These lichens penetrate 0.5 µm to 50 µm on the substrate through its rhizines, causing disintegration of minerals in the rock surface (plagioclase, quartz and feldspar). The disintegration of minerals along with the changes in chemical composition in the lichen-rock interface shows a negative action on the rocky surface, (the decrease in SiO₂, Al₂O₃, Zn, and K₂O and the presence of a high percentage in CaO, Fe₂O₃, and MgO).

Recibido: 26 de abril de 2015

Aceptado: 6 de agosto de 2015

Palabras clave:

Líquen; deterioro; material pétreo; ciudad de Guanajuato.

Keywords:

Lichens; biodeterioration; stone material; Guanajuato city.

Cómo citar:

Puy-Alquiza, M. J., Gómez Peralta, M., Miranda-Avilés, R., Reyes-Zamudio, V., Salazar-Hernández, M. del C., & Ordaz Zubía, V. Y. (2015). El rol de las comunidades de líquenes en el deterioro superficial de su substrato rocoso: estudio de la interfase liquen-roca en dos monumentos históricos de la ciudad de Guanajuato, México. *Acta Universitaria*, 25(4), 35-47. doi: 10.15174/au.2015.781

* Departamento de Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez núm. 77, zona centro, Guanajuato, Guanajuato, México, C.P. 36000. Tel.: (473) 10 20 100; ext. 2212. Correos electrónicos: yosune.puy155@gmail.com; rmiranda@ugto.mx

** Herbario de la Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Edificio "R", Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México. Correo electrónico: marlenegomezperalta@gmail.com

*** Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México. Correo electrónico: viridian@ugto.mx

**** Unidad Interdisciplinaria de Ingenierías, Campus Guanajuato, Instituto Politécnico Nacional (IPN), México. Correo electrónico: msalazarh@ipn.mx

***** Departamento de Arquitectura, División de Arquitectura, Arte y diseño, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México. Correo electrónico: veliaordaz@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, numerosos autores han demostrado la participación de bacterias, hongos, algas, líquenes, musgos y plantas vasculares en el biodeterioro de las superficies rocosas de monumentos antiguos (Eckardt, 1985; 1990; Krumbein, 1998; Piervittori, Favero-Longo & Gazzano, 2009; Warscheid, Petersen & Krumbein, 1988; Warscheid, Oetling & Kumbrein, 1991; Warscheid & Krumbein, 1994). Dichas comunidades se desarrollan asociadas a los sustratos de roca, ocasionando el deterioro químico y físico de la misma, y alterando a través de diferentes mecanismos la apariencia estética y la integridad física del material (Favero-Longo *et al.*, 2011; McIlroy, Warke & Smith, 2014; Palinska & Krumbein, 1998; Scarciglia *et al.*, 2012), con la consecuente formación y transformación de minerales. La excreción de enzimas y ácidos inorgánicos y orgánicos disuelve los componentes estructurales del sustrato mineral, contribuyendo a los procesos de deterioro (Eckardt, 1985; Guglielmin, Favero-Longo, Cannone, Piervittori & Strini, 2011; Warscheid *et al.*, 1988; Warscheid & Braams, 2000). Las partículas minerales que se originan en la degradación junto con restos de materia orgánica procedentes de las algas y el nitrógeno fijado por algunas cianobacterias facilitan la formación de un sustrato para el crecimiento de bacterias, hongos y líquenes (Eckardt, 1985). Las poblaciones algales y bacterianas epilíticas producen una considerable corrosión de los materiales, siendo las algas verdes y las cianobacterias las causantes de la degradación (Krumbein, 1972). Los líquenes favorecen procesos de deterioro físico-químicos que pueden convertirse en un problema cuando se produce la colonización, ya que las hifas de los líquenes producen ácido oxálico, sílvico y fúlvico que penetran la superficie rocosa, deteriorándola (Ascaso, Galván & Rodríguez-Pascual, 1976; De los Ríos, Wierzchos, Sancho, Green & Ascaso, 2005; Piervittori *et al.*, 2009). El ácido oxálico es fundamental en los procesos de alteración de los materiales pétreos por su acción lixiviante, el cual desmineraliza las rocas. Los dos últimos (ácido sílvico y fúlvico) son formadores de suelos, es decir, producirán lo necesario para que se puedan desarrollar plantas vasculares. Cabe mencionar que el deterioro ocasionado por los líquenes y su efecto depende tanto de la especie como del litotipo involucrado. En ciertas situaciones, los talos liquénicos actúan como barreras que protegen el sustrato rocoso de los agentes atmosféricos abióticos (Piervittori *et al.*, 2009) y sirven como excelentes bioindicadores de contaminación (Galun & Ronen, 1988).

Los dos monumentos históricos de la ciudad de Guanajuato (escalinas de la Universidad de Guanajuato y la Escuela de Música de la Universidad de Guanajuato) que presentan líquenes, formados por la asociación simbiótica entre un hongo, denominado *micobionte* (simbionte heterótrofo) y un alga verde o una cianobacteria denominada *ficobionte* (simbionte autótrofo). Las principales alteraciones que muestran dichos monumentos históricos son: pátinas naranjas, grises, costras negras, descamaciones, desplacaciones, arenización y costras salinas. Los procesos involucrados son: intemperie, deterioro, contaminación ambiental y actividad antropogénica, reflejándose en el aspecto estético de la superficie rocosa. Las causas de estas alteraciones están relacionadas con el tipo de material pétreo (Puy-Alquiza, Miranda-Avilés, Salazar, Vega & Cervantes, 2013), la contaminación atmosférica producida por la combustión de los vehículos y la debida al creciente número de turistas que visitan anualmente el lugar. Sumado a ello, el clima de la zona juega un papel importante en la intemperie y en la dispersión de los contaminantes emitidos por los automóviles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con la finalidad de conocer los procesos de deterioro que ocurren en la interacción liquen-substrato rocoso, se dividió el trabajo de investigación en cuatro etapas. La primera consistió en caracterizar los parámetros físicos y mecánicos del material pétreo en donde crecen las comunidades de líquenes, usando para ello las Normas Europeas UNE-EN 1925:1999 (absorción de agua por capilaridad), UNE-EN 1936:2006 (porosidad total y densidad aparente y real) y UNE-EN 1926:2006 (resistencia a la compresión uniaxial). La segunda etapa se orientó a la recolección de un mínimo de cinco muestras de cada especie de líquenes en los sitios seleccionados (escalinas de la Universidad de Guanajuato y Escuela de Música de la Universidad de Guanajuato); las muestras de liquen fueron tomadas con una espátula de plástico, recolectándose aproximadamente 3.4 g de liquen. Las muestras se almacenaron en bolsas de plástico, manteniéndolas a -4 °C durante el transporte al laboratorio, y refrigerándolas a -4 °C antes de usarlas. Se identificaron las especies de líquenes utilizando un microscopio óptico (Olympus BX41), siguiendo las claves y descripciones propuestas por Nash III, Ryan, Diederich, Gries & Bungartz (2004) y Nash III, Gries & Bungartz (2007). La tercera etapa radicó en la caracterización petrográfica, mineralógica y geoquímica del sustrato rocoso y de la comunidad liquénica, usando el microscopio óptico (Olympus BX41), el método analítico de plasma acoplado por inducción (ICP-MS) y espectroscopía por

energía dispersiva de rayos X (EDS). Por último, la cuarta etapa se basó en el análisis de la interfase liquen-roca que se llevó a cabo combinando las técnicas del microscopio electrónico de barrido (MEB), marca A TM1000, Hitachi, microscopio electrónico de transmisión (MET), FEI Tecnai 10 y difracción de rayos X (EDS, por sus siglas en inglés), Miniflex Rigaku.

