

## **Biodeterioro de la fuente de Lavapatas, parque arqueológico de San Agustín-Huila. Colombia**

Luz Stella Villalba Corredor MSc. y Andrés Malagón Forero

**Resumen:** El parque arqueológico de San Agustín-Huila (Colombia) declarado por la UNESCO en 1985 como patrimonio de la humanidad, es un lugar mágico con estructuras funerarias, elementos escultóricos (guardines) e íconos para la comunidad de la región, como la Fuente de Lavapatas (300m<sup>2</sup>) descubierta en 1937. El lugar es testimonio de la ingeniería de los escultores precolombinos para tallar la roca (figuras en formas humanas y animales) y obtener el complejo laberinto de canales hídricos que la caracteriza. La Fuente ha sido motivo de proyectos de conservación interdisciplinarios para garantizar su salvaguarda, enfocando los esfuerzos a establecer mecanismos de deterioro por factores como el agua, el medioambiente, la intemperie y el biodeterioro. En el marco del Programa Integral de Conservación para el parque, la presente investigación permitió identificar los principales agentes de biodeterioro, mecanismos de acción e indicadores sobre la roca de la fuente, apoyando la búsqueda certera de medidas de mitigación del impacto biológico.

**Palabra clave:** Biodeterioro, microscopia electrónica de barrido, biofilms.

### **Biodeterioração da fonte de Lavapatas, parque arqueológico de San Agustín-Huila. Colômbia.**

**Resumo:** O parque arqueológico de San Agustín-Huila (Colômbia), declarado pela UNESCO em 1985 como patrimônio da Humanidade, é um lugar mágico com estruturas funerárias, elementos escultóricos (guardas) e ícones para a comunidade da região, como a Fonte de Lavapatas (300m<sup>2</sup>), descoberta em 1937. Este lugar é um testemunho da engenharia dos escultores pré-colombianos para tallar a pedra (figuras com formas humanas e animais) e para obter o complexo labirinto de canais hídricos que a caracteriza. A Fonte foi objecto de projectos interdisciplinares de conservação a fim de garantir a sua salvaguarda, centrando-se na identificação dos mecanismos de deterioração causados por factores como a água, o meio ambiente e a biodeterioração. Ao abrigo do Programa Integral de Conservação para o parque, a presente investigação conseguiu identificar os principais agentes de biodeterioração, os seus mecanismos de acção e a sua aparência física nas rochas, contribuindo para a procura de medidas adequadas de conservação para reduzir o impacto da biodeterioração.

**Palavras chave:** Biodeterioração, microscopia electrónica de varrimento, biofilmes.

### **Biodeterioration of the Lavapatas' fountain, archaeological park of San Agustín-Huila. Colombia.**

**Abstract:** The San Agustín Archaeological Park (Department of Huila – Colombia), declared a World Heritage Site by UNESCO in 1985, is a magical place filled with funerary structures, sculptures (guardians) and icons related to the region and communities that inhabit it. Such as the Fountain of Lavapatas(300m<sup>2</sup>), discovered in 1937. This site is living testimony of the techniques of engineering used by pre-Columbian rock sculptors to create figures with human and animal form, and achieve the complex labyrinth of canals that characterize it. Several interdisciplinary conservation projects have been carried out on the fountain to guarantee its preservation, focusing efforts on identifying types of deterioration caused by the presence of water, the outdoor climate, and biological degradation. This research project, which falls within the Program for the Integral Conservation of the Fountain, allowed the identification of the most important types of biodegradation, their mechanisms and physical appearance on the rocks, contributing to the search of conservation measures that will reduce the impact of deterioration.

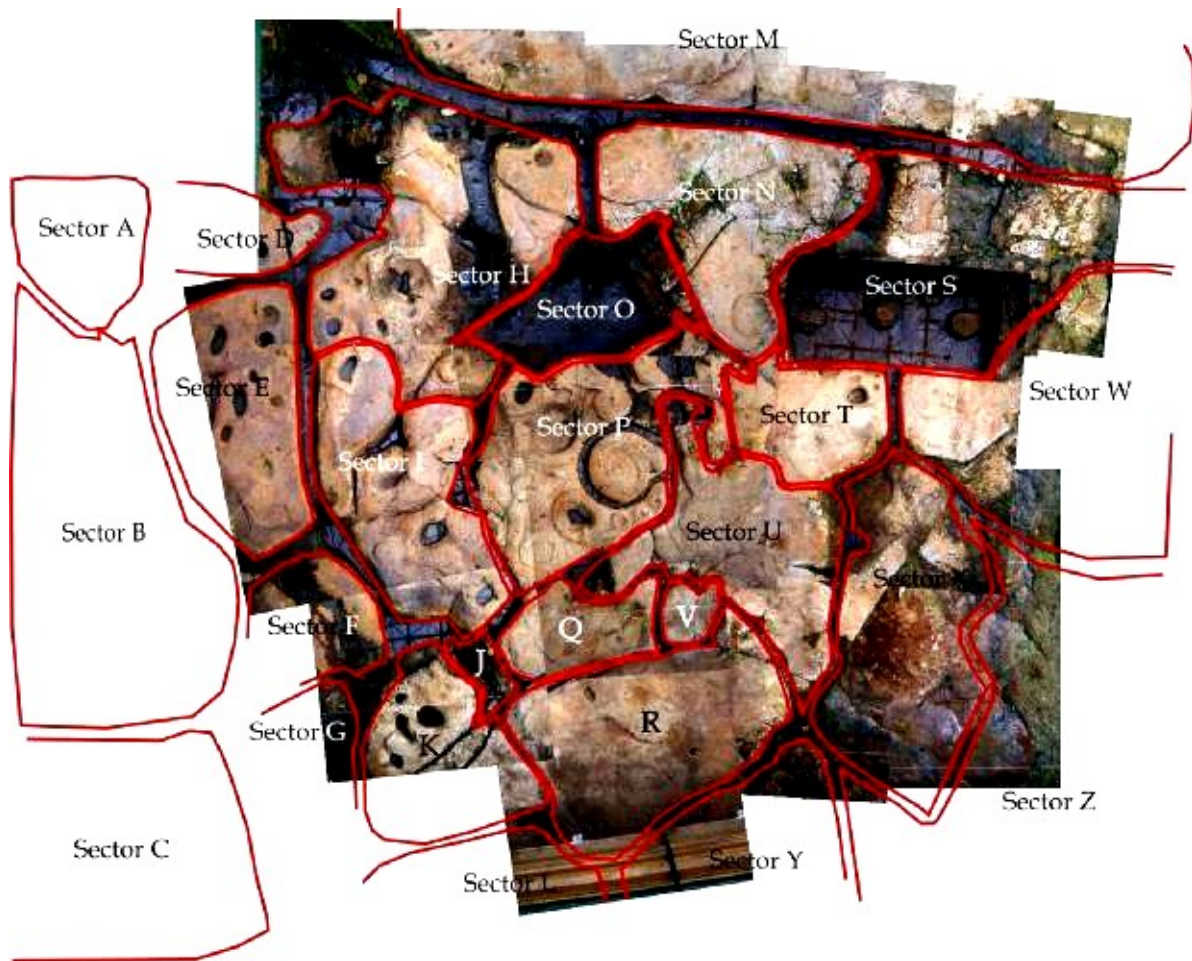
**Keywords:** Biodeterioration, scanning electron microscope, biofilms.

