

INSTITUTO COLOMBIANO DE ANTROPOLOGÍA E HISTORIA (ICANH)

Informe Final del contrato no 146 de 2011

**CONSOLIDADO SOBRE LAS INVESTIGACIONES EN LA FUENTE DE
LAVAPATAS**

Corporación Proyecto Patrimonio

Compilación de textos: María Paula Álvarez
Asistencia: Lina Esmeralda Castillo

Autores: María Paula Álvarez
Catalina Bateman
Grecia Charry
Helen Jacobsen
Lina Fernanda Martínez
Martha Patricia Ramírez
Luz Stella Villalba

Supervisora de contrato: Martha Patricia Ramírez Nieto
Restauradora ICANH

Bogotá, Febrero de 2012



ÍNDICE	Pág.
PRESENTACIÓN	2
1. Antecedentes Históricos	5
1.1. Levantamiento de características y deterioros de la roca 1937-2007	4
1.2. Sistemas de protección	8
1.3. Sistema de canalización del agua	10
1.4. Estudios de conservación 40s -2007	12
1.5. Tratamiento del agua	16
1.6. Resumen de los antecedentes	17
2. Investigaciones realizadas 2008-2012	18
2.1. Sistema de registro	18
2.2. Caracterización de la Roca	20
2.2.1. Características geológicas	20
- La formación rocosa. Descripción petrográfica y mineralógica	22
- Estudio <i>In Situ</i>	27
a. Fracturas	27
b. Dureza de la superficie	28
2.2.2. Valoración de las propiedades físicas de la roca	30
- Estudio <i>In Situ</i>	31
- Estudio en laboratorio	34
2.2.3. Conclusiones de las características de la roca	39
2.3. Identificación de deterioros de la roca	40
a. Deterioros causados por el cobertizo anterior	41
b. Fisuras	42
c. Desprendimientos	43
d. Decohesión	46
2.5. Biodeterioro	49
2.6. Condiciones medioambientales	59
2.6.1. Características generales del área	60
2.6.2. Condiciones medioambientales en la Fuente	61
2.7. Evaluación del deterioro de la Fuente	66
2.8. Evaluación y selección de biocidas para el control del biodeterioro	72
2.9. Evaluación y selección del consolidante para zonas decohesas	83
3. Procesos y tratamientos recomendados a futuro	90
3.1. El agua y su calidad	90
3.2. Monitoreo de las condiciones medioambientales	90
3.3. Estudios de la roca	90
3.4. Estudio de biodeterioro sobre la toba volcánica	91
3.5. Monitoreo de los deterioros	91
3.6. Limpieza, saneamiento	104
3.7. Consolidación de zonas decohesas	104
3.8. Investigación y Consolidación de los desprendimientos	104
3.9. Levantamiento tridimensional	105
3.10. Evaluación y mejora del sistema de protección	105
Conclusiones	107
Glosario	110
Bibliografía	117
Listado de Figuras	122
Listado de Tablas	124

PRESENTACIÓN

La Fuente de Lavapatas está ubicada en el Parque Arqueológico de San Agustín, éste se encuentra en la latitud norte 1 ° 3" y longitud oeste 76° 16" en el departamento del Huila, al sur de Colombia. Es un Bien de Interés Cultural, protegido por la declaratoria de Patrimonio de la Humanidad. Fue construida por escultores precolombinos de la Cultura del Alto Magdalena (Siglo IX a.C.- Siglo IX d.C.) en el lecho en declive de la quebrada que le da su nombre. Está conformada por un complejo laberinto de canales y pozos que determinan el sentido de circulación del agua y en algunos sectores por tallas con formas humanas y animales.

De acuerdo con Hernández de Alba la Fuente cubre un área de 15.0 m de longitud por 11.5 m, área que corresponde a la zona donde se concentra el trabajo escultórico (Hernández de Alba, 1978). Pablo Gamboa Hinestrosa reporta en 1982 las medidas de 17.8 x 22.0 m (Castillo & Pérez, 1986).

La Fuente está elaborada sobre una toba volcánica, específicamente sobre una ignimbrita de composición andesítica a dacítica. Las condiciones ambientales del sitio corresponden a las de un clima templado con una altitud de 1.730 m.s.n.m. Gracias al cobertizo la Fuente no recibe la cantidad considerable de precipitación del lugar que alcanza una media anual entre 1100 mm y 1700mm. La superficie rocosa sin embargo, se encuentra en permanente contacto con el agua que accede a la Fuente entre las 9am y las 5pm. La humedad relativa (HR) en la zona del parque es de aproximadamente del 80%.

Una de las características de este sitio que más asombra es el grado de ingeniería alcanzado por los escultores para aprovechar el lecho en declive y tallar el conjunto escultórico donde los canales y pozos determinan el sentido de circulación del agua. Estos canales a su vez delimitan, marcan y resaltan formas humanas y animales entre las que se distinguen principalmente ranas y serpientes ubicadas en el área norte y centro de la Fuente.

Dentro del Plan de manejo del Parque Arqueológico de San Agustín, la Fuente de Lavapatas fue definida como sitio rupestre. Los sitios rupestres son formaciones rocosas cuyas superficies fueron aprovechadas para grabar o tallar formas:

Esta denominación comprende petroglifos, relieves y relieves escultóricos. En los sitios rupestres fue aprovechado el entorno en el que se encuentran las formaciones rocosas como el paisaje, las caídas de agua y en algunas ocasiones, la disposición y orientación de las superficies a tallar o grabar. Por tanto, una característica que los define es el hecho de ser parte del sitio, es decir, que no pueden ser movidos de su espacio (Álvarez, Bateman, Quintero & Ramírez et al., 2007).

La excepcionalidad del lugar ha hecho que desde su descubrimiento, en 1937, no haya dejado de causar admiración. De hecho, en la actualidad, es el sitio predilecto de los visitantes. Desde entonces, tanto investigadores como habitantes han estado atentos a la conservación del lugar manifestando preocupación por la pérdida de las formas allí talladas. Atendiendo a esta preocupación, se han realizado múltiples estudios y diagnósticos que han dado cuenta del estado de conservación de la Fuente en diferentes momentos. Aquellos realizados entre los 70s y 90s, como aparece descrito en detalle más adelante, por no haberse llevado a cabo de manera regular y sistemática no permite conocer en la actualidad el nivel de pérdida de las formas escultóricas como tampoco evaluar con precisión el grado de deterioro de la piedra, la velocidad de degradación, la incidencia del agua, las condiciones medioambientales o qué tanto afecta la presencia del cobertizo.

Para resolver esta situación, en el 2007, a partir de la elaboración del Plan de Manejo del Parque Arqueológico de San Agustín, se planteó como prioridad la puesta en marcha del “Programa de conservación de la Fuente de Lavapatas”. Este programa fue planteado en ocho etapas: 1. Recuperación de archivos y documentos; 2. Levantamiento; 3. Evaluación estructural del cobertizo; 4. Estudio de los deterioros; 5. Evaluación de los métodos de limpieza y consolidación; 6. Proceso de conservación; 7. Diseño e implementación del programa de monitoreo y finalmente 8: Recuperación de la Quebrada Lavapatas.

El presente documento da cuenta de las investigaciones realizadas por un equipo interdisciplinario de investigadores apoyados por el ICANH entre 2008 y 2012 conformado por la microbióloga Luz Stella Villalba, la geóloga Lina Fernanda Martínez, la diseñadora Grecia Charry, las restauradoras de bienes muebles Catalina Bateman, Helen Jacobsen, María Paula Álvarez y Patricia Ramírez quien acompañó todo el proceso y realizó la interventoría como parte del ICANH.

Dichas investigaciones tuvieron como finalidad: reunir la información histórica necesaria para poder comprender la situación actual de la Fuente, realizar el estudio de los deterioros mediante el reconocimiento y el levantamiento de sus manifestaciones, definir la metodología para llevar a cabo el seguimiento de éstos y algunos de los procesos y tratamientos necesarios para asegurar la conservación de la Fuente.

El documento está estructurado en tres capítulos:

El primer capítulo aborda los antecedentes de estudio y conservación de la Fuente, el levantamiento de las características y deterioros, los sistemas tanto de canalización de agua como de protección y las labores de conservación adelantadas respecto al tratamiento de agua y estudio de consolidantes realizados desde el momento de su descubrimiento en 1937 hasta el 2007.

El segundo capítulo expone las investigaciones realizadas entre 2008 y 2011 en relación a las características geológicas y físicas de la roca, las condiciones medioambientales, la

identificación del deterioro y su evaluación. Presenta además las investigaciones base de tratamientos como el saneamiento y control del biodeterioro y la consolidación de zonas decohesas.

El tercer capítulo presenta los estudios y tratamientos que se recomienda desarrollar a futuro como la investigación de un mortero para los desprendimientos, el desarrollo de la limpieza, saneamiento integral y consolidación de las zonas decohesas y con desprendimientos, el levantamiento tridimensional, el seguimiento y monitoreo de las condiciones medioambientales y de los deterioros, el estudio del tratamiento del agua de circulación y la evaluación del sistema de protección.

Finalmente, se presentan las conclusiones que surgen a partir de las investigaciones y que orientan el manejo y la conservación del lugar.

1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Patricia Ramírez, María Paula Álvarez
y Catalina Bateman*

Con el fin de conocer la historia de la Fuente desde el momento de su descubrimiento en 1937, comprender la manera cómo había sido abordada por anteriores estudios y registrar los procesos a los que había sido sometida, en el año 2008 se realizó la revisión y recopilación de la documentación relativa a este tema. A continuación se presenta el análisis de dicha información.

1.1. LEVANTAMIENTO DE CARACTERÍSTICAS Y DETERIOROS DE LA ROCA

La Fuente fue hallada por Ernesto Gumis en Comisión Arqueológica liderada por José Pérez de Barradas el 10 de Julio de 1937. Para ese momento se registraron 34 figuras en relieve, canales y tres piscinas, se consignó además una detallada descripción de las formas, haciendo referencia, en algunos casos, a su estado de conservación. (Pérez de Barradas, 1943: 98).

El primer levantamiento de las formas de la Fuente fue realizado en la Comisión de 1937 por el dibujante Luis Alfonso Sánchez.



Figura 1. Luis Alfonso Sánchez. Comisión Arqueológica liderada por José Pérez de Barradas el 10 de Julio de 1937.

Se trata de una acuarela en donde se representa la profundidad y los volúmenes, se completan algunas de las formas y se ignoran algunas otras. Si bien ésta acuarela permite visualizar las formas generales de la Fuente no es un registro fiel de los relieves y volúmenes allí presentes.

El segundo levantamiento, también realizado por Sánchez en 1937, corresponde a un dibujo donde se representa en plano las mismas formas que habían sido consignadas en la acuarela y se les numera. Este levantamiento sólo considera parte de los relieves y las formas presentes en la Fuente.

Pérez de Barradas describe 34 figuras, no obstante, en la numeración de éstas dentro del plano, sólo aparecen 33 pero una de las figuras no cuenta con numeración por lo que se asume que fue un error al momento de transcribir la información. El dibujo tiene problemas de perspectiva pues en algunas figuras ciertas formas son representadas en planta y otras en corte, lo que genera confusión en la lectura. Tampoco podemos saber actualmente si el hecho de dibujar las figuras por completo obedecía a la tendencia de la época de completar las formas o si en realidad estaban viéndolas completas por lo cual, ni la descripción de barradas ni la acuarela y el dibujo permiten realizar ningún tipo de valoración acerca del grado de pérdida que han tenido las formas desde su descubrimiento hasta la fecha. Es importante mencionar que, independientemente de estas observaciones o de los errores que pueda tener, estos registros constituyen documentos valiosos en tanto permiten acercarse a figuras y formas que en la actualidad están apenas insinuadas o borradas por completo.