Descripción del área de estudio

La zona de monumentos estudiada se localiza en la ciudad de Guanajuato (21° LN y 101° LO). Los edificios corresponden a los siglos XIX y XX, construidos con material pétreo perteneciente a la Formación Losero, que está constituida por 25 variedades de arenisca de color verde, de las cuales dos de ellas (M1 y M2) son las más utilizadas en la construcción y restauración de monumentos en la ciudad de Guanajuato (Puy-Alquia *et al.*, 2013), y en donde se desarrolla la mayoría de las comunidades líquenicas estudiadas. El conjunto de monumentos estudiados se encuentra representado por las escalinatas de la Universidad de Guanajuato del siglo XX y la casa con el número 152 del Paseo de la Presa del siglo XIX, hoy en día la Escuela de Música de la Universidad de Guanajuato (figura 1). La elección del área y la selección de los monumentos fueron determinadas por su deterioro y presencia de líquenes, los cuales pueden detectarse por las manchas coloreadas que desarrollan, llegando a formar costras prominentes. Las areniscas estudiadas presentan una serie de características ambientales comunes, se encuentran en zonas en donde la contaminación atmosférica alcanza niveles elevados, la humedad baja en períodos de seca (invierno y primavera boreal) alta en el período cálido-húmedo (verano boreal) y su exposición directa a la luz solar es mínima. La precipitación total anual en la región es de aproximadamente 700 mm, la temperatura media anual es de 19°C , la humedad relativa es de 25% y la evapotranspiración total anual es de aproximadamente 1900 mm. Cabe mencionar que los monumentos estudiados se encuentran en la zona urbana, rodeados por parques en donde existe una importante población de aves, reflejándose en el aumento de las deposiciones de estas en el material pétreo de los monumentos estudiados.

Análisis de los parámetros físicos y mecánicos del material pétreo

Análisis físicos. Los parámetros físicos analizados en el material pétreo (M1 y M2) fueron: absorción de agua por capilaridad, densidad aparente y real, así como porosidad total. Para el primero se utilizó la Norma Europea UNE-EN 1925:1999 y para la porosidad

total, densidad aparente y real se usó la Norma Europea UNE-EN 1936:2006.

Ánálisis mecánico. El análisis mecánico consistió en determinar en el material pétreo (M1 y M2) la resistencia a la compresión uniaxial, siguiendo la Norma Europea UNE-EN1926:2006.

Ánálisis petrográfico y mineralógico del material pétreo. El análisis petrográfico de las dos variedades de material pétreo estudiadas (M1 y M2) se llevó a cabo a través de dos láminas delgadas usando el microscopio óptico Olympus BX41. Las fases mineralógicas de las muestras estudiadas fueron identificadas, usando el difractómetro Miniflex Rigaku; para ello se tomaron 20 mg de material para cada muestra.

Ánálisis biológico. Los líquenes se muestrearon en los meses de enero (invierno) y octubre (otoño) del 2011, raspando asepticamente con una asa de plástico las paredes exteriores del edificio de la Escuela de Música de la Universidad de Guanajuato y el barandal de las escalinatas de la Universidad de Guanajuato, procurando no dañar el material pétreo. Para el muestreo se tomaron en cuenta las zonas con mayor crecimiento de líquenes, el tipo de material y exposición (sol y sombra). Los ejemplares de líquenes se revisaron taxonómicamente mediante el uso de claves especializadas (Nash *et al.*, 2004; 2007), tomando en cuenta sus características vegetativas y reproductivas (observadas con la ayuda del microscopio óptico Olympus BX41 y estereoscopio); así como las químicas (presencia de ácidos líquénicos), con base en las reacciones a los reactivos: hidróxido de potasio al 10% (K) y solución saturada de hipoclorito de calcio (C), así como a las combinaciones de ambos (KC).

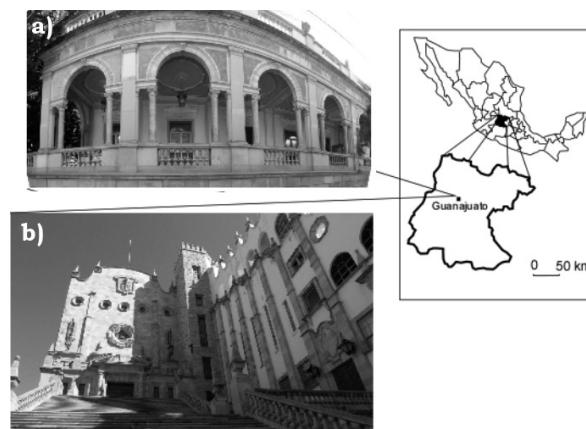


Figura 1. Conjunto monumental estudiado. a) Escuela de Música de la Universidad de Guanajuato; b) Universidad de Guanajuato.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis geoquímico de elementos mayores y trazas (ICP-MS). Para el análisis geoquímico del material pétreo y de la comunidad líquenica se trituró de manera separada el material pétreo y los líquenes. Tanto las muestras de roca como los líquenes se pulverizaron a un tamaño menor de 75 μ (malla 200). De las muestras pulverizadas se obtuvieron las concentraciones de elementos mayores y elementos traza utilizando espectrometría de plasma-masa inductivamente acoplado (ICP-MS, por sus siglas en inglés). Este análisis se realizó en las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, Juriquilla, Querétaro.

Interfase liquen-roca (MEB-MET-EDS). Con la finalidad de determinar los procesos de interacción entre el liquen y la roca, se combinaron varias técnicas de observación, como el microscopio óptico MEB, MET y EDS. Se realizaron varias secciones delgadas para ser observadas en el microscopio óptico, con el objetivo de conocer la penetración de las hifas del liquen y su interacción física con los diferentes minerales. De igual manera, las muestras de roca con crecimiento líquenico y muestras de roca sin crecimiento líquenico fueron observadas con MEB complementado con la EDS, permitiendo observar los componentes biológicos en su microhabitat mineral y conocer la composición química cuantitativa de dichos materiales. El uso del MET combinado con EDS proporcionó información cuantitativa y cualitativa de los constituyentes inorgánicos.

RESULTADOS

Análisis físico y mecánico del material pétreo. Los resultados de las determinaciones de los parámetros físicos (absorción de agua por capilaridad, densidad aparente y real, y porosidad total) y mecánicos (resistencia a la compresión uniaxial) del material pétreo se resumen en la tabla 1 y figura 2. Las variedades estudiadas de material pétreo presentan valores de densidad aparente de 2.491 g/cm³ para M1 y 2.674 g/cm³ para M2, mientras que los valores de densidad real son similares para ambas variedades (2.75 g/cm³). Por su parte, el coeficiente de absorción de agua por capilaridad fue para M1 (0.050 g/cm² · s^{0.5}) y para M2 (0.06 g/cm² · s^{0.5}) en 120 min (tabla 1), lo que indica la variabilidad de las características de las rocas que conforman dichos monumentos históricos y el grado de deterioro que pueden alcanzar según el lugar de exposición; es decir, si el material rocoso se encuentra ubicado al exterior o al interior del monumento. M1 y M2 muestran valores de resistencia a la compresión de (62.36 Mpa y 72.83 Mpa, respectivamente), cuando la carga aplicada es paralela a sus planos de anisotro-

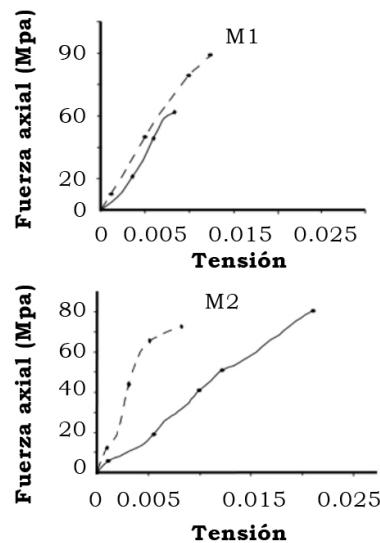
pía. En cambio, cuando la carga aplicada es perpendicular a sus planos de anisotropía se registran valores más altos para M1 (98.44 Mpa) y M2 (80.68 Mpa) (figura 2). Estos valores demuestran que la estratificación influye en el comportamiento mecánico de la roca, por lo tanto, la estratificación genera debilidades según el plano de sedimentación, pudiéndose plantear que el material pétreo presenta anisotropía desde el punto de vista estructural.