## Materiales y Métodos

### 1. Macroorganismos

#### 1.1 Líquenes, musgos, hepáticas, selaginellas

La colecta de organismos se realizó por sectores, según el esquema realizado por el grupo de conservación del Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH), utilizando metodología de campo del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia [figura 1]. Los especímenes fueron llevados al Herbario de la misma institución para su identificación por claves taxonómicas.



**Figura 1.** Sectorización de la Fuente del Lavapatas Parque Arqueológico de San Agustín – Huila, permitió el análisis en campo de los diferentes deterioros (Álvarez 2008).

## 1.2 Componente algal

### a. Fase de campo

Se seleccionaron diez puntos críticos con indicadores de biodeterioro como costras ó pátinas negras y desprendimientos en canales y roca expuesta. Las muestras se tomaron asépticamente con espátula (área estándar de 6.379 cm<sup>2</sup>) en diferentes medios de conservación y colecta [tabla 1a y 1b]:

- (i) Caldo Bristol: Se incubó por un mes a temperatura ambiente y luz constante.
- (ii) Agua de la fuente más Lugol concentrado. El reactivo evitó la contaminación por bacterias y facilitó la precipitación de las algas para su conteo.
- (iii) Solución *transeau*: Agua de la fuente, alcohol al 96% y formol, en proporción 6:3:1. Esta solución permitió conservar la morfología de las distintas especies de algas.

**Tabla 1a.** Relación de sectores seleccionados para las muestras de microalgas y código para su procesamiento en laboratorio. Medio de conservación: *transeau*

Sector	Muestra	Descripción
canal M	1	Alga negra mucilaginoso
canal M	2	Alga parda mucilaginoso
S	3	Negra adherida al soporte
Pozo S	4	Filamentosa pequeña
T	5	Filamentosa grande
Pozeta L	6	Globosa flotante
Pared A	7	Foliosa
N	8	Alga Parda
S canal	9	Alga negra mucilaginoso
T	10	Alga Filamentosa

**Tabla 1b.** Relación de sectores seleccionados para las muestras de microalgas y código para su procesamiento en laboratorio. Caldo *Bristol*

Sector	Muestra	Descripción
canal M	11	Alga verde polvorienta sobre soporte
canal M	12	Alga naranja polvorienta sobre soporte
S	13	Negra adherida al soporte
Ardilla S	14	Verde adherida al soporte
Hombrecito S	15	Verde adherida al soporte
Canal Z	16	Filamentosa
O	17	Alga ladrillo sobre soporte
N	18	Alga Parda
Canal sector W	19	Alga Filamentosa
sector W	20	Negra mucilaginosa

## b. Fase de laboratorio

### Conteo

Las muestras conservadas con lugol se llevaron a cámaras *Utermöhl* de sedimentación por 24 horas y el conteo se realizó en microscopio invertido 40x *Olympus*, siguiendo el método propuesto por *Lud et al., 1958*.

### Identificación (muestras preservadas en *transeau*)

La identificación de las microalgas se realizó en microscopio óptico *Olympus* (40x y 100x) y se utilizaron las claves taxonómicas de Bicudo y Menezes (2006), Cox, (1996) y Whitford and Schumacher (1968). Para el análisis se considero cada muestra como una comunidad, dadas las características macroscópicas de composición en abundancia y de diversidad de especies. Se elaboraron histogramas de frecuencia por muestra para establecer especies y divisiones taxonómicas.

### 1.3 Microorganismos asociados

Para el asilamiento e identificación de bacterias aerobias totales, hongos filamentosos, bacterias sulfato-reductoras, nitrificantes, coliformes totales y fecales, se seleccionaron siete puntos críticos con indicadores como crecimientos miceliales, pátinas negras y/o café [tabla 2].

**Tabla 2.** Sectores de toma de muestras para microorganismos asociados. Toma de muestras realizada por hisopados y raspados.