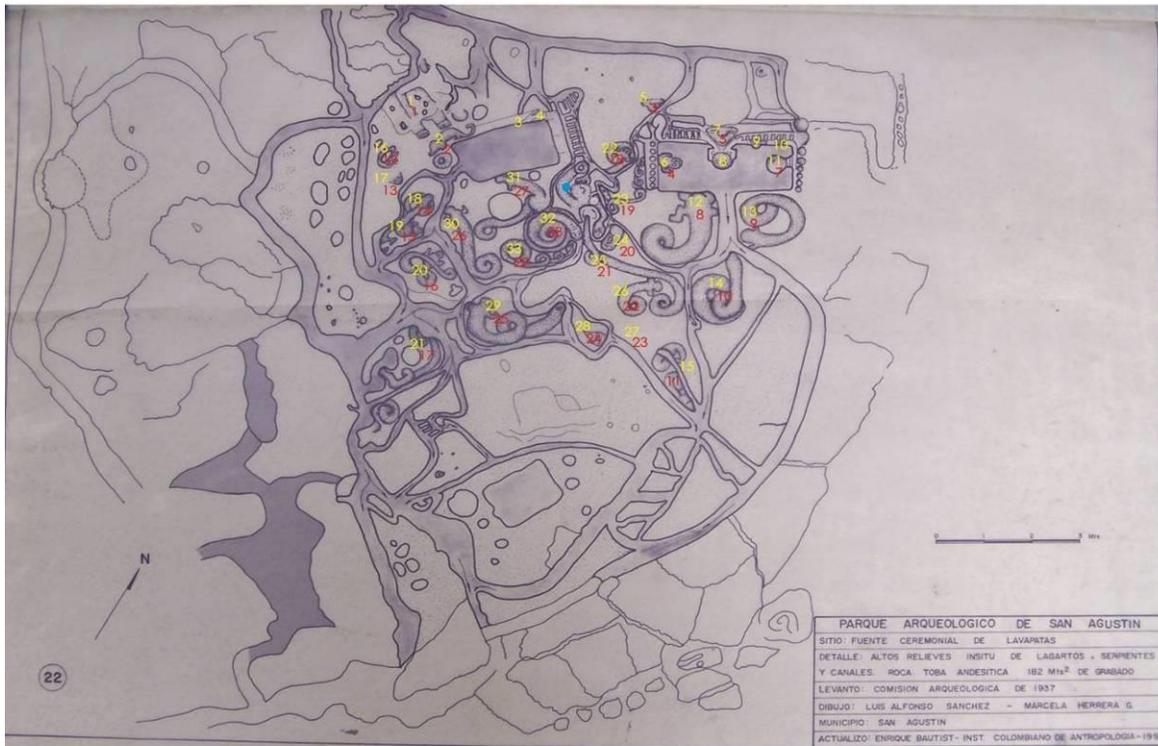
En 1993 Enrique Bautista retoma el plano de Sánchez otorgándole una nueva numeración a los relieves y escalándolo. Este nuevo levantamiento incluye algunas zonas periféricas que no habían sido consideradas por los primeros levantamientos.

Al respecto menciona:

En el levantamiento topográfico de la comisión arqueológica de 1937 (Pérez de Barradas, 1942) se omitieron las áreas adyacentes de la roca, quizás por no mostrar señales visibles de talla; en trabajos de ampliación quedaron al descubierto superficies (al oeste), que al ser calcados dieron muestras de intervención humana, pero no se puede afirmar aún si son el inicio del tallado y grabado de la Fuente por estar severamente erosionados y meteorizados (Bautista, 1993).

En su nueva numeración Bautista identifica 29 figuras y le hace falta un número -el 6-. Las figuras que para Pérez de Barradas corresponden a los números 3, 4, 8, 9, 10 no son consideradas por Bautista. Esta diferencia en la cantidad de figuras determinó que para el presente estudio se retomara la numeración de Pérez de Barradas, de tal manera que todas las figuras tengan un número y en el caso de encontrar más figuras se inicie a partir del número 34 (Ver Figura 2).

Figura 2. Plano con la numeración otorgada a las figuras de la Fuente de Lavapatas a través del tiempo



● Numeración correspondiente a Pérez de Barradas, que se adopta para el presente documento
 ● Numeración correspondiente a Bautista

● Esta figura no fue numerada en el dibujo de Sanchez
 La figura 23/27 no fue graficada en esta versión. No obstante, tanto en el plano de Sánchez de 1937 como en el de Bautista de 1993, sí lo es.

Bautista en 1993 realiza además el levantamiento calcográfico de la totalidad de los relieves. Resultado de ello son 510 calcos de distintas dimensiones en los que se utilizaron 1600 metros de tela para relieves in situ las diferentes expresiones pétreas; identificar los más recurrentes procesos de alteración sobre la superficie de la roca. (Castillo & Pérez, 1986). Actualmente estos calcos se encuentran en la sede del Parque Arqueológico y son difíciles de leer pues se superponen en muchas zonas y no es posible ver la manera en como registran las alteraciones de la roca.

En 1997 el Centro Nacional de Restauración refiere en su informe una serie de planos de la Fuente, probablemente éstos corresponden a un nuevo levantamiento realizado por la comisión de trabajo. Actualmente estos planos están perdidos.

Con relación al tema del biodeterioro, desde 1985 se han realizado 3 estudios (Forero, 1985; Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional, 1988; Rudas, 1988) que han brindado una aproximación a la diversidad de organismos que hacen parte de la flora habitual del sitio.

1.2 SISTEMAS DE PROTECCIÓN

Entre 1937, año de su descubrimiento y 1944, la Fuente estuvo expuesta al inadecuado uso por parte de los moradores de la zona quienes utilizaban el lugar para bañarse, lavar la ropa y los caballos herrados. Como bien anota Pérez de Barradas:

en mi última estancia en San Agustín pude comprobar que ya habían desaparecido varios relieves y que la fecha de destrucción completa estaba próxima, no sólo por la acción de la intemperie, sino por los visitantes y dueños del terreno que han escogido el lugar para lavar ropa y para baño (Pérez de Barradas, 1943: 102).

Atendiendo a lo anterior, y por gestión de Luis Duque Gómez, el Ministerio de Educación mandó a construir en 1944 el primer cobertizo de madera y techo de paja a un arquitecto chileno con el fin de atenuar el efecto del intemperismo y proteger los relieves.

En 1972 este cobertizo fue reemplazado por uno de tejas plásticas, pues los turistas “se quejaban de la oscuridad debida al techo de paja” (Useche, 1983: 7)



Figura 3. Duque, 1963. Archivo ICANH 95ii 0191 (192). Existen pocas fotografías que muestren cómo era el cobertizo con bases de cemento y las columnas en madera que sostenían el cobertizo; estas columnas dejaron las marcas sobre la Fuente.



Figura 4. Cobertizo de estructura metálica con domos de acrílico presente desde 1984 hasta hoy.

En 1984 el Instituto Colombiano de Antropología decidió cambiarlo por la estructura metálica con domos acrílicos que existe actualmente. Esta cubierta dotada con un puente colgante en madera, mide 20.2m x 21.7m y tiene una altura promedio de 4m sobre el sector noreste. Está suspendida por 4 tensores metálicos apoyados en 4 postes de cemento de 7.4m de altura. Aún en 1987 quedaba un muro suroccidental del

anterior cobertizo que fue suprimido pues ya no cumplía ninguna función, momento en el que la firma Hidromecánica Ltda. hizo el arreglo a algunas de las láminas de acrílico del domo que estaban en mal estado (Enciso, 1986). Los trabajadores del Parque son quienes llevan a cabo limpiezas periódicas de la estructura, a pesar del difícil acceso a la parte superior de la cubierta y la inestabilidad de ciertas zonas.

En 2008 el cobertizo presentaba daños estructurales graves, pues los tensores que soportaban la estructura metálica se desprendieron de una de las columnas de cemento. En 2009 con el fin de controlar el peso adicional causado por la circulación de visitantes sobre el puente colgante y evitar algún accidente, el paso de los visitantes a esta zona fue prohibido y el puente eliminado.

En 2010 se solucionó el problema estructural del cobertizo ajustando los tensores a las columnas y los domos de acrílico de la cubierta fueron reemplazados en su totalidad por otros con filtro UV. Entre enero y febrero de 2012 los trabajadores del Parque construyeron un nuevo puente en el extremo norte del lugar que permite hoy que los visitantes hagan una mejor observación.

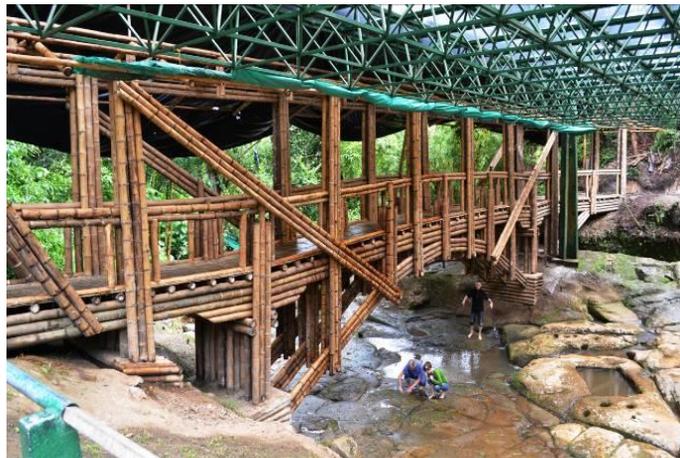


Figura 5. Puente en guadua construido entre enero y febrero de 2012 por los trabajadores del Parque Arqueológico de San Agustín.

1.3 SISTEMA DE CANALIZACIÓN DEL AGUA

La presencia del agua es un reto para la conservación del sitio pues a pesar de ser uno de los factores deteriorantes más importantes de la roca, esta no puede eliminarse ya que es fundamental en su función, su uso original y valor actual. Desde los primeros informes que existen sobre la Fuente se ha discutido sobre el impacto del agua en la roca. Por ejemplo en 1942 Pérez observaba que “en tiempo de crecida de la Quebrada, el agua golpeaba fuertemente los grabados” (citado por Useche, 1983: 7).



Figura 6. Punto de la quebrada del Lavapatas donde el caudal de agua se divide y permite el acceso al sistema de circulación de agua que baña la Fuente.

Es por eso que desde entonces se han desarrollado distintos estudios y acciones para controlar el efecto del agua, tal y como se describe a continuación:



Figura 7. Pozo que recibe el agua de la Fuente de Lavapatas y sistema de bombeo del agua.

En la época en que se construyó el primer cobertizo, fue diseñado un sistema simple para represar el agua y regular su entrada a la Fuente colocando “una tabla a manera de tambre la cual era levantada por el celador (...) cuando llegaban los turistas a visitarla” (Useche, 1983: 7).

Luego, en 1985, dado el alto grado de contaminación de las aguas de la quebrada, se realizó la desviación de su curso y se instaló un sistema de recirculación por bombeo con el cual se controló el ingreso de agua al sitio asegurando que fuera el agua del acueducto regional de La Cuchilla la que circulara por el sistema.