Tabla 1.

Densidad aparente, densidad real, absorción de agua, coeficiente de absorción de agua por capilaridad y porosidad total del material pétreo estudiado.

Parámetros físicos	M1	M2
Densidad aparente (gr/cm ³)	2.491	2.674
Densidad real (gr/cm ³)	2.750	2.755
Absorción de agua (%)	2.840	4.400
Coeficiente de absorción de agua por capilaridad (120 min)(g/cm ² · s ^{0.5})	0.050	0.060
Porosidad total	9.410	2.940

Fuente: Elaboración propia.



- Paralelo al plano de anisotropía
- Perpendicular al plano de anisotropía

Material pétreo	Fuerza compresiva paralela a los planos de anisotropía (Mpa)	Fuerza compresiva perpendicular a los planos de anisotropía (Mpa)
M1	62.36	98.44
M2	72.82	80.68

Figura 2. Compresión uniaxial del material pétreo de M1 y M2.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis petrográfico y mineralógico. El análisis petrográfico de las dos variedades de material pétreo (M1 y M2) muestra que la roca es una arenisca de grano medio a fino, compuesta principalmente por cuarzo, plagioclasa, biotita, moscovita, líticos volcánicos, líticos metamórficos y óxidos de fierro inmersos en una matriz de sílice (tabla 2). La difracción de rayos X confirma la existencia, en las dos muestras estudiadas, de fases mineralógicas de cuarzo, plagioclasa y moscovita, aunque existe una diferencia entre ambas, la presencia de calcita y caolinita en el material pétreo M1 (figura 3).

Análisis biológico. Identificación de líquenes. Para identificar las especies de líquenes que crecen en el material pétreo de los monumentos estudiados se emplearon claves y descripciones tomadas de (Nash III *et al.*, 2004; 2007). Entre los especímenes identificados se encuentran dos especies foliosas: *Xanthoparmelia mexicana* y *Xanthoparmelia tasmanica*, y tres costrosas: *Caloplaca aff. brouardii*, *Caloplaca aff. ludificans* y *Aspicilia sp.* (figura 4). Las especies, lugares donde se hallaron y sus preferencias por el sol o la sombra se muestran en la tabla 3.

Xanthoparmelia mexicana (Gyeln) Hale pertenece a la familia Parmeliaceae, presenta un talo folioso que crece en forma de rosetas y su fotobionte es un alga verde; la superficie superior del talo es de color verde amarillento, sin lóbulos imbricados, de 4 mm de ancho, la médula es blanca y la superficie inferior es de color café pálido, moderada a densamente rizinada, las rizinas son de color café pálido; ligeramente adherido al sustrato. El ejemplar no presenta apotecios ni picnidios, tiene isidios (estructuras de reproducción asexual) abundantes subglobosos al principio y después cilíndricos. Las reacciones que se evidencian son K-, C-, KC- en la superficie superior y en la médula K+ amarillo cambiando a rojo oscuro y C-, KC-.

Xanthoparmelia tasmanica (Hook & Taylor) Hale pertenece a la familia Parmeliaceae, presenta un talo folioso que crece en forma de rosetas y su fotobionte es un alga verde; la superficie superior del talo es de color verde amarillento, con lóbulos pequeños de 2 mm a 3 mm de ancho, e imbricados, la médula es blanca y la superficie inferior es negra con rizinas escasas de color negro; ligeramente adherido al sustrato. Muestra apotecios con disco de color café de 2 mm a 25 mm de ancho y margen liso; presenta además picnidios (estructuras de reproducción asexual). Las reacciones que produce son K-, C-, KC-, en la corteza superior; mientras que en la médula es K+ amarillo que cambia a rojo oscuro y C- KC-. Los líquenes foliosos se encuentran expuestos al sol, recubriendo un área de 31.5 m² en la Escuela de Música y 5 m² en las escalinatas de la Universidad de Guanajuato (figura 4).

Tabla 2.

Composición mineralógica del material pétreo en el microscopio óptico Olympus BX41.

Composición mineralógica	M1	M2
Cuarzo	33	38
Plagioclasa	17	29
Biotita	7	5
Líticos volcánicos	20	4
Líticos metamórficos	19	20
Óxidos de fierro	4	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.

Especies de líquenes hallados en los monumentos históricos de la ciudad de Guanajuato.

Especies	Lugar	Sol	Sombra
<i>Xanthoparmelia mexicana</i>	Balcón de la Escuela de Música, sobre arenisca		X
<i>Xanthoparmelia tasmanica</i>	Balcón de la Escuela de música, sobre arenisca		X
<i>Caloplaca aff. brouardii</i>	Barandal de la Universidad de Guanajuato, sobre arenisca	X	X
<i>Caloplaca aff. ludificans</i>	Barandal de la Universidad de Guanajuato, sobre arenisca	X	X
<i>Aspicilia sp.</i>	Parte superior del balcón de la Escuela de Música sobre arenisca	X	X

Fuente: Elaboración propia.

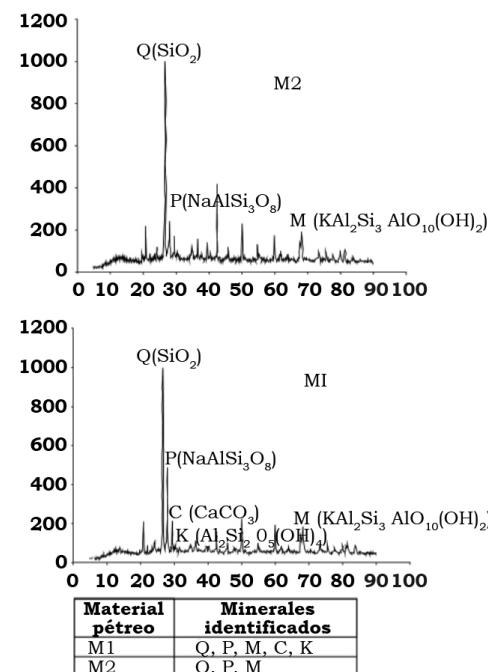


Figura 3. Identificación mineralógica por difracción de rayos X del material pétreo.
Q: cuarzo; P: plagioclasa; M: moscovita; C: calcita y K: caolinita.

Fuente: Elaboración propia.

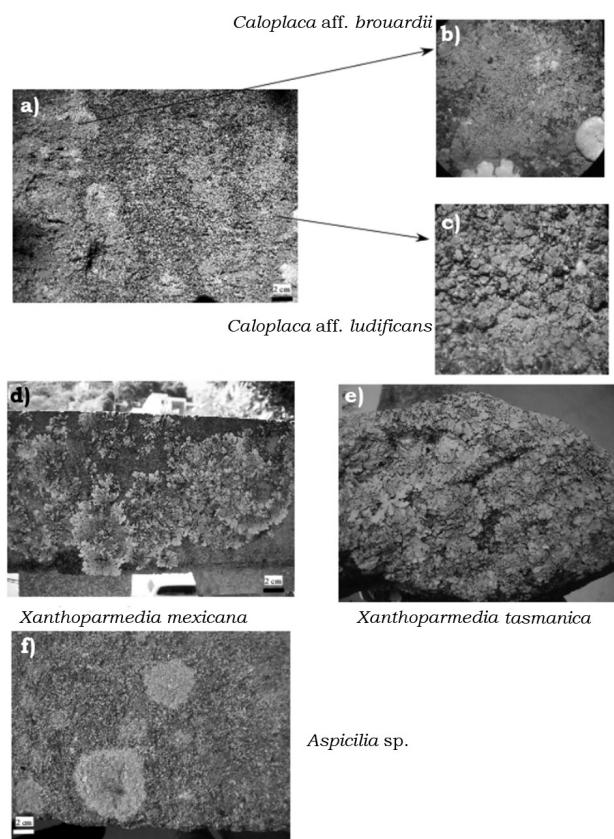


Figura 4. a) Material petreo con las especies de *Caloplaca*; b) *Caloplaca aff. brouardii*; c) *Caloplaca aff. ludificans*; d) *Xanthoparmelia mexicana*; e) *Xanthoparmelia tasmanica*; f) *Aspicilia* sp.