Sector	Muestra	Descripción
S	21	Pátina café parte superior ardilla
V	22	Hisopado parte superior de la roca, Pátina negra
X	23	Raspado parte superior de la roca , Pátina negra
O	24	Hisopado parte superior de la roca, Pátina café
R	25	Hisopado parte superior de la roca , crecimiento micelial
I	26	Hisopado parte superior de la roca, crecimiento micelial

Los recuentos totales y diferenciales de las diferentes poblaciones de bacterias y hongos filamentosos, se realizaron por siembra en superficie por dilución en medios de cultivo específicos para cada grupo microbiano. Para las bacterias aerobias heterótrofas se utilizó agar nutritivo e incubación a temperatura ambiente durante 48 horas. Para hongos filamentosos se empleó el agar Rosa de Bengala suplementado con cloranfenicol e incubación a temperatura ambiente por cinco días. La identificación hasta género de las colonias fúngicas se realizó por claves taxonómicas de Barnett y Hunter (1975) y Domsch *et al.*, (1980).

En cuanto a las bacterias nitrificantes se empleó la técnica de Número Más Probable: NMP en caldo para nitrificantes con series de 3 tubos por dilución (tres diluciones por muestra). Se dejaron en incubación por 30 días a 28°C, luego se le adicionó a cada tubo 0.5mL de cada uno de los reactivos de Nessler, tomándose como tubos positivos los que presentaban cambio del medio translucido a rosado.

Para el NMP de bacterias sulfatoreductoras, se empleó el medio API, este medio posee un indicador de oxígeno, la resazurina, para evidenciar las condiciones de anaerobiosis de los tubos inoculados. Los tubos se colocaron dentro de una jarra de anaerobiosis con su respectivo generador y el indicador. Se llevaron a incubación a 28°C, durante 30 días. Se tomaron como tubos positivos los que presentaban la formación de un precipitado de color negro por el H<sub>2</sub>S y cambio del indicador de anaerobiosis de rosado a translucido.

Para la determinación de Coliformes totales, fecales y *E. coli*, se empleó la técnica de siembra en superficie en medios específicos cromogénicos, incubación aeróbica y variación de temperatura a 37°C.

## 2. Microscopia electrónica de barrido (SEM) y EDAX.

Con el fin de obtener información sobre los *biofilms* y procesos de biodeterioro se realizaron observaciones del material con microscopio electrónico de barrido (SEM) y se realizaron análisis EDAX que permiten la determinación semicuantitativa de los materiales. Los análisis se efectuaron a partir de pequeños fragmentos (1mm a 5mm) de los diferentes sectores de la roca con indicadores de biodeterioro (laboratorio de microscopia electrónica del departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia).

## Resultados y Discusión

### Líquenes, musgos, hepáticas, selaginellas

En la [tabla 3] se indican los organismos encontrados. La flora líquénica fue imposible de identificar, pues debía realizarse un análisis destructivo del material para desprender el organismo unido fuertemente al sustrato, y observar así, las estructuras vegetativas y reproductivas.

**Tabla 3.** Flora líquénica y muscicola identificada como organismos deteriorantes de la Fuente de Lavapatas-San Agustín.

<i>Líquenes</i>	<i>Hepáticas</i>	<i>Selaginellas</i>	<i>Musgos</i>	<i>Plantúlas</i>
Liquen rosado-sp1	<i>Marchantia chenopoda</i>	sp1	<i>Brachythecium stereopoma</i>	<i>Hyptis atrorubens</i> (Flia Lamiaceae)
Liquen Verde- sp2	<i>Marchantia polymorpha</i>	sp2	<i>Hyophila involuta</i>	<i>Eleocharis cf</i> (Flia Cyperaceae)
Liquen blanco-sp3	<i>Megaceros sp</i>	sp3	<i>Bryum capillare</i>	<i>Oplismenus burmannii</i> (Flia Poaceae)
Liquen naranja-Ocre- sp4	<i>Frullania sphaerocephala</i>	sp4	<i>Bryum densifolium</i>	<i>Gomochaeta americana</i> (Flia Asteraceae)
Liquen vinotinto-sp5		sp5	<i>Pseudosymblepbaris schimperiana</i>	<i>Paspalum cf notatum</i> (Flia Poaceae)
Liquen Fucsia- sp6-		sp6	<i>sematophyllum galipense</i>	<i>Pseudoelephantopus sp</i> (Flia Asteraceae)
			<i>Didymodon rigidulus</i>	<i>Youngia cf. Japonica</i> (Flia Asteraceae)
				Flia Cyperaceae

Los líquenes encontrados son saxícolas por su crecimiento en rocas y minerales, principalmente endolíticos, a pesar de su lento desarrollo posibilitan la acumulación de polvo atmosférico y partículas minerales desprendidas del sustrato rocoso, que junto con los fragmentos de líquenes muertos llegan a formar un suelo sencillo primitivo o litomórfico, que se pudo observar en algunas zonas de la fuente, principalmente en el sector M y parte del N, esto sirve de punto para el arraigo de plantas vasculares pequeñas, musgos y hepáticas entre otras (Forero 1986).

El mecanismo de acción sobre el material rocoso esta dado por los ácidos, metabolitos secundarios, los cuales son agentes primarios de degradación. Los ácidos son parcialmente solubles en agua permitiendo la disolución de los iones metálicos de la roca, que de esta forma se esta desintegrando en pequeñas partículas que se van acumulando como parte del suelo (Valencia y Aguirre 2002). Como se evidenció con la Microscopía Electrónica de Barrido, la penetración de las rizinas en las fisuras de la roca y la expansión y contracción de las mismas, en conjunción con la naturaleza física de la toba, han facilitado la desintegración mecánica del sustrato.

**Componente algal**

De acuerdo con los resultados de las muestras procesadas, se pudo inferir que el componente algal es una comunidad de organismos de las divisiones taxonómicas: **Chlorophyta, Cyanophyta, Bacilliarophyta** y **Euglenophyta**. En la [tabla 4], se relacionan los principales géneros.