Este sistema funciona de la siguiente manera. Aproximadamente 30 mts metros más arriba de la Fuente, la quebrada pasa por un sistema de regulación del caudal donde un tambre regula la entrada del agua dividiéndola en dos. Una parte del agua baja por el lecho encausado del costado oriental y la otra circula por un tubo de 8" que baja aproximadamente 2.50 metros y recorre el costado occidental para caer de nuevo en la quebrada abajo del punto donde acaba la Fuente. Este tubo presenta actualmente infiltraciones que aportan agua adicional a la roca del costado occidental.

En la parte inferior de la Fuente hay un pozo que recibe agua del acueducto y una caseta donde se encuentra el sistema de bombeo conformado por dos bombas. Este se encarga de hacer circular el agua por un tubo desde esta parte baja hasta la esquina nororiental en donde el agua entra por un canal y es redistribuida al laberinto de canales, piscinas y formas talladas. Este tubo se encuentra aproximadamente entre 1 y 3 metros de profundidad del nivel actual de la Fuente y sube por el costado occidental.

La circulación del agua de la Fuente trabaja por medio de un sistema de bombeo. Fue diseñado para dos bombas, no obstante, la fuerza generada al ponerlas a funcionar al mismo tiempo producía un caudal muy fuerte por lo que se decidió alternar las bombas de tal forma que no se recalentaran y el sistema no colapsara. En el año de 2005 una de las motobombas se averió y fue remplazada por una nueva. Para ese entonces todo el sistema eléctrico también fue revisado. Durante el 2008 y 2009, la otra bomba se encontraba dañada y en el 2010 fue reparada. Hoy en día el sistema funciona con ambas bombas.

Desde que se instaló el nuevo sistema de circulación de agua en 1985 hasta la actualidad, el agua circula de 9 a.m. a 5 p.m hora del cierre del Parque. Este ciclo de encendido de las bombas durante las 8 horas diarias mencionadas se determinó como una medida administrativa, sin embargo no se encuentra basada en estudios o investigaciones que argumenten desde el punto de vista de la conservación el efecto de esta medida. Cabe anotar que cuando no hay luz o cuando se presentan daños en la motobomba el flujo de agua es interrumpido. Esto es esporádico y el tiempo máximo de interrupción en estos años fue de 10 días por el daño de una motobomba.

En época de fuertes lluvias la quebrada se desborda e ingresa a la zona con relieves. El diseño original del pozo que recibe el agua del acueducto contemplaba la protección hermética del agua para evitar la contaminación de la misma, no obstante, este plan no fue llevado a cabo y en cambio, se aprovechó el hueco ya existente y simplemente se le colocó un muro de contención. Por tanto el agua que proviene del acueducto está completamente expuesta a la lluvia, el polvo, los animales y la acumulación de hojas. Con el fin de atenuar esta exposición, antes de ingresar al tubo fue colocada una malla metálica a manera de filtro, que no cumple con su función a cabalidad pues deja pasar muchas partículas abrasivas, microorganismos y plantas que contaminan el agua.

1.4 ESTUDIOS DE CONSERVACIÓN 1971 -2007

La conservación de la Fuente generó preocupación por parte de los entes a cargo del Parque Arqueológico de San Agustín desde los años 70s, a partir de ese momento y en diversas ocasiones se pidió a expertos nacionales e internacionales que visitaran la fuente y dieran su concepto. Entre 1971 y 2007 se realizaron 4 visitas (Lehman, 1971; Enciso, 1989; Comisión del Centro Nacional de Restauración, 1994 & Torres, 1996) y 4 diagnósticos (Useche, 1983; Bautista, 1993, Nominación a la Lista de Patrimonio de la Humanidad, 1994; Colcultura 1997) que daban cuenta del estado de conservación. Si bien parte de la información producida a lo largo de estos años, reposa aun en la biblioteca del ICANH, muchos de estos informes y gran parte de los procesos que se realizaron en el Parque entre 1971 y 2007 no se encuentran y sólo aparecen referenciados en el *Resumen cronológico de trabajos realizados en el Parque Arqueológico de San Agustín* realizado por Eliseo Pérez y Enrique Castillo (Castillo & Pérez: 1996).

El primero de los informes de visita fue realizado por Lehman en 1971 y corresponde a un concepto solicitado por Colcultura y la Corporación Colombiana de Turismo a la UNESCO. Lehman hizo observaciones sobre el manejo arqueológico y de conservación de los vestigios del Parque, detallando lo relativo a las esculturas del Bosque de las Estatuas y algunas observaciones generales sobre la Fuente de Lavapatas. Menciona una visita anterior de otra restauradora de la UNESCO, sin embargo, en la información existente no se encontró ningún documento anterior al de Lehman que haga referencia a la conservación de la Fuente.

En 1982 la Corporación Nacional de Turismo gestionó una propuesta integral de tratamiento elaborada por el laboratorio Tecniaguas y los representantes de Laboratorios Sika. Esta contemplaba el análisis físico químico del agua de la quebrada, la observación del estado de conservación de la Fuente y el estudio del flujo del agua en la quebrada. Proponía construir un sistema de purificación del agua y aplicar resinas epóxicas como consolidantes de la roca.

En 1983 Luz Ángela Useche, química del Centro Nacional de Restauración, fue consultada para evaluar la propuesta de Sika, “considerando que el uso de la resina epóxica Colmadur 52 de Sika no era compatible con las características de humedad del Lavapatas, y además cambian la apariencia de los objetos (abrillantan y se amarillan), sellan y son completamente irreversibles” (Useche, 1983: 20) y se planteó continuar con la investigación para determinar el material consolidante adecuado efectuando algunas pruebas de consolidación con diferentes resinas consolidantes en diferentes puntos de los relieves y las piscinas para lo cual se evaluaron una serie de pruebas con resinas epóxicas (Colmadur 52 de Sika), acrílicas (Primal) y silicónicas (Toxement y Wacker OH). Se examinó la efectividad de éstos productos consignando la manera en que se comportaba la piedra cuando las resinas fueron aplicadas in situ. En 1984, Useche

realizó otras pruebas. Primero con las tres resinas mencionadas y luego realizando mezclas entre ellas. Castillo y Pérez recogieron en 1996 la información obtenida por Useche en las primeras pruebas, sin embargo de la segunda no existen los datos, pues el informe de Useche no se encontró y por tanto al no contar con la ubicación exacta donde fueron realizadas las pruebas, hoy no es posible hacer ningún tipo de evaluación o seguimiento de las zonas consolidadas.

Useche en el diagnóstico, aborda además la problemática de la presencia del agua en la Fuente mencionando que ésta produce hidrólisis y disolución de la roca y que contiene material abrasivo, en su mayor porcentaje cuarzos y feldespatos, con depósitos de material orgánico que produce manchas en la piedra. Además, gracias al análisis petrográfico y químico de la roca y concluyó que

Se trata de una toba riolítica soldada, de matriz vítrea feldespática y fragmentos de pumita. Estas características dan a este tipo de rocas baja resistencia a los factores del medio, la hace susceptible a los procesos de hidratación y lixiviación. Este último (lixiviación de hierro) ha producido sobre la superficie pequeñas fracturas, aumentando la porosidad efectiva de la roca (Useche, 1983: 19).

Useche además recomendó regular el flujo del agua, implementar el sistema de acondicionamiento de aguas propuesto por Tecniaguas, enfatizó que no se debía retirar el cobertizo, sugirió realizar el seguimiento de las condiciones, el levantamiento topográfico de sus formas y la compilación de la información existente. Dichas recomendaciones no fueron tenidas en cuenta. De hecho La antropóloga Braida Enciso del ICANH, en noviembre de 1989 sugirió en su informe de visita la necesidad de llevar a cabo un estudio para su conservación, refiriendo “manchas de color negro y abundante microflora” y recomendando “reducir el número de veces que se permite circular el agua sobre la Fuente porque le está llegando contaminada de la quebrada, pues el sistema de circulación no se está usando. La cubierta presenta goteras y requiere una revisión” (Castillo y Pérez, 1996).

Los estudios se retomaron 10 años adelante con los trabajos que Colcultura -Centro Nacional de Restauración- y el Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH) desarrollaron en el lugar.

En 1993 el antropólogo Enrique Bautista fue contratado por el ICANH para llevar a cabo el diagnóstico del estado de la Fuente y realizar el levantamiento de sus formas. Bautista consiguió un trabajo profundo y completo que definió y ubicó los deterioros, sus causas y relación con el cobertizo o el agua, propuso soluciones y una serie de recomendaciones con una mirada integral a la problemática del Lavapatás. Bautista define los siguientes deterioros: erosión hídrica, alteraciones de los relieves (fisuras, desconchamientos o descascaramientos y pérdidas de perfil), desagregaciones del grano de la roca, efectos por la deposición de suelos y corrosión y biodeterioro. Planteó finalmente que

las acciones degradantes sobre la Fuente de Lavapatas son el resultado de la actuación simultánea de los siguientes elementos: la temperatura, el agua, los seres vivos y de sustancias químicas diversas. El clima sometido a variaciones por el micro clima que se ha generado bajo el domo ha originado cambios; a él se suma la contaminación del cuerpo de agua lo que ha perturbado a los demás, apareciendo entonces un desequilibrio que amenaza severamente la estabilidad de la superficie rocosa de la Fuente, pues siempre resultará una forma de alteración (Bautista, 1993: 80).

Bautista recomendó procesos de conservación como la limpieza y eliminación de sedimentos, la descontaminación del agua y su desinfección, el control biológico y erradicación del biodeterioro, mantener el equilibrio de volumen, velocidad y capacidad de arrastre del agua, estabilizar y estudiar las condiciones medioambientales, llevar a cabo el estudio para la consolidación de la roca, la prospección arqueológica de toda la quebrada, vincular a las comunidades en la labor de protección, y generar productos (talleres y publicaciones) para educar en torno a la protección y conservación. Prácticamente ninguno de los estudios y acciones propuestas se han implementado.

En 1994 un equipo del Centro Nacional de Restauración, conformado por la restauradora Helena Castaño, la química Luz Ángela Useche, el biólogo José Enrique Castillo y la arquitecta Pastora Murillo, presentó un informe de visita en el que concluyó que su principal problema de la Fuente era el agua, por los esfuerzos mecánicos que ocasiona su flujo y su contaminación que favorece el biodeterioro. Así mismo recomendó mantener el cobertizo y la circulación del agua de manera constante con el fin de evitar cambios drásticos, aplicar de un tratamiento biocida y contemplar la limpieza y consolidación puntual de la piedra. Proponía realizar análisis del agua de la quebrada y del acueducto, revisar y mejorar el sistema de circulación de agua con el fin de evitar que la quebrada se rebosara y considerar el proyecto de saneamiento del agua de la quebrada Lavapatas desde su nacimiento planteado por el antropólogo Eduardo Forero con el fin de recuperar el flujo natural del agua. La aplicación del producto biocida DIMANIN fue la única recomendación que fue tenida en cuenta.

Cuando los Parques de San Agustín y Tierradentro fueron postulados para la declaratoria de Patrimonio de la Humanidad en 1994, el ICANH preparó un documento que incluye el diagnóstico de la Fuente. En dicho documento se menciona:

La Fuente de Lavapatas presenta un estado de conservación que amerita tratamiento especial, pues el soporte que es una toba andesítica se encuentra bastante meteorizado, tiene considerables niveles de contaminación y formación de fisuras por la depositación de sedimentos que transporta la quebrada, sin embargo el principal problema es el de la tracción y compresión de la roca, tanto por termoclastismo como por hidroclastismo, que han causado fracturas y la formación de placas separadas de su soporte (ICANH, 1994: 6).

En 1996, el consultor de la UNESCO Luis Torres Montes, presentó su informe de visita y en 1997 el Centro Nacional de Restauración realizó el Taller para la Conservación del Parque Arqueológico de San Agustín.