Fuente: Elaboracion propia.

Caloplaca aff. brouardii (B. de Lesd.) Zahlbr, corresponde a la familia Teloschistaceae, presenta un talo costoso, su fotobionte es un alga verde; el talo es areolado (formando placas) hacia el centro y formando lóbulos elongados hacia los márgenes de 0.3 mm a 0.5 mm de ancho. La superficie superior es de color anaranjado, no evidencia superficie inferior y está muy adherido al sustrato. Muestra apotecio circular plano, con el disco y el margen del mismo color del talo, con diámetro de 0.2 mm a 0.8 mm; en el ejemplar, el apotecio se presentó inmaduro y no fue posible observar esporas. La porción central del talo presenta isidios (estructuras de reproducción asexual) en forma de papillas. Las reacciones que produce son C- y K+ morado en la superficie superior y en el margen del apotecio.

Caloplaca aff. ludificans Arup, de la familia Teloschistaceae, presenta un talo costoso poco desarrollado, areolado (formando placas) en toda su superficie,

sin formar lóbulos elongados, su fotobionte es un alga verde. La superficie superior es de color amarillo naranja; no muestra superficie inferior y está muy adherido al sustrato. Presenta numerosos apotecios con disco y margen de color naranja, de 0.4 mm a 0.8 mm de diámetro, las esporas son polariloculares (de dos lóculos) de 9 micras - 11 micras x 5 micras - 6 micras y se observan ocho por ascocysta. No se observaron estructuras de reproducción asexual. Las reacciones que produce son C- y K+ morado en la superficie superior y en el margen del apotecio. Dichos líquenes costrosos ocupan extensiones reducidas sobre el substrato, su recubrimiento es de 24.5 m² en la Escuela de Música de la Universidad de Guanajuato y de 9 m² en las escalinatas de la Universidad de Guanajuato. Crecen en la superficie rocosa expuesta al sol y sombra (figura 4).

Aspicilia sp., de la familia Megasporaceae, es un liquen costoso, areolado (formando placas) en el centro, y lóbulos redondeados marginalmente. La superficie superior es de color gris, algo verdosa, la médula es blanca y no presenta superficie inferior, muy adherido al sustrato. El fotobionte es un alga verde. El ejemplar revisado es muy pequeño con diámetro 2 mm, e inmaduro, no se observó ningún tipo de estructura de reproducción ni sexual ni asexual. Las reacciones al K, C y KC, son negativas (figura 4), cubriendo 14 m², en la Escuela de Música de la Universidad de Guanajuato 6 m² en las escalinatas de la Universidad de Guanajuato. Las especies foliosas y costrosas se muestran de buen tamaño y mejor desarrolladas sobre las areniscas del balcón de la Escuela de Música, no así en las escalinatas de la Universidad de Guanajuato, ambas presentan un escaso crecimiento. Esto puede deberse a que las escalinatas de la Universidad de Guanajuato se encuentran mayormente expuestas a la contaminación atmosférica por el paso intenso del flujo de vehículos en comparación con el moderado tránsito vehicular que se manifiesta en los alrededores de la Escuela de Música.

Análisis geoquímico de elementos mayores y traza. Los elementos mayores y traza del material pétreo y de los líquenes se muestran en la tabla 4. Se puede observar una alta concentración de Si (80.62% - 80.95%), Li (62.60 ppm - 69.55 ppm), V (42.09 ppm - 43.55 ppm), Ba (664.46 ppm - 664.76 ppm) y Rb (190.88 ppm - 204.14 ppm). En atención a los líquenes (*Xanthoparmelia mexicana*, *Xanthoparmelia tasmanica*, *Caloplaca aff. brouardii*, *Caloplaca aff. ludificans*. y *Aspicilia* sp.), éstos muestran valores altos de elementos mayores y

traza si los comparamos con los valores del material pétreo (M1 y M2). En *Xanthoparmelia mexicana* y *Xanthoparmelia tasmanica* los valores más altos corresponden a CaO (27.7%, 27.9%), Fe₂O₃ (13.30%, 13.32%), Cu (17.80 ppm, 17.83 ppm), Zn (47.81 ppm, 47.83 ppm), Sr (68.80 ppm, 68.82 ppm) y Pb (94.1 ppm, 95.1 ppm), respectivamente (tabla 4). En cuanto a los líquenes *Caloplaca aff. brouardii* y *Caloplaca aff. ludificans*, muestran valores más altos en CaO (5.83%, 5.88%), Fe₂O₃ (22.32%, 22.35%), Cu (18.20 ppm y 18.24 ppm), Zn (72.24 ppm y 72.23 ppm), Sr (33.91 ppm y 33.97 ppm), Ba (177.16 ppm y 117.14 ppm) y Pb (92.40 ppm, 92.42 ppm), respectivamente (tabla 4), mientras que en *Aspicilia*, sp., los valores más altos se encuentran en el S (1.4%), CaO (8.2%), Ti (3.55%), Fe₂O₃ (31.66%), Li (59.90 ppm), Cu (90.59 ppm), Sr (76.22 ppm), Ba (645.52 ppm), Co (4.72 ppm), Zn (77.11 ppm), Sn (8.49 ppm), Sb (21.8 ppm), Cs (18.34 ppm) y Pb (612.91 ppm) (tabla 4). Con base en estos valores, es importante mencionar que los líquenes *Xanthoparmelia mexicana*, *Xanthoparmelia tasmanica*, *Caloplaca aff. Brouardii* y *Caloplaca aff. ludificans* los valores altos inciden en los mismos elementos (CaO, Fe₂O₃, Cu, Zn, Sr y Pb), mientras que en el liquen *Aspicilia* sp. las concentraciones altas se reflejan en los siguientes elementos (S, Ti, Fe₂O₃, Li, Cu, Sr, Ba, Co, Zn, Sn, Cs y Pb).

Análisis interfase liquen-roca. Hifas. La zona de contacto entre las hifas del liquen y la roca presenta un alto grado de heterogeneidad como consecuencia de la presencia de componentes rocosos, partículas divididas, minerales laminares y componentes inorgánicos (oxalatos); estos últimos no pudieron ser clasificados en cuanto a su composición. El proceso de biodeterioro observado fue el biogeofísico (origen mecánico) ocasionado por la forma de adhesión de los líquenes al substrato. Dicho proceso comienza con la penetración de las hifas a través de diversas fisuras en la roca, acelerando el proceso biogeofísico. Con base en los distintos biotipos líquénicos expuestos en el área de estudio, se observa que los líquenes de talo foliáceo (*Xanthoparmelia mexicana* y *Xanthoparmelia tasmanica*) penetran de 30 µm a 50 µm en el material pétreo a través de sus rizinas e hifas, ocasionando la ruptura de minerales primarios (cuarzo, plagioclasa y feldespato); estos minerales permanecen adheridos en las rizinas o en la parte externa de los talos, su tamaño varía entre 10 µm a 20 µm (figura 5). En el material pétreo (M1) colonizado por *Xanthoparmelia mexicana* se observa que las hifas producen una superficie alveolada (figura 6), mientras que en los talos costrosos