**Tabla 4.** Géneros de Microalgas encontradas como agentes de biodeterioro en la Fuente del lavapatatas.

Microalgas muestra 1	Microalgas muestra 3	Microalgas muestra 4	Microalgas muestra 6	Microalgas muestra 7	Microalgas muestra 9	Microalgas muestra 10
<i>Cymbella</i>	<i>Navicula</i>	<i>Achnanthes</i>	<i>Cymbella</i>	<i>Stichosiphon</i>	<i>Achnantes</i>	<i>Achnanthes</i>
<i>Anabaena</i>	<i>Chlorococcus</i>	<i>Achnantidium</i>	<i>aviculaceae</i>	<i>Anabaena</i>	<i>Cymbella</i>	<i>Achnantidium</i>
<i>Nitzschia</i>	<i>Botryococcus</i>	<i>Cymbella</i>	<i>Gomphonema sp.</i>	<i>Botryococcus</i>	<i>Achnantidium</i>	<i>Spirogyra</i>
<i>Frustulia</i>	<i>Anabaena</i>	<i>Frustulia</i>	<i>Merismopedia</i>	Morfo 2	<i>Botryococcus</i>	<i>Gomphonema truncatum</i>
<i>Achnantidium</i>	<i>Achnanthes</i>	<i>Spirogyra</i>	<i>Geitlerinema</i>	<i>Achnanthes</i>	Morfo 3	<i>Synedra Unla</i>
Naviculaceae 2	<i>Achnantidium</i>	<i>Nitzschia</i>	<i>Anabaena sp.</i>	<i>Frustulia</i>	<i>Frustulia</i>	<i>Placoneis</i>
Morfo 1	<i>Stichosiphon</i>	<i>Anabaena</i>	<i>Oscillatoria</i>	<i>Gomphonema</i>	<i>Anabaena</i>	<i>Nitzschia</i>
<i>Gomphonema</i>	<i>Nitzschia</i>	<i>Chlorococcus</i>	<i>Nitzschia</i>	<i>Achnantidium</i>	<i>Navicula</i>	<i>Navicula</i>
<i>Synedra unla</i>	Morfo 1	<i>Gomphonema</i>	<i>Gomphonema</i>	<i>Selenastrum</i>	<i>Nitzschia</i>	Morfo 3
<i>Pinnularia</i>	<i>Cymbella</i>	Morfo 1	<i>Chlorococcus</i>	<i>Spirogyra</i>	<i>Pinnularia</i>	Morfo 1
<i>Tabellaria</i>	<i>Pinnularia</i>	<i>Selenastrum</i>	<i>Selenastrum westii</i>	<i>Cymbella</i>	<i>Oscillatoria</i>	<i>Gomphonema</i>
Naviculaceae 1	<i>Euglena</i>		<i>Spirogyra</i>		<i>Chlorococcus</i>	<i>Cymbella</i>
<i>Achnantes</i>	<i>Frustulia</i>		<i>Coelastrum microporum</i>		<i>Synedra unla</i>	
<i>Mycrocistis</i>	<i>Trachelomonas hispida</i>		<i>Pinnularia</i>		<i>Gomphonema truncatum</i>	
<i>Diatoma</i>			<i>Nitzschia sublinearis</i>		<i>Synedra acus</i>	
<i>Selenastrum</i>			<i>Neidium</i>		<i>Nitzschia homburgensis</i>	
			<i>Coelastrum cambricum</i>		<i>Gomphonema</i>	
					<i>Coconeis</i>	
					<i>Nitzschia virgata</i>	

De las divisiones encontradas se puede mencionar:

a. División **Cyanophyta**

Son el grupo de bacterias fotosintéticas o cianobacterias que producen oxígeno. Son organismos muy antiguos, con capacidad para fijar nitrógeno de la atmósfera y se les considera las responsables de la fertilidad de suelos (Komárek 2003). Este grupo de organismos presenta tres formas de crecimiento: unicelulares, coloniales y filamentosas, la más común encontrada fue la organización colonial dada por matrices de polisacáridos (Valencia 2002). En esta división encontramos **Microcystis, Nostoc, Anabaena y Oscillatoria** entre otras.

b. División *Euglenophyta*

La mayor parte de estos individuos son unicelulares y flagelados, algo importante de destacar es su presencia en aguas ricas en materia orgánica (Rosowski 2003), como es el caso del agua de la fuente.

c. División *Bacilliarophyta*

Clase: Bacilarioficeas a este grupo pertenecen las diatomeas, estos organismos ampliamente distribuidos en aguas dulces y saladas, constituyen significativamente el mayor componente encontrado en los puntos de toma de muestras, por otra parte contribuyen a la productividad de los ecosistemas y forman la base de la cadena alimenticia (Kingston 2003). A nivel morfológico son principalmente unicelulares, aunque pueden formar colonias. La característica más importante es su pared celular incrustada de óxido de silicio, la cual permanece inalterada aún después de la muerte celular, se acumulan y forman la denominada tierra de diatomeas. Estos depósitos se usan comercialmente (pulimento de metales, pasta de dientes, entre otras). Según los análisis de las siete muestras cinco presentan en su mayoría predominancia de algas pertenecientes a esta Clase, se encontraron de simetría bilateral como *Gomphonema*, *Cymbella*, *Navícula*, *Pinnularia*, *Nitzschia* y radial (Parra *et al.* 1982-1983; Molen *et al.* 1980).

d. División *Chlorophyta*

Este grupo de organismos pertenece al reino plantas, incluye formas unicelulares, multicelulares, móviles e inmóviles, filamentosas entre otras. Respecto a su metabolismo, pigmentos y estructura guardan semejanza con las plantas verdes *Spirogyra*. Este género es cosmopolita y ocurre, por lo general, en aguas de escorrentía atado a un sustrato (Gerrath 2003), en este caso, en la roca de la Fuente Ceremonial del Lavapatatas.