En su informe Torres evaluó los factores de deterioro de la roca y sus relieves. Observó que, contrario a lo indicado por Bautista, con la suspensión de la circulación del agua no alcanzan a suceder ciclos de humectación-secado que afecten la roca. Analizó el efecto del agua y trató de comprender el impacto del domo en la conservación del sitio anotando:

La circulación del aire abajo del techo impide el desarrollo del efecto invernadero, de hecho la parte expuesta de la Fuente a la acción directa del sol presenta temperaturas más altas así como variaciones de HR y temperatura que la parte protegida. El cobertizo es efectivo aunque ciertamente antiestético. Sugerimos que se eleve 4 o 5m para sacarlo del plano visual (Torres, 1996: 13).

Además identificó problemas de erosión y degradación de la roca y describió cómo el deterioro aparece de distintas maneras en relación a la humedad. Con el fin de disminuir la agresividad del agua y contribuir a la consolidación de la roca, el Consultor propuso verificar el sistema de recirculación del agua añadiendo cal, lo cual no se llevó a cabo. Recomendó también realizar la comparación entre las fotografías de 1943 y las actuales y analizar agua.

Retomando las recomendaciones de Torres, la comisión conformada por los científicos y restauradores del Centro Nacional de Restauración, logró con el Taller de 1997 una aproximación interesante al problema de la conservación de la Fuente en la medida en que contempló el estudio del deterioro, de las características de la roca y la determinación de las condiciones medioambientales. En sus conclusiones el grupo de profesionales estableció que el agua que corre por la Fuente, por su carácter corrosivo, produce erosión, decohesión, manchas, sedimentación, formación de nuevos canales, y en general meteorización de la roca. Puso de manifiesto la presencia de infiltraciones en el sector Este, que produce que el contenido de humedad en la roca sea mayor en esta zona, y que se presenten grietas, fracturas y fisuras debido a los cambios de humedad relativa y temperatura, además del biodeterioro. Mostró además el deterioro de la cubierta y cómo se estaban usando de manera inadecuada los biocidas por lo que propuso una nueva metodología de aplicación. Se planteó la necesidad de realizar un seguimiento fotográfico y topográfico para determinar la velocidad de pérdida del material, realizar el estudio macro y microclimático para comprender el efecto del cobertizo, realizar el estudio de las condiciones de la roca y de las características del agua de circulación, mejorar el sistema de recirculación de agua añadiendo filtros, y canalizar las aguas lluvias en el sector noreste de la Fuente para disminuir la sedimentación.

Ninguno de estos estudios fue llevado a cabo en ese momento.

1.5. TRATAMIENTO DEL AGUA

Para poder determinar el tratamiento que debía darse al agua que ingresa a la Fuente, era necesario hacer los análisis con los cuales se establece la composición del agua y su estado de contaminación. Dichos análisis fueron realizados en tres ocasiones. El primer análisis físico químico fue efectuado por la empresa Tecniaguas en los laboratorios ILAM y de la Universidad Nacional en 1982, el segundo fue solicitado por el Taller de 1997 y realizado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional y el tercero encargado por el ICANH en el marco del Plan de Manejo del Parque Arqueológico San Agustín 2007.

Los dos primeros análisis siguieron metodologías similares lo que permite su comparación. En ambos se analizó el índice de Langelier, se hizo la determinación físico química y se llevó a cabo la interpretación correspondiente. Entre los resultados obtenidos en 1982 y 1993 no hay mayor diferencia, las aguas provenientes de la quebrada, el acueducto y la de circulación son turbias, ligeramente neutras y corrosivas (pH inferior a 7).

En el análisis realizado en el 2007 la metodología y el lugar de donde se tomaron las muestras no son claras y por lo cual no aportan mayor información.

Según información encontrada en un informe de 1996 (Pérez y Castillo 1996), y entre 1994 y 2001 se aplicó DIMANIN en el agua del tanque de circulación, 10ml semanalmente con el fin de controlar la contaminación biológica de las zonas de circulación del agua.

1.6 RESUMEN DE LOS ANTECEDENTES

Los antecedentes permitieron establecer en 2008 que el problema de conservación de la Fuente era complejo y difícil de solucionar pues requería de estudios que tuvieran mayor continuidad y un trabajo interdisciplinario e investigativo especializado.

La revisión de los estudios de conservación adelantados hasta el 2007 mostró que si bien las instituciones encargadas se habían preocupado por el sitio y que se habían desarrollado varios estudios y diagnósticos, éstos fueron efectuados cada 8 o 10 años, lapsos de tiempo demasiado amplios.

Se identificó además que, en general, en estos informes se presentan pocos datos cuantitativos; la información que contienen es fundamentalmente descriptiva y se basa en observaciones e hipótesis generales. Esto ha limitado la posibilidad de que estudios posteriores hayan podido comprobar o desestimar algunos de los planteamientos y alcanzar conclusiones mejor sustentadas acerca de los problemas de deterioro del sitio.

La mayor problemática encontrada al revisar los antecedentes de estudio de la Fuente, fue comprobar la falta de implementación de las recomendaciones dadas por éstos, lo cual no permitió que se avanzara en la comprensión y tratamiento de los distintos problemas de conservación de la Fuente.

Considerando lo anterior, el “Programa de conservación de la Fuente de Lavapatás” que inició su desarrollo en 2008, buscó llenar los vacíos existentes hasta la fecha y presentar una información más completa. Los resultados de cada una de las investigaciones realizadas en los últimos años se presentan en el capítulo siguiente.

2. INVESTIGACIONES REALIZADAS 2008-2012

A partir de la elaboración del Plan de Manejo del Parque Arqueológico de San Agustín en 2007, se planteó como prioridad desarrollar a partir de 2008 el “Programa de conservación de la Fuente de Lavapatas”. Este programa, iniciaba con la etapa correspondiente a la Recuperación de archivos y documentos, que fue presentada en el apartado anterior. Incluía también la creación de un sistema de registro, la identificación de los deterioros y su levantamiento gráfico, el estudio geológico y la valoración de las propiedades físicas de la roca, la evaluación del biodeterioro, la evaluación de las condiciones medioambientales, y las investigaciones para el control del biodeterioro y el tratamiento de las zonas decohesas. Todos estos estudios e investigaciones han sido desarrollados con el objetivo de realizar una evaluación integral del estado de conservación de la Fuente que permita realizar recomendaciones a futuro y se presentan a continuación.

2.1. SISTEMA DE REGISTRO

Grecia Charry, Catalina Bateman y María Paula Álvarez*

Considerando la necesidad de llevar a cabo un levantamiento detallado en 2008 Catalina Bateman realizó el levantamiento fotográfico utilizando la estructura del cobertizo para tomar desde esta ubicación las fotos. En ese entonces la sectorización de la Fuente partió de las formas generales de la formación rocosa, y se dividió en 26 sectores nombrados de la A a la Z. Dicha nomenclatura fue tenida en cuenta en todos los estudios desarrollados entre 2008 y 2011. En 2009 la diseñadora gráfica Grecia Charry después de corregir la distorsión de perspectiva, posición y tamaño causada por el ángulo del lente fotográfico en cada una de las imágenes y unir las mediante un software de edición fotográfica, obtuvo una imagen panorámica única de la Fuente que fue utilizada en los estudios para registrar la presencia de deterioros, alteraciones de la roca y propiedades físicas y geológicas, las cuales corresponden a los gráficos presentados en este informe. Las zonas que se encuentran por fuera del cobertizo, no quedaron registradas en esta imagen.

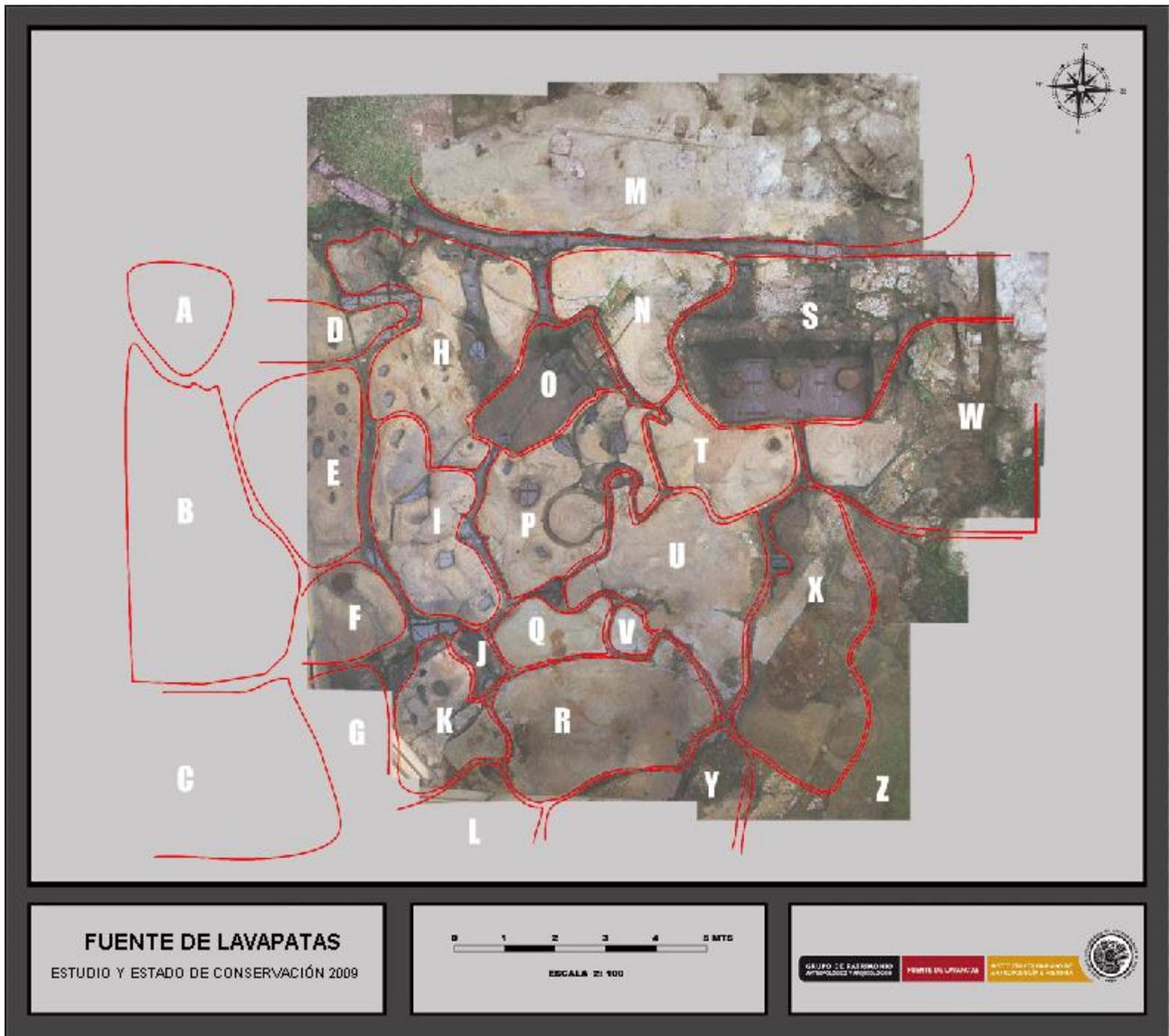


Figura 8. Sectorización base del sistema de registro utilizado en las investigaciones 2008-2011

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA DE LA FUENTE DE LAVAPATAS

Lina Martínez, Helen Jacobsen, María Paula Álvarez.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

Si bien sobre la roca de la Fuente se habían realizado algunos análisis geológicos (Useche, 1984) para entender mejor el deterioro de la misma y la relación de la composición y estructura de la roca con lo observado a nivel macroscópico, era necesario realizar estudios geológicos más completos.