las hifas se adhieren a la superficie mineral, la cual es finalmente microdividida y embebida, ejemplo de ello son *Caloplaca aff. brouardii*, *Caloplaca aff. ludificans* y *Aspicilia* sp., observándose una superficie de canales de perforación (figura 5). Las hifas de los líquenes costrosos penetran en la superficie rocosa de 0.5 µm a 10 µm, advirtiéndose en los apotecios una costra de color blanquecina producto de la disgregación de minerales (plagioclasa y cuarzo), ocasionado por la penetración de sus hifas. Con base en estas observaciones, se infiere que existe una estrecha relación entre las hifas de los líquenes y la disgregación de minerales, lo que nos lleva a pensar que existe también una asociación con los procesos biogeoquímicos. Prueba de ello fueron los resultados arrojados por la técnica ICP-MS (tabla 5), percatándose que hay diferencias importantes de composición química entre el material pétreo colonizado por los líquenes y los que permanecen no colonizados. Las especies de *Xanthoparmelia* y *Caloplaca* se encuentran colonizando al material pétreo M1, mientras que *Aspicilia* sp. coloniza al material pétreo M2. De manera general, se puede observar (tabla 5) que el material pétreo colonizado muestra una disminución en Al y K y un aumento en Fe, además de la presencia de Zn con respecto al no colonizado (tabla 5). Esto sugiere que los líquenes estudiados (*Xanthoparmelia mexicana*, *Xanthoparmelia tasmanica*, *Caloplaca aff. brouardii*, *Caloplaca aff. ludificans* y *Aspicilia* sp.) pueden inducir la concentración de dichos elementos, cambiando la química del material pétreo. La combinación de los procesos mecánicos y químicos contribuye a la degradación y a una mayor erodabilidad de la superficie rocosa de los monumentos estudiados. La presencia de valores altos de azufre S, Fe y Pb en el liquen *Aspicilia* sp. (tabla 5), producto de la combustión de gasolina y otros combustibles fósiles provenientes de vehículos automotores, sugiere que dicho liquen es un excelente indicador de contaminación atmosférica.

Interfase (MET-MEB). Usando MET y MEB se pudo observar la zona de biodeterioro, donde los talos de *Xanthoparmelia mexicana*, *Xanthoparmelia tasmanica*, *Caloplaca aff. brouardii*, *Caloplaca aff. ludificans* y *Aspicilia* sp. penetran en los cuarzos y plagioclasas (figura 6). El espesor de la interfase liquen-roca es de 1 µm - 4 µm. Las plagioclasas se encuentran retenidas en los talos de los líquenes, observándose una disminución en SiO₂, Al₂O₃, K₂O, mientras que la cantidad de Fe₂O₃ y CaO se incrementa en el área ocupada por el talo del liquen (tabla 5).

Tabla 4.

Datos ICP, valores elementos mayores (Wt%) y elementos traza (ppm) del material pétreo (M1 y M2) y de los líquenes.

Elementos mayores y traza	Xanthoparmelia mexicana	Xanthoparmelia tasmanica	Caloplaca aff. brouardii	Caloplaca aff. ludificans	Aspicilia sp.	M1	M2
Na ₂ O (Wt%)	0	0	0	0	0	0	0
MgO (Wt%)	0	0	1.85	1.82	1.9	0	0
Al ₂ O ₃ (Wt%)	12.83	12.85	11.13	11.10	15.13	17.31	16.42
SiO ₂ (Wt%)	32.40	32.42	54.28	54.23	38.13	80.95	80.62
P (Wt%)	0	0	0	0	0	0	0
S (Wt%)	0	0	0	0	1.4	0	0
K ₂ O (Wt%)	13.50	13.52	5.68	5.62	5.03	13.93	3.84
CaO (Wt%)	27.7	27.9	5.88	5.83	8.2	0.12	0
Ti (Wt%)	0	0	0	0	3.55	0	0
Fe ₂ O ₃ (Wt%)	13.30	13.32	22.35	22.32	31.66	0.60	0.27
Zn (ppm)	0	0	0	0	0	0	0
Mo (ppm)	0	0	0	0	0	0	0
Li (ppm)	6.67	6.68	33.82	33.80	59.9	62.60	69.55
Be (ppm)	0.33	0.36	1.46	1.49	4.24	3.41	3.52
Sc (ppm)	0.94	0.95	1.62	1.63	2.47	5.89	6.53
Ti (ppm)	0.11	0.12	0.13	0.19	0.10	0.19	0.22
V (ppm)	13.47	13.49	17.30	17.38	27.65	43.55	42.09
Cr (ppm)	8.9	9.0	8.96	8.94	6.05	17.71	19.18
Co (ppm)	1.44	1.46	1.98	1.95	4.72	2.80	2.87
Ni (ppm)	4.24	4.26	3.43	3.40	5.70	7.39	6.95
Cu (ppm)	17.80	17.83	18.24	18.20	90.59	9.12	7.91
Zn(ppm)	47.81	47.83	72.24	72.23	77.11	37.88	38.60
Ga (ppm)	2.09	2.10	6.61	6.68	19.85	14.28	17.71
Rb (ppm)	11.38	11.40	53.59	53.60	188.05	204.14	190.88
Sr (ppm)	68.80	68.82	33.91	33.97	76.22	26.18	28.84
Y (ppm)	3.39	3.40	6.15	6.10	18.13	16.87	11.12
Zr (ppm)	13.57	13.58	27.35	27.38	46.63	48.76	45.47
Nb (ppm)	1.62	1.64	4.13	4.15	6.87	6.64	6.57
Mo (ppm)	0.55	0.57	0.36	0.40	0.16	0.35	0.95
Sn (ppm)	1.50	1.52	3.09	3.04	8.49	5.70	6.90
Sb (ppm)	0.69	0.70	0.91	0.96	21.8	1.19	1.58
Cs (ppm)	10.75	10.78	12.24	12.19	18.34	14.23	9.00
Ba (ppm)	29.80	29.82	177.16	177.14	645.52	664.76	664.46
La (ppm)	2.82	2.83	2.76	2.73	11.46	10.32	10.55
Ce (ppm)	6.44	6.46	7.85	7.83	24.10	21.79	21.45
Pr (ppm)	0.68	0.70	0.76	0.79	3.03	2.45	2.44
Nd (ppm)	2.95	2.97	3.17	3.20	11.26	9.04	8.27
Sm (ppm)	0.63	0.65	0.81	0.85	2.87	2.37	1.74
Eu (ppm)	0.11	0.12	0.14	0.17	0.37	0.34	0.27
Tb (ppm)	0.09	0.10	0.15	0.13	0.49	0.24	0.25
Gd (ppm)	0.64	0.65	0.87	0.86	2.93	1.44	1.53
Dy (ppm)	0.54	0.56	1.00	1.05	3.07	1.65	1.68
Ho (ppm)	0.10	0.12	0.21	0.23	0.61	0.37	0.36
Er (ppm)	0.27	0.29	0.59	0.57	1.70	1.17	1.08
Yb (ppm)	0.27	0.29	0.63	0.62	1.68	1.43	1.23
Lu (ppm)	0.02	0.04	0.09	0.07	0.24	0.21	0.18
Hf (ppm)	0.33	0.35	1.00	0.98	2.07	1.85	1.70
Ta (ppm)	0.14	0.13	0.55	0.56	1.19	1.01	1.08
W (ppm)	0.20	0.22	0.41	0.43	0.20	1.41	2.46
Tl (ppm)	0.06	0.07	0.39	0.37	1.25	1.57	1.48
Pb (ppm)	94.1	95.1	92.42	92.40	612.91	6.14	6.79
Th (ppm)	0.54	0.56	2.37	2.35	7.23	6.05	5.74
U (ppm)	0.23	0.24	1.65	1.64	2.82	3.37	3.6

Fuente: Elaboracion propia.

Tabla 5.

Valores de elementos mayores (Wt%), elementos traza (ppm) de los líquenes estudiados, del material pétreo y de la interfase liquen-roca.