La problemática de las algas sobre el material rocoso de la Fuente Ceremonial del Lavapatatas se puede agrupar en dos manifestaciones o indicadores:

(1). **Deterioro estético:** Proliferación de costras ó pátinas de color negro y manchas de color verde, que varían en grosor y adhesión al soporte. Es común observar tres tipos de indicadores en los canales de distribución del agua y en las superficies expuestas al agua, alga negra o verde mucilaginoso, pátina negra-verde adherida al soporte y mucílago pardo.

De acuerdo con los análisis efectuados, la pátina negra mucilaginoso y la adherida al soporte son grupos de individuos que viven en comunidades complejas o *Biofilms*, los cuales se adhieren al soporte y forman avanzados micro ecosistemas en una matriz representando sistemas altamente organizados (Roldán, *et al.* 2006). Tal organización juega un papel importante en la producción y degradación de materia orgánica, ciclo del nitrógeno, oxígeno y fermentación. Es importante mencionar que la formación de *biofilms* ha sido descrita por varios autores como una estrategia de supervivencia al ambiente e incluso a productos de desinfección o saneamiento dada por la matriz que es una mezcla de sustancias poliméricas y proteínas (Davey, ME and Toole 2000).

Por otra parte, las costras oscuras producidas por la mineralización parcial de la clorofila de cianobacterias y algas verdes aceleran el proceso de estrés físico de la piedra por incremento de su capacidad calorífica específica, alteración de su coeficiente de expansión hidrotérmico y su capacidad de absorción de humedad (Videla y Herrera 2002).

La estructura mucilaginoso pardo no es un alga o sistema algal como los anteriores, si no obedece a materia orgánica, la cual puede provenir de los exudados o material de desecho de las diversas comunidades y del continuo proceso de recirculación del agua de la fuente que ocasiona procesos de fermentación.



(2). **Deterioro físico-químico** es producido cuando las algas absorben el agua la retienen por un tiempo prolongado, manteniendo la superficie del sustrato saturado originando disolución de materiales superficiales. Así mismo, la producción metabólica de ácidos orgánicos e inorgánicos conduce a una biolixiviación de los elementos constitutivos del soporte, provocando el debilitamiento del soporte (acidólisis) (Torres 1993). Estos organismos fototróficos derivan su energía para el crecimiento de la luz y su carbono orgánico, nitrógeno, fósforo, sales y CO<sub>2</sub> disuelto, los obtienen de la humedad de la roca y del aire.

Las diatomeas se desarrollan preferentemente en ambientes hídricos, como el caso de la fuente. De acuerdo con las especies encontradas como habitantes habituales de la fuente, y dada su relación con el sustrato pueden dividirse en epilíticas que crece en la superficie y endolíticas que colonizan en profundidad. Las costras o patinas que se aprecian en los canales y áreas expuestas a la luz y agua como el sector S, L y O son debidas a las algas epilíticas.

### ***Microorganismos asociados***

El deterioro de la piedra por microorganismos es uno de los más interesantes aspectos de aplicación de los estudios microbiológicos, que incluye lesiones no detectables con formación de fisuras capilares y microfisuras por las reacciones químicas, terminando al pasar de los años con la decohesión de los materiales (UNESCO 1982).

Como resultados del procesamiento de las muestras para los diversos grupos de organismos, fue evidente la presencia de bacterias totales heterótrofas, hongos filamentosos, coliformes totales en los sectores S, V, X y R, coliformes fecales en los sectores S, R y L, bacterias sulfato reductoras sector S y bacterias nitrificantes en todos los sectores evaluados.

A continuación se describen los grupos de organismos relevantes y su relación con el proceso de deterioro del soporte:

#### **a. Bacterias sulfato reductoras ó sulfúricas**

El mecanismo de acción de este grupo esta relacionado con la presencia de azufre en el material en forma de compuestos reducidos u oxidados. Los compuestos de azufre reducido se infiltran desde el suelo y penetran hacia la parte alta de la roca donde están las superficies húmedas (sector X) y las bacterias aerobias del tipo *Thiobacillus* las cuales oxidan los compuestos de azufre, previamente reducidos en ácido sulfúrico y sulfatos. Este género puede producir hasta 5% de este ácido el cual incrementa el proceso de deterioro del material (Videla y Herrera 2002).

#### **b. Bacterias nitrificantes o nitrobacterias**

Son bacterias aerobias que encuentran al parecer en el sustrato rocoso las condiciones favorables, como se evidencio en los cultivos positivos de todas las muestras analizadas. Estos organismos oxidan el amoniaco proveniente del agua lluvia, polvo, hollín, excrementos de pájaros, convirtiéndolo en ácido nitroso y nítrico (Martinez 2002). El indicador característico de la acción destructiva de este grupo es la degradación de la superficie de la piedra que pasa de porosa a casi polvo de color amarillo muy claro, típico en ambientes con aguas estancadas.

#### **c. Hongos filamentosos**

El desarrollo de los hongos en la superficie de la piedra exige un rango de humedad de 50 a 98%, así mismo la proliferación de hongos puede ser debida al pH, pues estos microorganismos son tolerantes a

bajos pH, aunado a esto están los procesos de acidólisis y el ambiente ácido producto de las bacterias sulfatoreductoras y nitrificantes.

Por otra parte los residuos orgánicos de las diferentes poblaciones de organismos como los restos de cianobacterias. Su mecanismo de acción sobre el soporte es una acción bioquímica debida a la producción de ácidos orgánicos como el cítrico, oxálico, glucónico, láctico y fumárico, los cuales forman agentes quelantes que disuelven el sustrato. En el trabajo se aislaron miembros del género *Aspergillus* y *Penicillium* los cuales son reconocidos por su producción de oxálico. Igualmente, algunos de los hongos producen melaninas que en ocasiones pueden manchar el soporte y producen un deterioro mecánico pues su hifas al penetran lentamente el soporte generan microfisuras en el material. Dos factores juegan un papel importante en el deterioro físico-mecánico: la presión de crecimiento causada por efectos osmóticos internos y la presión de resistencia de las estructuras microbianas dentro de las cavidades (Dornieden and Gorbushina 2000).