Fue así como en el 2009 se desarrollaron el estudio microscópico y macroscópico de las características geológicas de la roca, siguiendo la metodología descrita a continuación:

Metodología

Para la **evaluación de las características geológicas** se utilizó la siguiente metodología:

- Revisión de los antecedentes de estudio de la roca.
- Revisión bibliográfica de los factores que intervienen en el deterioro de las rocas piroclásticas que conforman la fuente Lavapatas y del proceso que sufren los minerales que se presentan en este tipo de roca en el tiempo.
- Descripción macroscópica de la roca a partir del estudio *in situ* reconociendo el tipo de roca presente (Ígnea-metamórfica-sedimentaria-piroclástica), su color (Félsica-Máfica), grado de alteración (intemperismo y meteorización), dureza (de acuerdo a la escala de Mohs) y composición (ácida-básica). Se reconocieron además fracturas, tanto las resultantes de la tectónica regional (origen geológico), como aquellas de origen antrópico. Para el reconocimiento de la orientación y el buzamiento de las fracturas se utilizó una brújula Bronton y la metodología Azimut de rumbo, que permite ubicarlas en un sistema de puntos cardinales terrestres (plano homogéneo) y realizar estudios cinemáticos que permiten definir las direcciones de los esfuerzos propios de la formación si hay lugar a estos. Por medio del programa estereonet se graficaron los datos de orientación medidos y se determinaron familias de fracturas. Estas son fracturas que caen dentro de un mismo rango de orientación.
- Para profundizar en el estudio de las características geológicas se tomaron muestras de diferentes zonas de la Fuente que ilustran diferentes estados de conservación.

Estas fueron montadas en secciones delgadas. En total se estudiaron 12 secciones (0,1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, A-1, A-2, A-3). Se analizaron considerando la identificación de: textura general y local, minerales formadores de roca (primarios) y minerales de alteración (secundarios). Conteo de 250 puntos y tratamiento estadístico para realizar la clasificación composicional de acuerdo a triángulos de clasificación existentes, toma de fotografías de las zonas de la sección más relevantes con respecto a la alteración y consideraciones acerca de

los procesos fisicoquímicos que podrían haber ocasionado la alteración y la presencia de minerales secundarios.

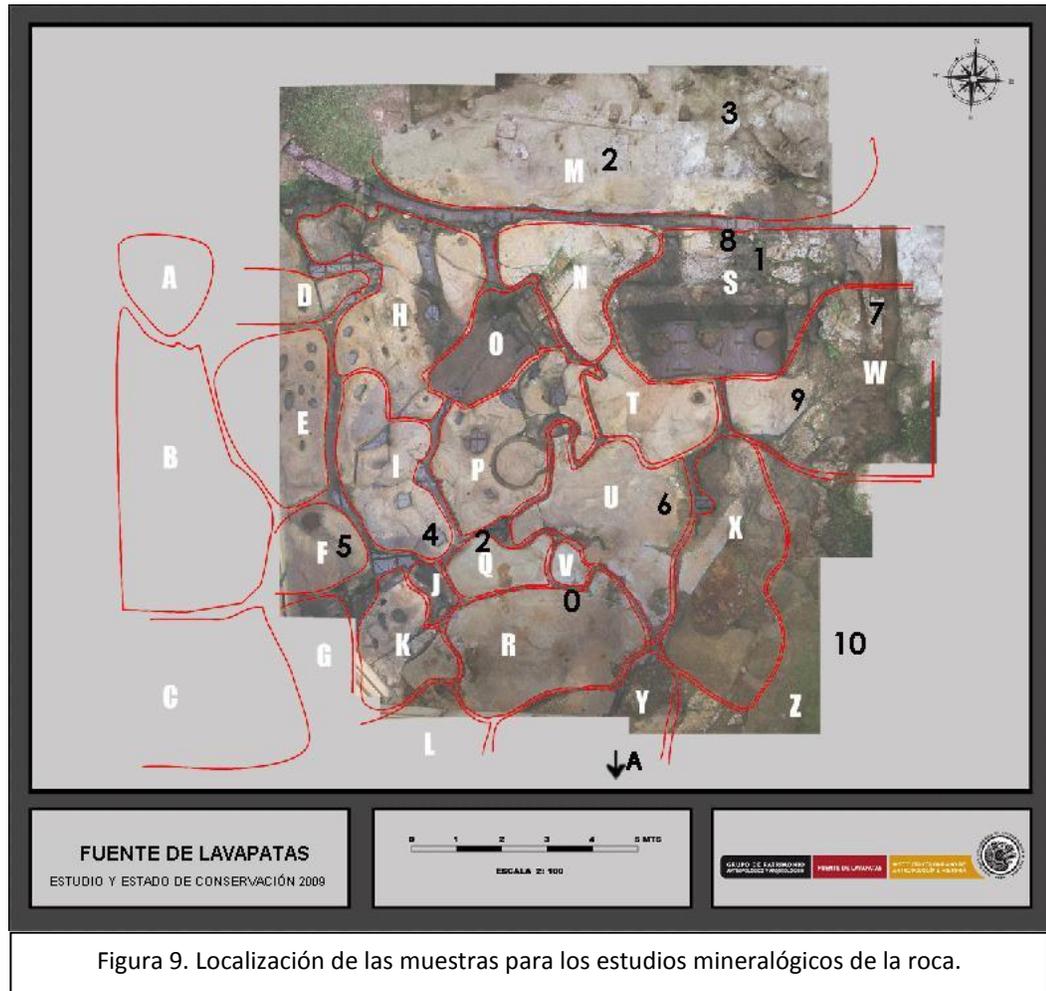


Figura 9. Localización de las muestras para los estudios mineralógicos de la roca.

- **Análisis con Microsonda SEM:** Se realizó sobre una de las muestras pasadas por difracción de rayos X, con el fin de identificar minerales secundarios y primarios, material amorfo, texturas específicas y obtener imágenes representativas de estos, que contribuyeran al entendimiento del proceso de deterioro de la roca. Fue realizado en el laboratorio Gmas Ltda e interpretados por la geóloga Lina Fernanda Martínez y la ayuda del profesor asociado al Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia José María Jaramillo Phd. en Geoquímica.
- **Estudio de espectroscopia de infrarrojo** de una muestra realizado en el Instituto Federal de la Ciencia de la Tierra y Materias Primas BGR, sede Berlín e interpretados por los geólogos Dr. J. Bowitz & Dra. A. Ehling.
- **Difracción de rayos X** en dos muestras de la roca de la Fuente con estados de conservación diferentes realizada e interpretada por el equipo de profesionales del laboratorio Gmas Ltda. Se analizó cuáles de ellas presentaban la mayor

alteración y se procedió a realizar análisis de difracción de rayos X sobre los testigos de las secciones delgadas. Por medio de estos análisis se logró determinar contenido porcentual de minerales primarios, secundarios y material amorfo e identificación de estos.

- **LA FORMACIÓN ROCOSA. DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA Y MINERALÓGICA**

Marco geológico

La Fuente de Lavapatatas se encuentra labrada en depósitos ignimbríticos. Estos constituyen un tipo de rocas piroclásticas o fragmentarias producto de erupciones volcánicas explosivas en las cuales se puede presentar el vaciamiento de la cámara magmática hasta en un 10%. De acuerdo a la mineralogía (cuarzo-plagioclasa-feldespatos potásico) encontrada en las rocas de la Fuente éstas tienen composición andesítica-dacítica hasta riolítica.

Estas ignimbritas, y aquellas encontradas en el Cauca se les puede asignar una edad Plioceno-Pleistoceno y parecen asociarse a la continua actividad volcánica ocurrente en la antigua Caldera de Paletará, localizada en el sector comprendido por el valle de Paletará y la Laguna de San Rafael, municipio del Cauca. En su interior se encuentran la Cadena volcánica de los Coconucos y varias estructuras de origen freatomagmático (Torres et al, 1995). La caldera de Paletará es de gran magnitud, mide aproximadamente 35 km de diámetro y es una caldera de colpaso con volcanismo resurgente, presentado entre otros por la cadena volcánica de los Coconucos y constituiría la fuente en gran parte sino de todas, de las ignimbritas del Cauca y Huila (Torres, et al 1995).

A nivel estructural, en la roca de la quebrada del Lavapatatas se distinguen lineamientos regionales, que si bien no reflejan su verdadera continuidad, son producto de diversos procesos tectónicos que han actuado a lo largo del tiempo geológico y como prueba de esto, se tiene que sus orientaciones son consistentes con estructuras de mayor magnitud. Estos lineamientos fueron aprovechados por los indígenas para acomodar sus tallas, es por esta razón que las formas no son continuas donde hay fracturas. El declive que presenta el terreno donde fueron talladas las formas escultóricas, obedece a una pendiente de aproximadamente 15°.



Figura 10: Detalle de la muestra A tomada del lecho de la quebrada de Lavapatas, cerca del área con tallas

Macroscópicamente las ignimbritas de la Fuente de Lavapatas presentan tonos gris claro a ocre, y un tamaño de grano que va de fino a muy fino. Constan de una matriz vítrea con diferentes grados de alteración desde alto a bajo y fragmentos de cristales, vidrio y pómez dentro de la matriz, dispuestos de forma caótica y orientados de acuerdo a la dirección del flujo de pómez.

La variación de color responde a diferencias composicionales y procesos de alteración. En el primer caso la proporción de minerales ferromagnesianos y su proceso de oxidación es un factor importante en la variación de las características de la roca, tanto del color como de su consistencia. En segundo lugar el grado de meteorización que ésta presenta, afecta profundamente la competencia de la roca en la medida que destruye sus componentes poco a poco y hace la roca deleznable y blanda.

Los análisis microscópicos permiten clasificar la ignimbrita en una composición dacítica – andesítica, hasta riolítica. En las muestras se observa una matriz vítrea fuertemente devitrificada, en la cual predominan los fragmentos vítreos de diversas formas, rodeando fragmentos de cristales de feldespato (anortoclasa?), biotitas y cuarzo. Ocasionalmente se pueden distinguir fragmentos de olivino?, piroxeno? y pómez, estos últimos caracterizados por una vesicularidad baja y una alteración moderada fuerte. En las secciones delgadas las rocas aparecen con alteración moderada a alta, en algunas de ellas se puede distinguir el vidrio transformándose en minerales arcillosos (halloisita, alofana) y otros tipos de filosilicatos (caolinita). Los minerales ferromagnesianos como el anfíbol y la biotita aparecen transformándose en óxidos de hierro.

El resultado de los análisis petrográficos, relacionado con los estudios macroscópicos, de dureza y de absorción de agua de la roca, permitió distinguir tres zonas donde la composición de la roca es diferente y por ende se presentan comportamientos muy

distintos. Estas zonas se denominaron: zona blanda, zona de dureza intermedia y zona de alta dureza.

En las secciones delgadas realizadas sobre muestras de la zona blanda (sectores S, W, X) se observa una roca color gris claro a ocre claro, con oxidación incipiente, nunca comparable con la oxidación de la muestra tomada en la zona de dureza intermedia y alta. El contenido de minerales ferromagnesianos en esta roca es inferior al anterior y la consistencia es más baja. De acuerdo a Fisher (1966) esta roca se clasifica como una toba de ceniza de composición dacítica (Streckeisen, 1976). Pero, su génesis sugiere que es una ignimbrita.