Elementos mayores (Wt%) y elementos traza (ppm)	Xanthoparmelia sp.	M1	Interfase Xanthoparmelia sp.-M1	Aspicilia sp.	M2	Interfase Aspicilia sp.-M2	Caloplaca sp.	M1	Interfase Caloplaca sp.-M1	Valor límite permisible contaminación del aire. NOM-040-ECOL 2002
Na ₂ O (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al ₂ O (%)	12.82	17.31	10.72	15.13	16.42	14.82	11.13	16.42	12.5	0.1 - 50 µg/L
SiO ₂ (%)	32.42	80.95	62.15	38.13	80.62	44.8	54.28	80.62	53.3	
K ₂ O (%)	13.52	13.93	4.2	5.03	3.84	3.5	5.68	3.84	6.7	
MgO (%)	0	0	1.25	1.9	0	3.6	1.85	0	0	
CaO (%)	27.9	0.12	3.2	8.2	0	4.1	5.88	0	4.6	
SO (%)	-	-	-	1.4	-	-	-	-	-	0.13 ppm
Fe ₂ O ₃ (%)	13.32	0.60	17.7	31.66	0.27	20.9	22.35	0.27	23.0	
Li (ppm)	6.68	62.60	-	59.90	69.55	-	33.82	69.55	-	
Be (ppm)	0.36	3.41	-	4.24	3.52	-	1.46	3.52	-	
Sc (ppm)	0.95	5.89	-	2.47	6.53	-	1.62	6.53	-	
Ti (ppm)	0.12	0.19	-	0.10	0.22	-	0.13	0.22	-	
V (ppm)	13.49	43.55	-	27.65	42.09	-	17.30	42.09	-	
Cr (ppm)	9.04	17.71	-	6.05	19.18	-	8.96	19.18	-	0.0001 mg/m ³
Co (ppm)	1.46	2.80	-	4.72	2.87	-	1.98	2.87	-	0.0001 mg/m ³
Ni (ppm)	4.26	7.39	-	5.70	6.95	-	3.43	6.95	-	0.00009 mg/m ³
Cu (ppm)	17.83	9.12	-	90.59	7.91	-	18.24	7.91	-	
Zn (ppm)	47.83	37.88	5.6	77.11	38.60	-	72.24	38.60	-	0.23 mg/m ³
Sn (ppm)	1.52	5.70	-	8.49	6.90	-	3.09	6.90	-	
Sb (ppm)	0.70	1.19	-	21.8	1.58	-	0.91	1.58	-	0.14 mg/m ³
Ba (ppm)	29.82	664.76	-	645.52	664.46	-	177.16	664.46	-	
Rb (ppm)	11.40	204.14	-	188.05	190.88	-	53.59	190.88	-	
Sr (ppm)	68.82	26.18	-	76.22	28.84	-	33.91	28.84	-	
Pb (ppm)	95.10	6.14	-	612.91	6.79	-	92.42	6.79	-	0.00015 mg/m ³

Fuente: Elaboracion propia.

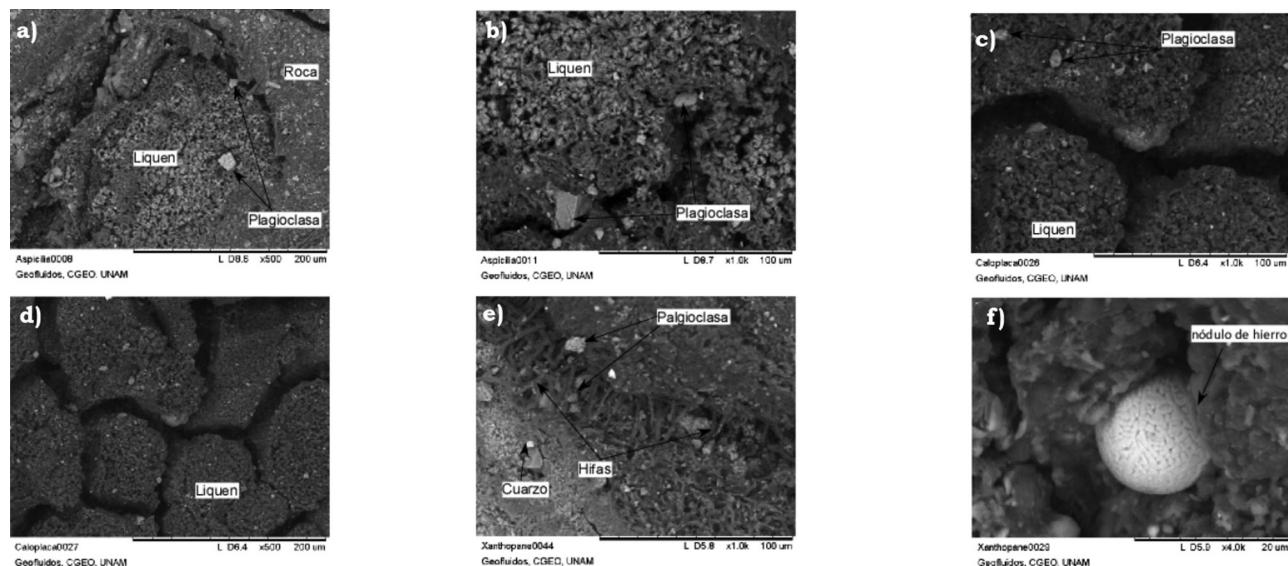


Figura 5. Fotografías MEB interacción liquen-roca. a), b) Aspicilia sp., erosionando y levantando minerales (plagioclasa); c), d) Caloplaca aff. brouardii, canales de perforación; e), f) Xanthoparmelia mexicana, rizinas penetrando el material pétreo y la presencia de una esfera de hierro.

Fuente: Elaboracion propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los liquenes en los monumentos históricos de la ciudad de Guanajuato, y en México en general, son un aspecto de la biodiversidad asociada con el deterioro, muy poco conocido y estudiado en nuestro país. En el presente trabajo se reportan cinco especies de liquenes saxícolas: *Xanthoparmelia mexicana*, *Xanthoparmelia tasmanica*, *Caloplaca aff. brouardii*, *Caloplaca aff. ludificans* y *Aspicilia sp.*, para los dos monumentos históricos estudiados en la ciudad de Guanajuato. La superficie del material pétreo perteneciente a los monumentos históricos (escalinatas de la Universidad de Guanajuato y la Escuela de Música de la Universidad de Guanajuato) se encuentra alterada, además de otros agentes, por la acción mecánica y química de los liquenes. Los factores más importantes que influyen en la distribución y crecimiento de los liquenes en los monumentos estudiados son: el tipo de substrato, la orientación y la exposición a la luminosidad, la humedad y el viento. El material pétreo en donde crecen los liquenes presenta características físicas (absorción de agua por capilaridad, densidad aparente y real y porosidad total) y mecánicas (resistencia a la compresión uniaxial) que favorecen los niveles de humedad, protegiendo de la desecación a dichos liquenes, beneficiando de esta manera su crecimiento. Las diferentes morfologías de los liquenes estudiados están representadas como dos especies foliosas (*Xanthoparmelia mexicana* y *Xanthoparmelia tasmanica*) y tres especies costrosas (*Caloplaca aff. brouardii*, *Caloplaca aff. ludificans* y *Aspicilia sp.*). Estos liquenes muestran una mayor colonización y distribución en la Escuela de Música de la Universidad de Guanajuato, comparado con los de las escalinatas de la Universidad de Guanajuato. Esta abundancia se debe probablemente a que la comunidad liquénica no se encuentra expuesta directamente a los agentes contaminantes de los vehículos, y que su crecimiento se da principalmente en las zonas de sombra. De igual modo, es importante resaltar la presencia de una mayor población de aves en la cercanía de la Escuela de Música. El excremento de las aves contiene compuestos químicos como nitratos, sulfatos y sulfitos que al mezclarse con la lluvia, aire y diversos contaminantes ambientales favorecen el crecimiento de microflora, el desarrollo de hongos y bacterias, capaces de crear condiciones adecuadas para que microorganismos que pueden vivir sin oxígeno entren en función. El ácido úrico y fosfórico originado por las deposiciones puede llegar a ocasionar deterioro del material pétreo, siempre y cuando haya anidación. Las deposiciones de las aves desarrollan microorganismos de los ciclos del nitrógeno y del azufre