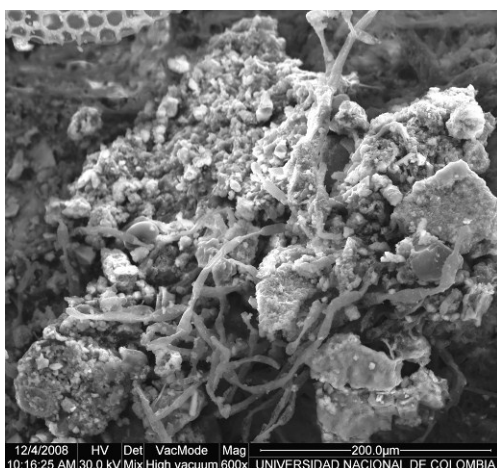
#### **d. Coliformes totales y fecales**

Los coliformes son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo a los humanos. En general, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo. Por su amplia diversidad el grupo coliformes ha sido dividido en dos: coliformes totales y coliformes fecales.

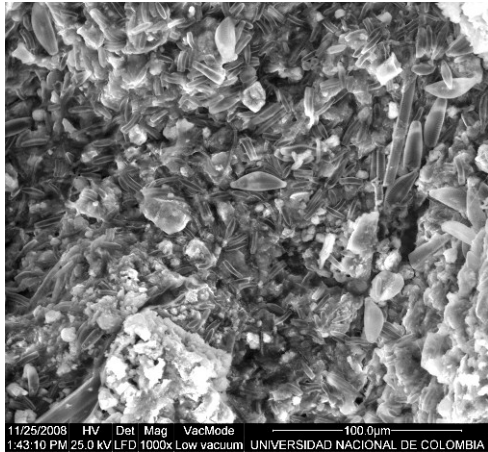
La presencia de este grupo confirmó la contaminación del agua de la fuente por aguas negras u otro tipo de desecho de origen humano u animal (coliformes fecales), de manera que deben realizarse análisis en los puntos de distribución del agua hasta la fuente y en el tanque de abastecimiento para establecer un plan de seguimiento y control para estos contaminantes. A sí mismo, contribuyen significativamente al deterioro del material por su metabolismo fermentativo y producción de ácidos mixtos como el propiónico, succínico y láctico, favoreciendo el establecimiento y desarrollo de otras comunidades de organismos, como los hongos.

#### ***Microscopia electrónica de barrido y EDAX***

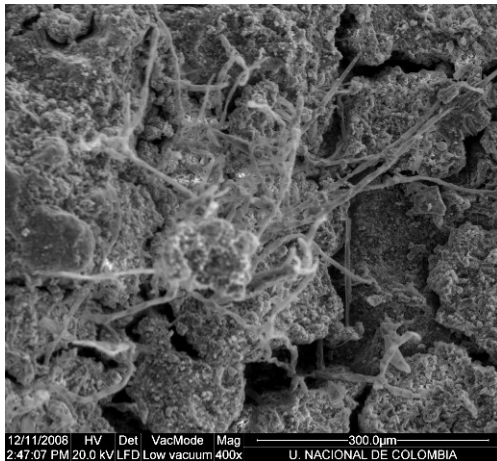
A continuación se presentan microfotografías que confirman el proceso de biodeterioro del material rocoso y espectros EDAX.



**Figura 2.** Rizinas del líquen adheridas e incrustadas al soporte, ocasionando deterioro mecánico en la roca. Así mismo crecen en las cavidades y producen microfisuras.



**Figura 3.** Pátina negra sector M. Se observa claramente el biofilms constituido de microalgas de la división *Bacilliarophyta* y *Cyanophyta*, incrustadas en la matriz mineral.



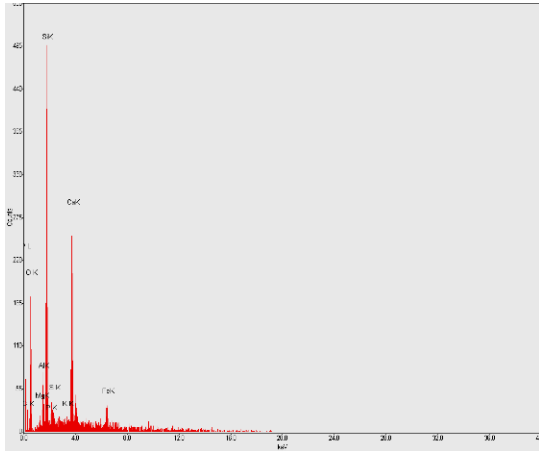
**Figura 4.** Sector X. Liqen crustáceo, se aprecia la penetración de las rizinas y formación de fisuras en la roca.



**Figura 5.** Sector O. Microalga Diatomea. Se observa la cristalización de la roca.

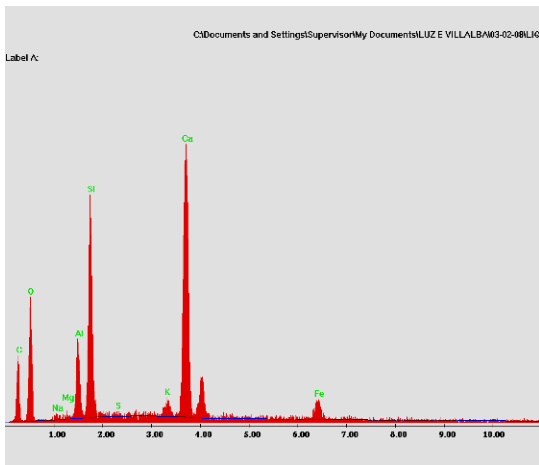
## ESPECTROS EDAX

### Espectro A



El espectro A fue tomado en la muestra de la patina negra (microalgas) del Sector S, se observa un alto porcentaje de silicio y calcio.