La matriz vítrea es la porción de la roca que mas presenta degradación a arcillas y es el primer producto en alterarse. Esto debido a la ausencia de cristalinidad, mayor superficie de reacción y la baja resistencia del vidrio volcánico al ácido húmico. Además, en las zonas de dureza más baja predominan microfisuras por los cuales se transportan fluidos que poco a poco penetran la roca y disuelven el material circundante.

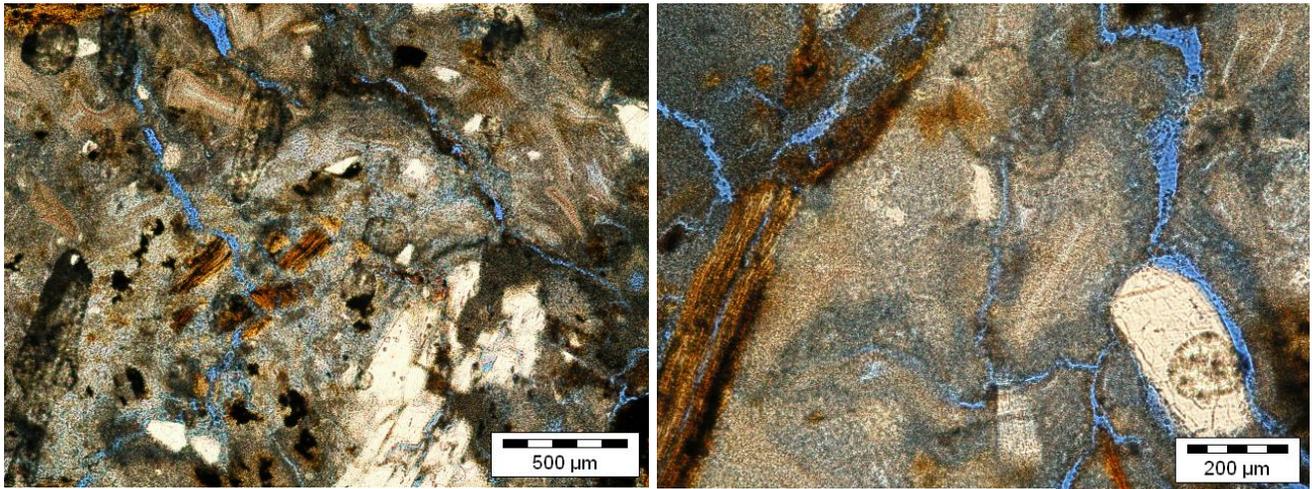


Figura 11: Microfotografías de la sección delgada 1, sector S, zona blanda

En la tabla 1 se presentan los resultados del estudio de difracción de rayos X sobre muestras de la zona blanda y de la zona de dureza alta.

Tabla1: Resultados del estudio de difracción de rayos X de muestras de la zona blanda y de la zona de alta dureza

Muestra	% Halloisita	% Cuarzo	% Calcita	% Goethita	% Anorthoclase	% Zeolita	%Oxido, Hidróxido de Fe	% Amorfos SiO2
M5, zona dureza alta	4.5	.....	.....	11.1	33	6.6	6.9	37.9
M7, zona blanda	13.3	.....	.....	19.9	37.8	12.8	11.4	4.9

Se hace evidente que en la zona blanda (Muestra M7) la roca presenta mayor alteración que en la zona de alta dureza (Muestra M5). De hecho la cantidad de Halloisita, Goethita y Zeolita es mayor en la muestra M7. La presencia de zeolita, un aluminosilicato hidratado, halloisita, una fracción arcillosa y la goethita, un hidróxido de hierro, son evidencia de la meteorización química que ha sufrido la roca desde su formación lo cual es producto de una mayor interacción con el agua. El porcentaje de amorfos que contiene la zona de dureza alta se refiere a la cantidad de matriz vítrea preservada, mientras que en la zona blanda, dado el bajo contenido de amorfos, se puede sugerir que esta ha sido alterada a arcillas y zeolitas.

En la zona de alta dureza (sectores D, E, F, H, I) se encontró una roca de tono ocre rojizo a vinotinto oscuro, masiva, en la cual no se diferencian cristales de ningún tipo a nivel macroscópico. El tono rojizo corresponde a una costra de hierro que cubre la roca producto aparentemente de minerales ferromagnesianos y metálicos que se oxidan. El estudio petrográfico sugiere que esta hipótesis es cierta, de acuerdo con una muestra representativa clasificada como una toba de ceniza (Fisher, 1966) de composición dacítica (Streckeisen, 1976) intensamente oxidada por hematita, la cual actúa como un “cemento” que le proporciona dureza. El óxido puede provenir de minerales ferromagnesianos como biotita y hornblenda, de los cuales se reconocieron algunos cristales de biotita en proceso de oxidación y totalmente oxidados en las secciones delgadas.

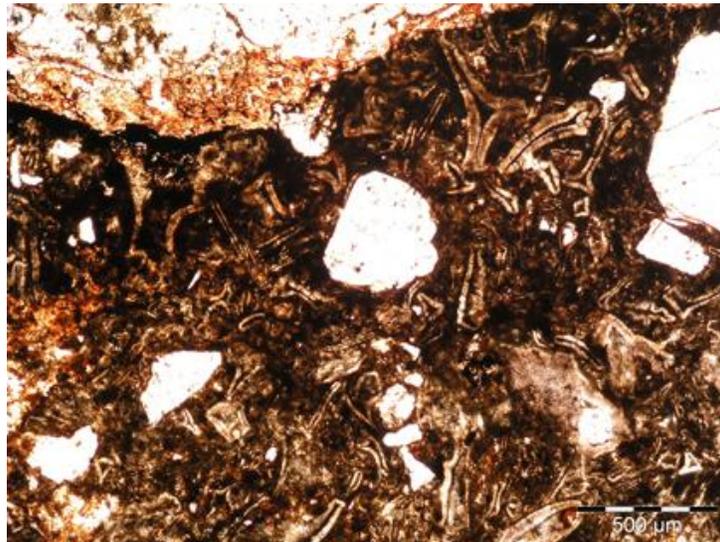


Figura 12: Microfotografía de la sección delgada 5, sector I, zona de dureza alta

Un factor para la formación de esa costra pudo ser la alcalinidad del agua que contribuye con la baja movilidad del hierro y la precipitación de óxidos e hidróxidos, de igual manera, en aguas naturales (pH entre 4 y 9), la solubilidad del hierro es menor. Si bien de acuerdo a los análisis de aguas realizados en la Fuente, el pH del agua que allí circula es ligeramente básico, el estudio *in situ* de la roca de la Fuente no encontró precipitación reciente de hierro. Esto permite suponer que la formación de la costra de hierro es un proceso antiguo que tarda cientos a miles de años en darse.

En la zona de dureza intermedia se encuentra una roca de tono ocre. En las secciones delgadas se observa una toba vítrea dacítica a andesítica compuesta en su mayoría por fragmentos de vidrio y en menor proporción plagioclasa, cuarzo, biotita y fragmentos líticos volcánicos de tamaño lápilli, en medio de una matriz vítrea muy alterada por hematita y localmente devitrificada. La presencia de arcillas de tipo halloisita, masas de zeolitas relleno de espacios vacíos, cristales de plagioclasa corroídos y oxidación parcial y total de biotitas son evidencia de alteración de la roca de la zona de dureza intermedia, baja porosidad que corresponden a un sistema de microfisuras.

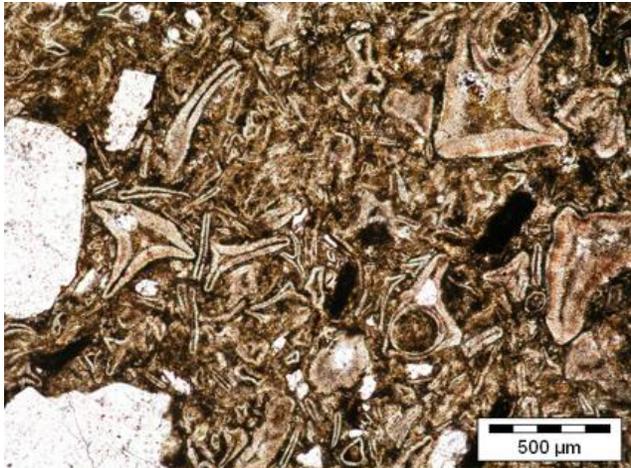


Figura 13: Microfotografía de la sección delgada 0, sector R, zona de dureza intermedia

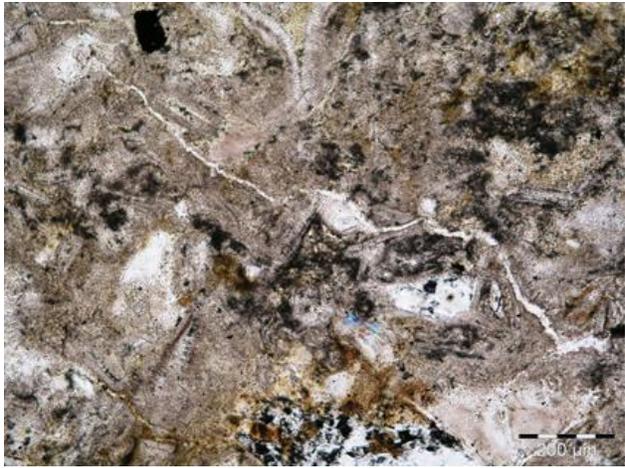


Figura 14: Microfotografía de la sección delgada 6, sector R, zona de dureza intermedia

En síntesis, los estudios geológicos realizados muestran que se trata de una toba de composición dacítica a andesítica. Las tres zonas se diferencian en particular por el grado de la alteración. Por ejemplo, arcillas como la halloisita y el alófono, producto de la descomposición del vidrio volcánico, están presentes en la composición de casi la totalidad de la roca, sin embargo es en las zonas de menor dureza donde estas arcillas se encuentran en mayor cantidad. Estas arcillas retienen agua haciendo que el efecto degradante sobre la matriz vítrea se potencie. Además son arcillas expansivas que por el efecto de expansión y contracción, deterioran la roca.

De igual manera a nivel microscópico se observa la textura propia de las rocas piroclásticas donde coexisten abundantes fragmentos de cristales distribuidos de manera heterogénea. Por ejemplo, se observan zonas en las secciones delgadas constituidas por cristales de tamaño medio a fino y poca matriz, seguidos de otra zona con minerales y cristales de menor tamaño y mayor cantidad de matriz con respecto a los cristales. En la transición de una zona a otra es donde posiblemente la roca es más vulnerable.

- **ESTUDIO *IN SITU***

- a. **Las Fracturas**

En el estudio *in situ* de la roca, se desarrolló la identificación y clasificación de fracturas de acuerdo a su origen: geológico y antrópico.

Las fracturas de origen geológico, relacionadas a los procesos tectónicos ocurridos después de la formación de la roca, tienen rasgos morfológicos muy claros como su tendencia recta y cierta continuidad, y pueden presentar orientaciones aleatorias o repetitivas, caso en el cual se le agruparía como familia de fracturas.

Para este caso específico las fracturas encontradas no se pueden asociar dentro de familias, ya que sus orientaciones no son similares y aunque a simple vista parecieran ser paralelas entre sí, la dirección del buzamiento no es un punto común entre ellas. Se encontraron fracturas principales, que sobresalen por su continuidad y fracturas secundarias a expensas de las principales cuya continuidad es menor, pueden ser ligeramente paralelas a las principales o no serlo y se caracterizan por presentar sinuosidad a diferencia de las principales que son rectas.