que presentan una acción sinérgica, conduciendo a la nitrificación y a la formación de ácidos aún más corrosivos que los ya citados, como el sulfúrico y el nítrico. En el caso particular del área de estudio no se observa la anidación de aves, por lo que se considera que las defecaciones no juegan un papel importante en el deterioro del material pétreo. Las diferencias morfológicas y forma de crecimiento de los liquenes influyen la relación liquen-roca. Los liquenes foliosos (*Xanthoparmelia mexicana* y *Xanthoparmelia tasmanica*) causan un mayor impacto estético debido a su tamaño y extensión, así como también causan daño mecánico por la acción de penetración de sus rizinas (30 µm a 50 µm), particularmente en las rocas porosas, como en el caso de las areniscas bajo estudio. Por otro lado, los liquenes costrosos como *Caloplaca aff. brouardii*, *Caloplaca aff. ludificans* y *Aspicilia sp.*, sus hifas penetran 0.5 µm a 10 µm, adhiriéndose a la superficie mineral, la cual es finalmente micro-dividida y embebida, dando como resultado una superficie de canales de perforación. Ambos liquenes (foliosos y costrosos) ejercen, además, un daño químico debido al ácido oxálico, el cual genera corrosión superficial en el material pétreo, con formación de pequeños orificios por debajo de los talos (Ascaso, 1984). La inclusión de fragmentos de minerales en los talos parece ser común en todas las especies de liquenes estudiadas. Resultados similares se reportan en la literatura para diversos tipos de rocas (Ascaso, Sancho & Rodríguez-Pascual, 1990; Ascaso & Wierzchos, 1994; Chen, Blume & Beyer, 2000; Crisci, Gattuso, Macchione & Miriello, 2005; Lee & Parsons, 1999; Wierzchos & Ascaso, 1994; 1996). Las especies estudiadas son saxícolas, por lo que sugeriría que éstas ejercen una acción protectora sobre la roca, pero los resultados de los ensayos de resistencia y las observaciones con MEB no apoyan esta hipótesis. Estas especies actúan deteriorando las areniscas, penetrando una capa superficial muy delgada (1 µm - 4 µm). En esta interfase liquen-roca, los liquenes tanto foliosos como costrosos acumulan elementos mayores (SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , CaO y Fe_2O_3) y elementos traza del ambiente. En dicha interfase liquen-roca, las especies de *Xanthoparmelia* muestran una disminución de SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O y un aumento en MgO , Fe_2O_3 y CaO en el área ocupada por las rizinas de los liquenes. En cambio, en la interfase liquen-roca de las especies *Caloplaca* se observa una disminución en Al_2O_3 , y SiO_2 y un aumento en K_2O , CaO y Fe_2O_3 . Para el caso de la interfase liquen-roca de la especie *Aspicilia sp.* se puede observar una disminución en SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O y un aumento en MgO , Fe_2O_3 y CaO . El aumento de dichos componentes en los liquenes estudiados está relacionado probablemente con los ácidos orgánicos que éstos secretan, como es el caso del ácido oxálico, ácido

cítrico, ácido glucónico, ácido gioxilico y ácido oxaloacético (Braams, 1992; Lewis, May & Bravery, 1988). El ácido oxálico puede producir una cristalización de oxalato cálcico, o bien, solubilizar al Fe, Al o Ca. Los ácidos también pueden influir en el pH, un pH bajo, provocando la solubilidad del Al, alterando las plagioclásas, dando lugar a una neoformación de cristales de carbonato cálcico (Guglielmin *et al.*, 2011). La presencia de altas concentraciones de S, Pb, Sb, Co, Cu, Fe₂O₃ y Zn en *Aspicilia* sp. nos indica la capacidad que tiene dicho liquen de acumular estos metales pesados, por lo que se le puede considerar un excelente indicador de contaminación atmosférica. Las observaciones con microscopio óptico, MEB, MET y EDS, indican que los líquenes, efectivamente, ocasionan alteraciones en la capa superficial del material pétreo, disgregando los minerales, degradando y erosionando la roca (figuras 5 y 6).

AGRADECIMIENTOS

La investigación se realizó con el apoyo financiero de Dirección de Investigación y Posgrado (DINPO), ahora Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP), de la Universidad de Guanajuato, con el proyecto 000073/11. Los autores agradecen el apoyo brindado por Brenda Denisse y Monika Sanz en el análisis biológico de hongos y cianobacterias. De igual manera, un gran agradecimiento a África Islas Robles y a la Dra. Gabriela Olmedo por su apoyo en dicho proyecto. Un especial agradecimiento a la M. en C. Ofelia Pérez Arvizu por la preparación y medición de las muestras analizadas en el laboratorio ultralimpio ICP-MS, de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Juriquilla, y a María del Rosario Gregorio Cipriano por las fotos tomadas en el laboratorio del Herbario de la Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

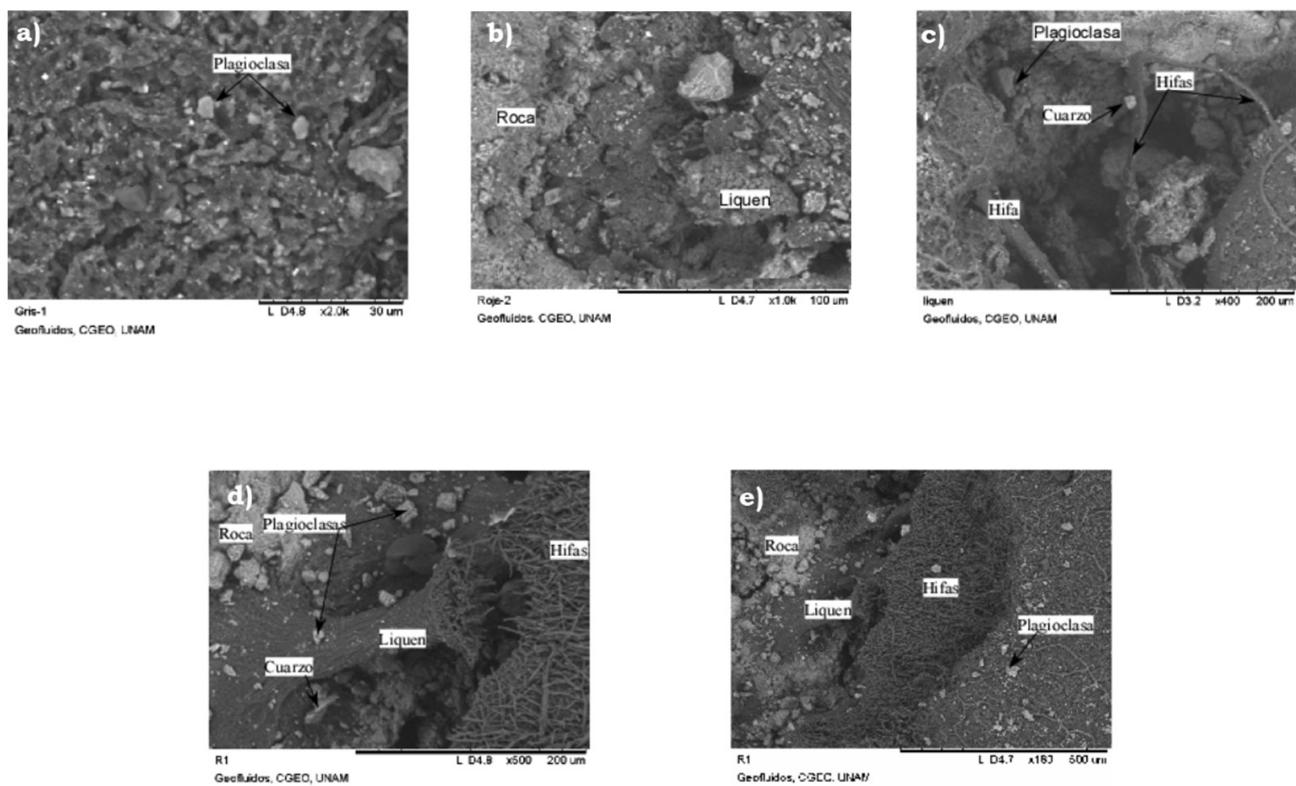


Figura 6. Fotografías de MEB interacción liquen-roca. a) *Aspicilia* sp., colonizando sobre el material pétreo, se observan plagioclásas levantadas por la acción de las hifas. b), *Caloplaca* aff. *brouardii*, erosionando el material pétreo, (c,d,e), *Xanthoparmelia tasmanica*, nótense las hifas penetrando al material pétreo, levantando partículas minerales como plagioclásas y cuarzo.

Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS

- Ascaso, C. (1984). Structural aspects of lichens invading their substrata. In C. Vicente, D. H. Brown & M. E., Legaz (Eds.). *Surface Physiology of Lichens*. Madrid: Universidad Complutense.
- Ascaso, C., Galván, J., & Rodríguez-Pascual, C. (1976). Studies on the pedogenetic action of Lichen acids. *Pedobiología*, 16, 321-332.
- Ascaso, C., Sancho, L. G., & Rodríguez-Pascual, C. (1990). The weathering action of saxicolous lichens in maritime Antarctica. *Polar Biology*, 11(1), 33-39.
- Ascaso, C., & Wierzchos, J. (1994). Structural aspects of the lichen–rock interface using back scattered electron imaging. *Botanica Acta*, 107(4), 251-256. doi: 10.1111/j.1438-8677.1994.tb00793.x
- Braams, J. (1992). *Ecological studies on the fungal microflora inhabiting historical sandstone monuments*. Oldenburg: University of Oldenburg.
- Chen, J., Blume, H. P., & Beyer, L. (2000). Weathering of rocks induced by lichen colonization — a review. *Catena*, 39(2), 121-146. doi: 10.1016/S0341-8162(99)00085-5
- Crisci, G. M., Gattuso, C., Macchione, M., & Miriello, M. (28-29 October 2005). Analisi dei meccanismi di degrado dei materiali calcarenitici dovuto all'azione dei licheni. *Proceedings of the Workshop: L'approccio multidisciplinare allo studio ed alla valorizzazione dei Beni Culturali* (pp. 187-197), Siracusa, Italy.
- De los Ríos, A., Wierzchos, J., Sancho, L. G., Green, T. G., & Ascaso, C. (2005). Ecology of endolithic lichens colonizing granite in continental Antarctica. *The Lichenologist*, 37, 1-13. doi: 10.1017/S0024282905014969
- Eckardt, F. E. W. (1985). Solubilization, transport and deposition of mineral cations by microorganisms. Efficient rock weathering agents. In J. L., Drever (Ed.), *The chemistry of weathering*. Dordrecht, Netherlands: Reidel Publishing Co.
- Eckardt, F. E. W. (1990). Zum Vorkommen und Verhalten von Mikroorganismen in Bausteinen und Putzen In E. Emmerling et al. (Eds.), *Konservierung und Restaurierung von verputzten Mauerwerken. S. Bayer. landesamt f* (pp. 161-173). Denkmalpflege, München. Reidel Publishing Company, Boston.
- Favero-Longoa, S. E., Gazzanoa, C., Girlandaa, M., Castellib, D., Tretiachc, M., Baiocchid, C., & Piervittoria, R. (2011). Physical and Chemical Deterioration of Silicate and Carbonate Rocks by Meristematic Microcolonial Fungi and Endolithic Lichens (Chaetothyriomycetidae). *Geomicrobiology Journal*, 28(8), 732-744. doi: 10.1080/01490451.2010.517696
- Galun, M., & Ronen, R. (1988). *CRC Handbook of lichenology*. Vol. III, Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Guglielmin, M., Favero-Longo, S. E., Cannone, N., Piervittori, R., & Strini, A. (2011). Role of lichens in granite weathering in cold and arid environments of continental Antarctica. *Geological Society, London, Special Publications*, 354(1), 195-204. doi: 10.1144/SP354.12
- Krumbein, W. E. (1972). Role des microorganismes dans la genese, la diagenèse et la dégradation des roches en places. *Revue d'écologie et de biologie du sol*, 9, 283-319.
- Krumbein, W. E. (1998). Mikrobenbefall und steinzerstörung autotroph oder heterotroph? Chemisch oder physikalisch? Strategies der verhinderung und behebung. Eine Bilanz 173-205. In R. Snethlage (Ed.), *Denkmalpflege und Naturwissenschaften natursteinkonservierung H. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart*.
- Lee, M. R., & Parsons, I. (1999). Biomechanical and biochemical weathering of lichenencrusted granite: textural controls on organic-mineral interactions and deposition of silica-rich layers. *Chemical Geology*, 161(4), 385-397. doi: 10.1016/S0009-2541(99)00117-5
- Lewis, F. J., May, E., & Bravery, A.F. (1988). Metabolic activities of bacteria isolated from building stone and their relationship to stone decay. *Biodeterioration*, 7, 107-112. doi: 10.1007/978-94-009-1363-9_13
- McIlroy de la Rosa, J. P., Warke, P.A., & Smith, B. J. (2014). The effects of lichen cover upon the rate of solutional weathering of limestone. *Geomorphology*, 220, 81-92. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.05.030
- Nash III, T. H., Gries, C., & Bungartz, F. (2007). *Lichen Flora of the Greater Sonoran Desert Region*, vol.III. Lichen Unlimited (567 pp.), Tempe, Arizona, U.S.A.: Arizona State University.
- Nash III, T. H., Ryan, B. D., Diederich, P., Gries, C., & Bungartz, F. (2004). *Lichen Flora of the Greater Sonoran Desert Region*, vol. II. Lichen Unlimited (742 pp.) Tempe, Arizona, USA: Arizona State University.
- Norma UNE-EN 1925:1999. "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad".
- Norma UNE-EN 1926:2006. "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión".
- Norma UNE-EN 1936:2006. "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total".
- Palinska, K. A., & Krumbein, W. E. (1998). Patterns of growth in coccoid, aggregate forming cyanobacteria. *Annales Botanici Fennici*, 35(3), 219-227.
- Piervittori, R., Favero-Longo, S. E., & Gazzano, C. (2009). Lichens and biodeterioration of stonework: a review. *Chemistry Today*, 27(6), 8-11.
- Puy Alquiza, M. J., Miranda-Avilés, R., Salazar, Ma del C., Vega, M., & Cervantes, J. (2013). Characterization petrophysical of the Losero Formation in the historical architecture of the Guanajuato city, Mexico. *Revista Ingeniería Investigación y tecnología*, XIV(2), 191-205.
- Scarciglia, F., Saporto, N., La Russa, M. F., Le Pera, E., Macchione, M., Puntillo D., Crisci, G. M., & Pezzino, A. (2012). Role of lichens in weathering of granodiorite in the Sila uplands (Calabria, southern Italy). *Sedimentary Geology*, 280, 119-134. doi: 10.1016/j.sedgeo.2012.05.018

- Warscheid, T., & Braams, J. (2000). Biodeterioration of stone: a review. *International biodeterioration, and biodegradation*, 46(4), 343-363. doi: 10.1016/S0964-8305(00)00109-8
- Warscheid, T., & Krumbein, W. E. (1994). Biodeteriorationsprozesse an anorganischen Werkstoffen und mögliche Gegenmaßnahmen. *Werkstoffe und Korrosion*, 45(2), 105-113. doi: 10.1002/maco.19940450207
- Warscheid, T., Oetling, M., & Kumbrein, W. E. (1991). Physico-chemical aspects of biodeterioration processes on rocks with special regard to organic pollutants. *International Biodeterioration*, 28(1-4), 37-48. doi: 10.1016/0265-3036(91)90032-M
- Warscheid, T., Petersen, K., & Krumbein, W. (1988). Effect of cleaning on the distribution of microorganisms on rock surfaces. En D. Houghton, R. Smith & H. O. W. Eggins (Eds), *Biodeterioration*. New York, USA: Elsevier.
- Wierzchos, J., & Ascaso, C. (1994). Application of back-scattered electron imaging to the study of the lichen-rock interface. *Journal of Microscopy*, 175(Pt 1), 54-59.
- Wierzchos, J., & Ascaso, C. (1996). Morphological and chemical features of bioweathered granitic biotite induced by lichen activity. *Clays and Clay Minerals*, 44(5), 652-657. doi: 10.1346/CCMN.1996.0440507