### Espectro B



En el espectro B fue tomado en la muestra del líquen crustáceo del Sector X, se observa un alto porcentaje de calcio seguido de silicio.

Los resultados anteriores corroboran el proceso activo de biodeterioro sobre la roca, por microalgas y líquenes crustáceos. En el caso de las áreas con presencia de líquenes se aprecia alto porcentaje de calcio, mientras que en las pátinas algales se observa mayor cantidad de silicio. Lo anterior corrobora la alteración del material rocoso por acción biológica. Así mismo la liberación de iones sodio, potasio, calcio, magnesio y aluminio, pueden ser usados como indicadores de deterioro de material pétreo (Videla 2002; Warscheid y Braams 2000).

## Conclusiones

De acuerdo con el estudio anterior el debilitamiento y deterioro de la roca de la fuente ceremonial del lavapatas esta determinado entre otros factores, por la acción del componente biológico aunado a procesos de degradación inducidos por las condiciones ambientales.

Igualmente la bioreceptividad de la roca dada por su estructura y composición química ha facilitado la colonización y desarrollo permanente de diversos grupos biológicos. Así mismo se ha demostrado que la actividad biológica mediada por las condiciones ambientales es el factor más importante en la aceleración del deterioro de la piedra (Lugauskas *et al.* 2004).

De tal manera que la fuente exhibe desarrollo de típicos *biofilms* los cuales se han establecido en diferentes periodos a velocidades diferentes y que son el resultado de interacciones entre el la roca y sus compuestos, los organismos y la atmósfera, y podríamos hablar de estratos de colonización según la relación de las diversas comunidades con el ambiente, como es el caso de los hongos encontrados en la superficie de la roca expuesta. Es importante conocer las sucesiones ecológicas que posiblemente se han establecido en el material rocoso de la fuente.

De acuerdo con los resultados los colonizadores primarios son los organismos fotosintéticos los cuales enriquecen el sustrato con biomasa y compuestos orgánicos e inorgánicos, estos organismos son epilíticofotótrofos es decir crecen en la superficie del soporte, luego están los líquenes llamados endolíticofotótrofos los cuales con sus rizinas penetran algunos milímetros la roca. La acumulación de la biomasa de organismos fotótrofos en la superficie de la roca es un excelente nutriente para flora heterótrofa como hongos, bacterias y coliformes.

Las condiciones de un ambiente externo a la intemperie como es la fuente, generan un stress permanente en el material y en las comunidades microbianas, desarrollándose fenotipos tolerantes que producen pigmentos como la melanina y micosporinas que los protege de los rayos luz uv del sol y desecación. Los pigmentos de los organismos que ocasionan las patinas sobre la fuente protegen la matriz de los biofilms de las condiciones adversas del medio.

Entender el complejo ecosistema microbiano que causa el biodeterioro de la roca de la fuente es un prerrequisito para controlar efectivamente su desarrollo y colonización. Definitivamente el agua es un factor catalizador del proceso de degradación, que de alguna manera hace parte de ciclo evolutivo de las rocas, de tal manera que debe estudiarse interdisciplinariamente si se elimina o reduce el flujo de agua.

En el contexto anterior, según los organismos identificados líquenes, microalgas, hepáticas, bacterias aerobias y hongos filamentosos se plantea para la segunda fase de este proyecto, evaluar los productos biocidas comerciales: Rocima 363, Kathon LX 1.5%, Preventol WB L-A, Rocima 622, Preventol CD 601 para controlar el proceso de deterioro biológico de la fuente. La fase II de control contempla trabajo conjunto con el equipo de restauración para establecer esquema de aplicación y seguimiento, método de limpieza y consolidación de la roca de la fuente, en el marco del programa de conservación y plan de manejo del Parque Arqueológico.

Por otra parte es importante, al momento de pensar en los productos consolidantes evaluar o verificar que estos no sean fácilmente degradados por microorganismos, pues en los últimos años se ha reportado la bioreceptividad de estos compuestos utilizados en restauración de piedra (Cappitelli *et al.* 2007). La acción sobre los polímeros es posible especialmente en ambientes con un elevado porcentaje de humedad relativa.

Debe considerarse además de los procesos de limpieza y del tratamiento para eliminar los organismos deteriorantes, el método para remover las manchas (melanina, clorofila) producto de los metabolitos y restos de organismos muertos.

Finalmente, el haber utilizado herramientas como la Microscopia Electrónica de Barrido y análisis EDAX, permitió establecer que los mecanismos de biodeterioro se deben principalmente a procesos de biosolubilización, originados por los metabolitos ácidos de las diversas poblaciones de organismos identificadas y que tienen un efecto sinérgico con la corrosión atmosférica del material.

### **Agradecimientos**

Agradecemos al Instituto de Antropología e Historia (ICANH), a la restauradora Patricia Ramírez Nieto y al grupo de conservación de la misma institución, por sus aportes y apoyo en el desarrollo de la investigación y esperamos que los resultados contribuyan para la toma de medidas en conservación teniendo en cuenta el Plan de Manejo del Parque de San Agustín Huila (Colombia).

### **Bibliografía**

ÁLVAREZ M., BATEMAN C., RAMÍREZ P. (2008). *Informe. Estudio de deterioros presentes en la Fuente de Lavapatas*. Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología e Historia.

BARNETT, H.L and HUNTER, B.B. (1975). *Illustrated genera of imperfect Fungi*. Third edition. Minneapolis (USA): Burgess Publishing Company.

BICUDO, C., MENEZES, M. (2006). *Géneros de Algas de Águas Continentais do Brasil*. Segunda Edição. Brasil: RiMa editora.