En color verde (ver figura 10) se observan las fracturas que guardan cierta similitud en su orientación pero que no constituyen una familia.

El color café representa dos fracturas de orientaciones opuestas a las de las fracturas en verde.

En cuanto a las fracturas de origen antrópico, éstas fueron generadas por la talla o la construcción del cobertizo de los años 40s y se ramificaron en pequeñas fisuras (ver figura 22).

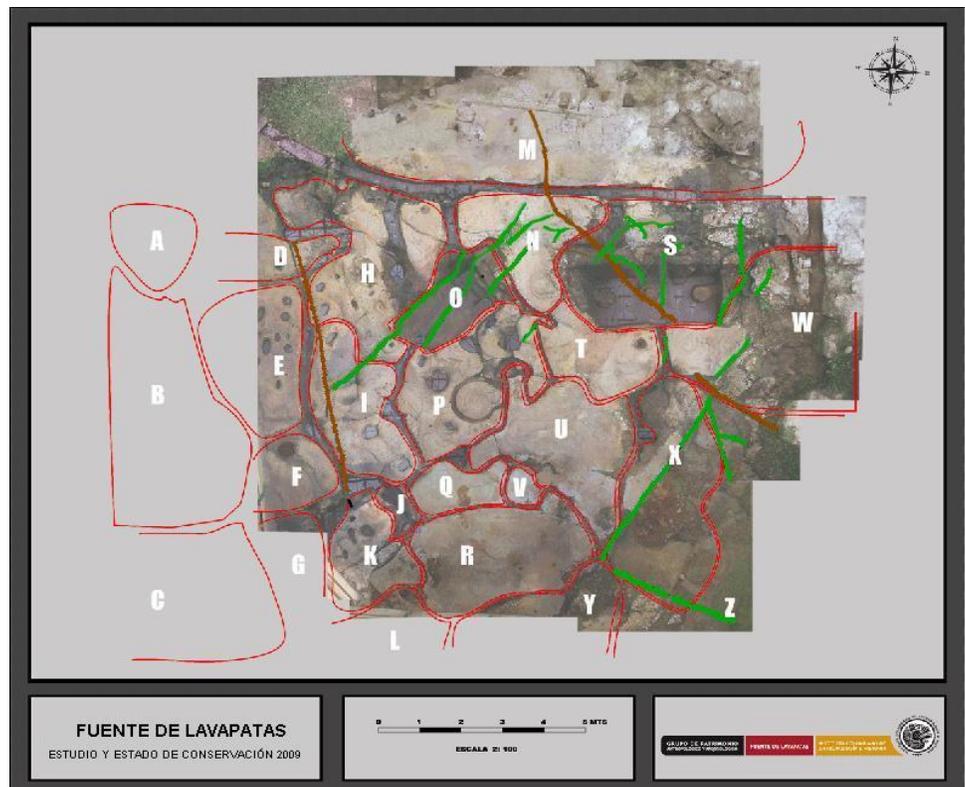


Figura 15. FRACTURAS

Fracturas propias de la formación rocosa. -----

Fracturas propias de la formación rocosa con orientación opuesta a las de color verde -----

b. La Dureza de la superficie

Al realizar el registro de dureza el procedimiento fue hecho de manera puntual sobre toda la superficie cuidando de no afectar la apariencia de la roca, teniendo en cuenta la escala relativa de dureza de Mohs.

El estudio se desarrolló deteniendo el flujo de agua en la Fuente por un lapso de tiempo de 2 días. En este tiempo se pudo observar el comportamiento durante el secado superficial de la roca. La mayoría de la superficie rocosa en el costado oriental y en el centro (sectores D, E, F, G, H, I, N, O, P, T, U) se secó a una mayor velocidad. En otras zonas en el costado oriental (sectores S, W, X, Y, Z) el secado fue más lento, de hecho un día después, la superficie seguía húmeda. Para la evaluación de los resultados de dureza es importante tener en cuenta que el estudio no se pudo desarrollar en condiciones de sequedad homogénea para todas las superficies, pues aunque en el sector occidental y central la superficie rocosa estuvo seca, en el costado oriental, exceptuando el sector M la roca aún se encontraba húmeda. Esto es importante debido a que según Moraes (2007: 869), la dureza de una roca mojada disminuye hasta un 50 % en comparación con la dureza en estado seco.

De acuerdo con esto, los datos esperados en el sector oriental serían de una dureza baja debido a la presencia de humedad en la superficie rocosa al momento del estudio de esta propiedad, sin embargo, estos valores también se pudieron comparar con el sector M de la parte oriental que por su ubicación hoy en día siempre se encuentra seco, donde también se registró una baja dureza. De acuerdo con esto se pudo establecer que la menor dureza en esta zona no sólo se debe a la presencia de humedad en la parte baja del costado oriental, sino que corresponde a una característica geológica que permitió entender estas partes (sectores M, S, W, X, Y, Z) como las zonas de menor dureza.

En general, al registrar la dureza de la superficie rocosa se encontraron entonces tres niveles de dureza (figura 10): Uno menor a 2.5 (color morado), otro comprendido entre 2.5 y 5.5 (color azul grisáceo) y finalmente uno superior a 5.5 (azul cyan).

Con el registro de la dureza se pudo establecer que existe una relación con la pérdida de detalles en las formas talladas, pues se observó que en la zona de mayor dureza aún se pueden ver huellas de las herramientas de talla que en cambio no aparecen en la zona de dureza intermedia ni en la zona más blanda. También se observó en estas dos zonas (sectores S y W) que la estructura rocosa es extremadamente frágil y decohesa, de hecho las partículas se desprenden con facilidad cuando se hace la prueba al tacto.

La falta de un registro confiable y un sistema de monitoreo que considere esta característica no permite hoy establecer la velocidad con la que se ha desarrollado este deterioro.

El estudio de la dureza junto con el estudio de secciones permitió comprobar que la roca presenta durezas distintas que aparentemente están relacionados con su composición. En efecto en la zona dura se observa cómo la superficie de la roca está recubierta por una costra de hierro que le confiere mayor dureza, mientras que en las secciones delgadas tomadas de la zona blanda se encontró un contenido mayor en arcillas.

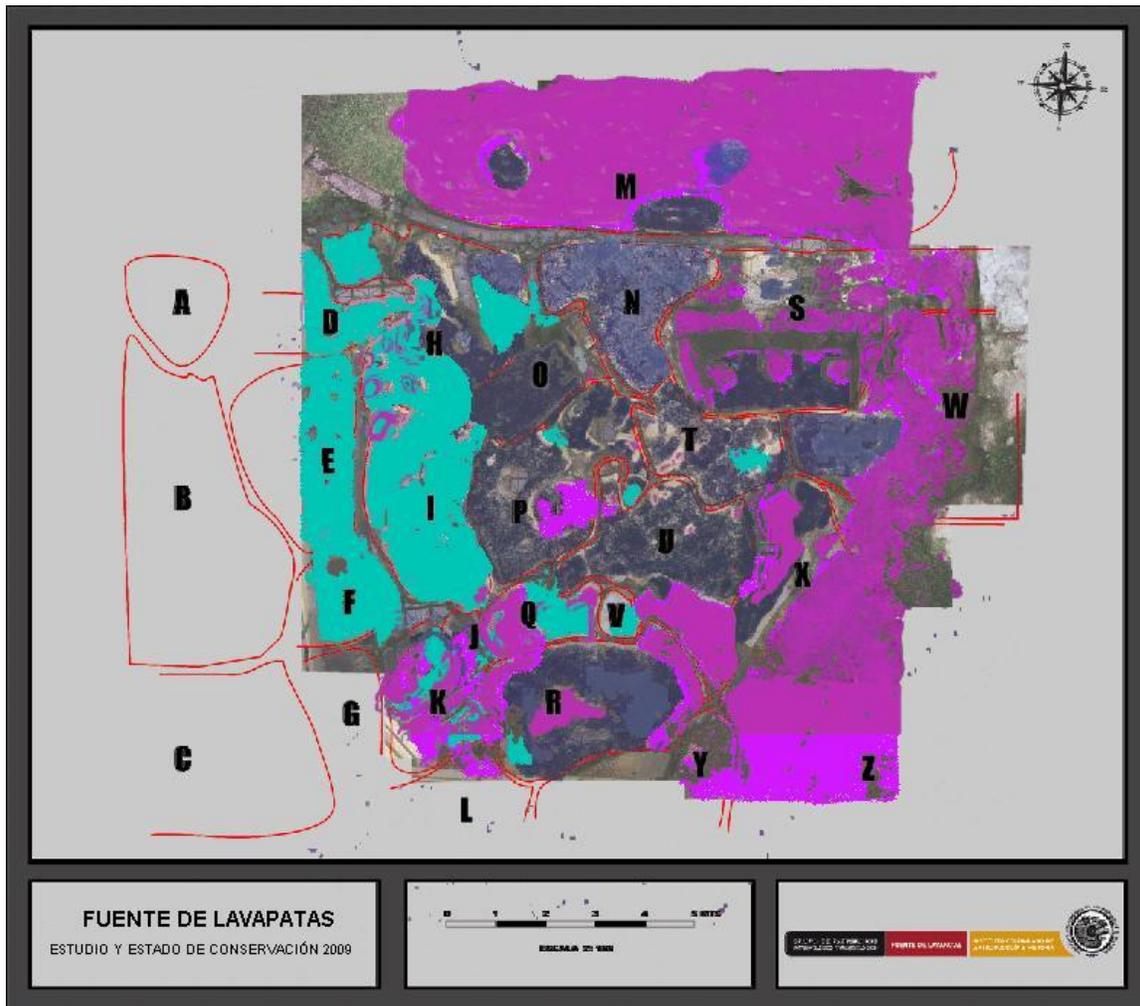


Figura 16.

- Dureza inferior a 2.5 en la escala de Mohs ———
- Dureza media comprendida entre 2.5 y 5.5 ———
- Dureza superior a 5.5 en la escala de Mohs ———

2.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ROCA

Helen Jacobsen, María Paula Álvarez*

Para comprender el comportamiento de la roca frente a la humedad y la temperatura, y establecer el nivel de deterioro en el que se encontraba, era necesario conocer las características físicas de este material. Esta necesidad de hecho, se venía planteando en los estudios que sobre el estado de conservación se habían realizado en los años 80's y 90's (Useche, 1984; Bautista, 1994; Castillo & Pérez, 1996) y, aunque en 1997 se hizo un intento por determinar las características físicas de la roca y se tomaron una serie de muestras¹, finalmente éstas no fueron analizadas y el tema quedó sin resolver.

Fue así como en el 2009 se realizó el estudio de las características físicas de la roca cuya metodología propuesta Snethlage y Wendler (1995) y Sasse, Snethlage (1996) se describe a continuación:

Metodología:

- Evaluación *in situ* de la absorción por capilaridad
- Toma de muestras. Se tomaron 8 de las zonas aledañas a la Fuente y una de gran volumen directamente proveniente del lecho
- Preparación de muestras en laboratorio (núcleos cilíndricos de 5 cm de diám. y alturas diferentes, secciones cilíndricas de 5 cm de diám. y 0,5 cm a 1cm de espesor y rectángulos de 3cm x 1cm x 1cm)
- Caracterización mineralógica de las muestras.
- Evaluación en laboratorio de las muestras mediante métodos estándares para determinar la absorción de agua, la velocidad ultrasonido, expansión hídrica, porosidad, expansión térmica, la resistencia de tensión flexión y el módulo estático de la elasticidad. La siguiente tabla explica los métodos y procedimientos empleados en cada uno de los análisis.