CAPPITELLI, F., JOSHUA, D., BRUSETTI, L. (2007). "Synthetic consolidants attacked by melanin producing fungi: case study of biodeterioration of Milan Cathedral Marble Treated with acrylics". *Applied and environmental microbiology*, 73(1): 271-277.

COX, E. (1996): *Identification of Freshwater Diatoms from Live Material*. London: Chapman & Hall.

DAVEY, M.E., TOOLE G. (2000). "Microbial Biofilms: from ecology to molecular genetics" *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 64 (4): 847-867.

DOMSCH, K.H., GAMS, W AND ANDERSON, T.H. (1980). *Compendium of soil fungi*. London and New York: Academic Press.

DORNIEDEN, TH., GORBUSHINA. A. (2000). "Biodecay of cultural heritage as a space/time-related ecological situation an evaluation of a series of studies" *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46: 261-270.

FORERO, L.E. (1986). "Investigación Biológica en el parque arqueológico de San Agustín-Huila. Erradicación y Control de Líquenes, Hepáticas y musgos que deterioran la estatuaría agustiniana". *Restauración Hoy*, Centro Nacional de Restauración, 1: 5-9.

GERRATH, J. F. (2003). "Conjugating green algae and desmids". En: Wehr, J. D. y R. G. Sheath (ed.), *Freshwater algae of North America*. San Diego: Academic Press, 353-981.

KINGSTON, J. C. (2003). "Araphid and monoraphid diatoms" En: Wehr, J. D. y R. G. Sheath (ed.), *Freshwater algae of North America*. San Diego: Academic Press, 595-636.

KOMÁREK, J. (2003). Coccoid and colonial cyanobacteria. 59-116. En: Wehr, J. D. y R. G. Sheath (ed). *Freshwater algae of North America*. Academic Press. San Diego 918p.

LUGAUSKAS, A., JASKELEVICIUS, B., LEVINSKAITĖ, L. (2004). "Influence of biological factors in aging of polymeric Materials under natural environmental conditions". *Materials science*, 10 (1): 24-28.

LUND, J.W.; KIPLING, C., LE CREEN, E.D. (1958). "The inverted microscope method of estimating algal number and the statistical basis of estimations by counting". *Hydrobiologia* 11: 143-170.

MARTINEZ, M.M. (2002). *Participación de agentes microbianos en biodeterioro*. Laboratorio de Microbiología ambiental. Pontificia Universidad Javeriana.

MOLEN, J. M. V. D., J. GARTY, B. W. AARDEMA, Y W. E. KRUMBEIN. (1980). "Growth control of algae and cyanobacteria on historical monuments by a mobile UV unit (MUVU)". *Studies in Conservation*, 25(2):71-77.

PARRA, O., M. GONZÁLEZ, V. DELLAROSSA, P. RIVERA., M. ORELLANA. (1982-1983). *Manual Taxonómico del Fitoplancton de Aguas Continentales; con especial referencia al fitoplancton de Chile*. Vol. 1, Cyanophyceae, 1982; Vol. 2, Chrysophyceae-Xanthophyceae, 1982; Vol. 3, Cryptophyceae, Dinophyceae y Euglenophyceae, 1982; Vol. 4, Bacillariophyceae, 1982; Vol. 5 (partes 1 y 2), Chlorophyceae, 1983. Concepción (Chile): Universidad de Concepción.

ROLDÁN, M. OLIVA, F., GONZALEZ DEL VALEE, A. (2006). "Does green light influence the fluorescence properties and structure of phototrophic biofilms?" *Applied and environmental microbiology*. 72 (4): 3026-3031.

ROSOWSKI, J. R. (2003). "Photosynthetic euglenoids". En Wehr, J. D. y R. G. Sheath (ed). *Freshwater algae of North America*. San Diego: Academic Press, 383-422.

TORRES SORIA, P. (1993). *La fitoflora de la zona arqueológica de Palenque, Chiapas*. Colección Científica. México, D. F.: Instituto Nacional de Antropología e Historia.

VALENCIA, M., AGUIRRE J. (2002). *Líquenes Morfología Anatómica Sistemática*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

VALENCIA, M. (2002). *Plantas no vasculares. Algas*. Bogotá: Departamento de biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.

VIDELA, H.A., HERRERA. (2002). *Memorias Prevención y Protección del Patrimonio cultural Iberoamericano de los efectos del biodeterioro ambiental*. CYTED.

WHITFORD, L., SCHUMACHER, G. (1968). *A Manual of the Freshwater Algae in North Carolina*. North Carolina: The North Carolina Agricultural Experiment Station. USA.

WARSHIED, TH., BRAAMS J. (2000): "Biodeterioration of stone: a review". *International Biodeterioration and Biodegradation*. 46: 343-368.



**Luz Stella Villalba Corredor.**  
HAERENTIA  
haerentias@gmail.com

Profesional en Bacteriología con Maestría en Microbiología de la Universidad Nacional de Colombia, Coordinadora del Área de microbiología del Departamento de Análisis y Control de **haerentia SAS.**, investigadora del grupo de Conservación de la Biblioteca Nacional de Colombia, formación en el campo de ciencia aplicada a la conservación de

patrimonio bibliográfico. Trabajó cinco años en el Archivo Histórico de Bogotá y fue Docente de la cátedra de Microbiología de la Facultad de Restauración de bienes muebles de la Universidad Externado de Colombia.



**Andrés Leonardo Malagón Forero.**

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR  
anmalagon@yahoo.com.mx

Biólogo profesional de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, dos años de experiencia en el área de limnología específicamente en el estudio de la comunidad del fitoplancton, Investigador Auxiliar en el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR "José Benito Vives de Andrés" sede Santa Marta, programa Calidad Ambiental Marina, encargado del estudio de la comunidad de fitoplancton y de las poblaciones de microalgas potencialmente nocivas.

Artículo recibido el 28/03/2011

Artículo aceptado el 02/06/2011