Tabla 2. Metodología para la evaluación de las características físicas de la roca	
1. propiedades y características relativas al espacio de poros	
Porosidad accesible al agua	Norma del Instituto Alemán de Normalización DIN 52102
Densidad aparente y densidad real	Norma DIN 52102
Porosimetría de intrusión de mercurio (PIM)	Norma DIN 66133

¹“el equipo de Colcultura tomó 9 muestras que debían ser analizadas en laboratorio de tal manera que se pudiera conocer la porosidad, distribución del tamaño de los poros y grado de comunicación, absorción de y permeabilidad al vapor de agua. Sin embargo estos análisis no fueron realizados.” (Alvarez et al, 2008)

2. características de transporte de humedad	
Coeficiente de absorción de agua por capilaridad <i>in situ</i>	Tubo Karsten de 25 mm de diámetro (Karsten 1983; Wendler y Snethlage, 1989)
Coeficiente de absorción de agua por capilaridad en laboratorio	Norma DIN 52617
Permeabilidad al vapor de agua	Norma DIN 52615, "wet-cup"
Expansión hídrica	Norma DIN 52450
3. Resistencia mecánica	
Resistencia de tensión flexión y el módulo estático de la elasticidad	Wittman y Prim, 1985. Sattler, 1992. Cálculo de acuerdo con Kozub, 2008
4. Otros	
Velocidad de ultrasonido	Generador ultrasonido, 350 kHz de frecuencia
Expansión térmica	Norma 53752, montaje de ensayo desarrollado en Fachhochschule Potsdam, Alemania. (Menzl y Schmeikal, 2002)

- **ESTUDIO *IN SITU*. Absorción de agua por capilaridad:**

Para poder realizar el estudio de absorción de agua *in situ* fue necesario interrumpir el flujo de agua por un lapso de 3 semanas, para realizar el estudio sobre la roca seca. Es importante mencionar que después de un secado de 3 semanas el costado oriental aun se encontraba húmedo a excepción del sector M. Se llevó a cabo el estudio entonces en diez puntos de la Fuente (sectores, I, M, P, R, T) localizados en la zona occidental y centro de la Fuente mientras que no se realizó la prueba en la zona oriental. Las pruebas fueron realizadas en sectores que muestran características superficiales diferentes.

Tabla 3: descripción de las zonas estudiadas y los resultados obtenidos

Descripción de la zona de medición	Zona en muy buen estado de conservación	Zona con deterioro: decohesión	Zona con deterioro: desprendimiento
Denominación del punto de medición	1,2,6,7,10	8,9	3,4,5
Absorción de agua [l/m ² h ^{0,5}]	0 - 1,6	5 - 5,8	0 - 1,7 l

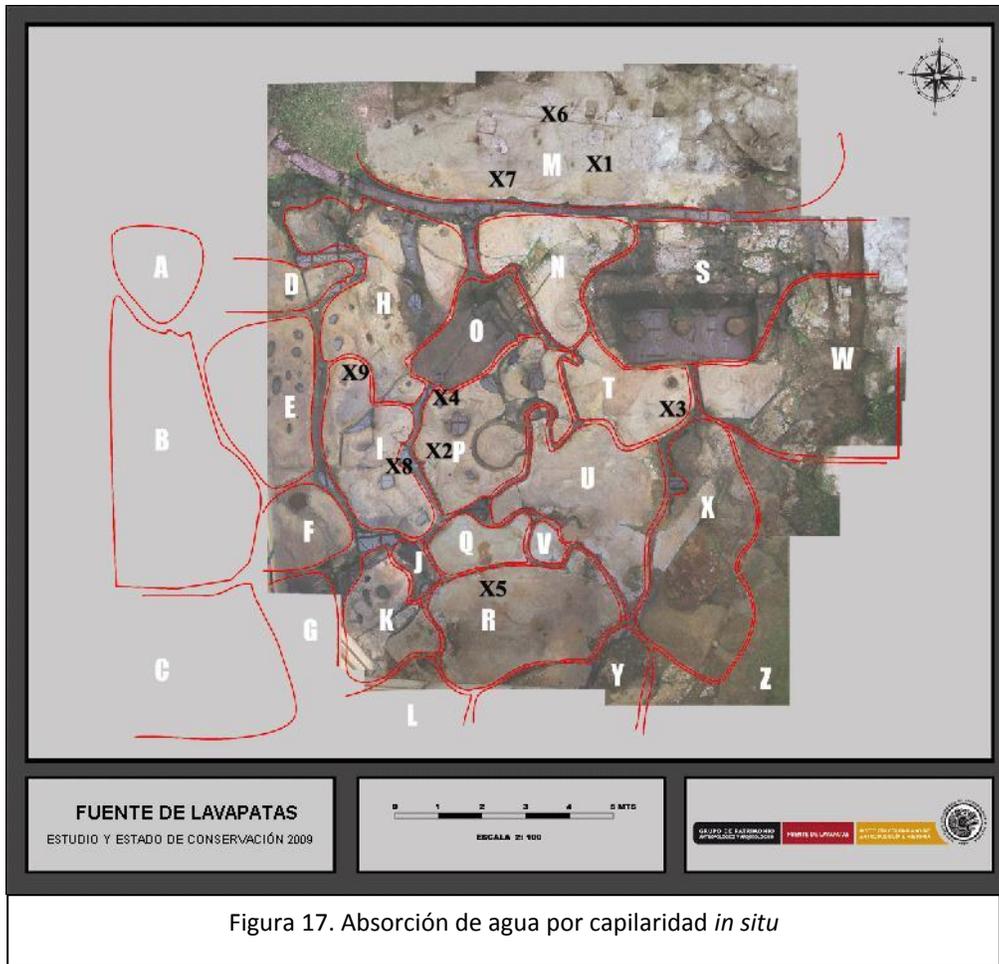


Figura 17. Absorción de agua por capilaridad *in situ*

En las zonas donde la roca se encuentra en buen estado, no sólo por su apariencia visual sino también al tacto, no se evidencia decohesión, el coeficiente de absorción w registrado se encuentra entre 0 y $1,6 \text{ l/m}^2\text{h}^{0,5}$. Estos resultados muestran un coeficiente muy bajo lo que implica dos posibles situaciones: (i) que la piedra es poco porosa o (ii) por el contrario la piedra es porosa pero los poros no están conectados entre sí.

Una tercera posibilidad fue planteada por Wendler en la Mesa de Trabajo realizada en marzo de 2012. En ella plantea (iii) que se ha formado sobre la superficie pétreo una capa de oxalato que impide la entrada de agua.

Lo mismo sucede en las zonas que parecen estables, pero que sin embargo al hacer la prueba acústica registraron sonidos graves, prueba de que existen desprendimientos. Estas alteraciones son oquedades o discontinuidades dadas en profundidad en la piedra. El coeficiente de absorción de agua encontrado en estas zonas es bajo, con valores entre 0 y $1,7 \text{ l/m}^2\text{h}^{0,5}$ lo que muestra que los desprendimientos tienen características similares a las de las zonas estables.

En las zonas que presentan decohesión, el coeficiente de absorción de agua es mucho más alto, corresponde a $5 \text{ l/m}^2\text{h}^{0.5}$ y valores aún mayores. Lo anterior evidencia que en estas zonas se presenta una porosidad mayor y una mayor conexión entre los poros. Esto podría deberse a procesos de meteorización de la roca, que propiciaron la formación de fisuras.

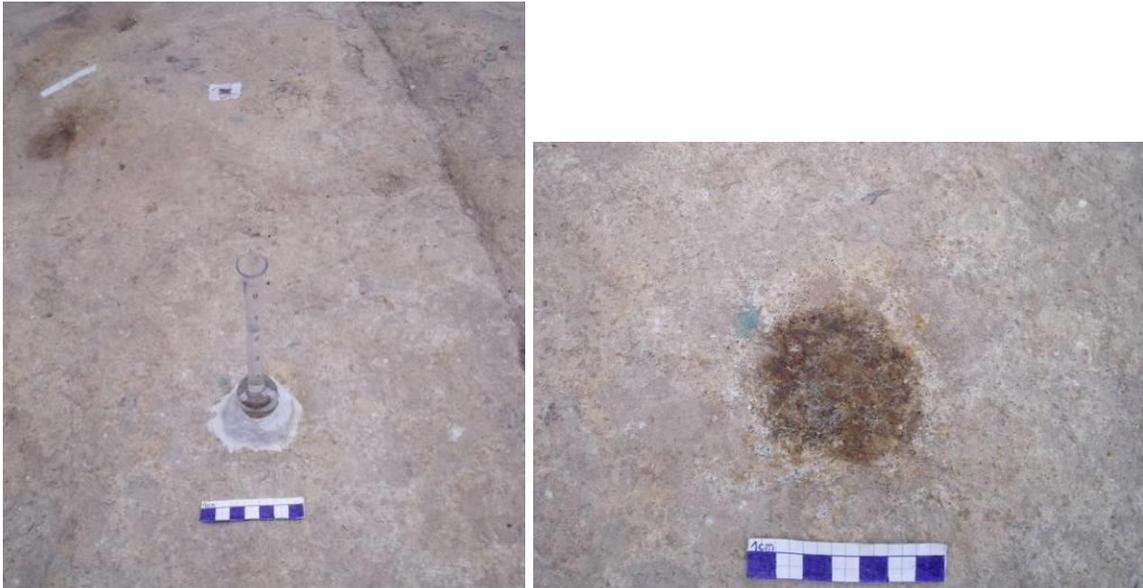


Figura 18: Prueba 7, sector M, zona en buen estado de conservación.

Durante la medición de la absorción con el tubo de Karsten.

Figura 19: Después de la medición de la absorción la mancha de agua no es mucho más grande que el diámetro del tubo de Karsten lo que muestra que hay muy poco transporte de agua.

En el costado oriental, que se encontraba todavía muy húmedo después de 3 semanas de secado, se puede anticipar el registro de una alta absorción de agua.

Lo anteriormente expuesto permite comprender que, si bien el agua ha sido considerada como uno de los principales factores de deterioro, debido a que la absorción de agua que se registra en una gran parte de la Fuente es baja o nula, el papel que juega allí debe replantearse. El agua entonces, en las zonas donde la roca se encuentra estable, no es el factor determinante del deterioro. Esto a su vez explica el por qué esta toba no tiende a descomponerse rápidamente en interacción con agua sino que su deterioro es lento y se manifiesta por medio una lenta erosión de la superficie.

Por el contrario, en la zona oriental y en todas las zonas decohesas donde la absorción es alta, el agua es un factor determinante de los procesos de deterioro.

- **ESTUDIOS EN LABORATORIO**

Para llevar a cabo el estudio en laboratorio de las características físicas era necesario contar con muestra de roca de gran tamaño.

Considerando el valor histórico de la Fuente, en 2009 se había decidido que para no extraer una muestra de ese tamaño de la formación rocosa en cuestión, se tomaría de zonas aledañas buscando que presentara características macroscópicamente similares. El estudio fue entonces realizado en 2009 sobre muestras tomadas de zonas aledañas, sin embargo, si bien se trataba también de tobas, éstas presentaban diferencias geológicas con la roca de la Fuente y por tanto los datos obtenidos no resultaron del todo confiables. Por el contrario se hizo evidente que en la toba las características de la roca varían de un lugar a otro por su heterogeneidad. De hecho, todas las muestras analizadas presentaron grandes diferencias tanto en sus características geológicas como en sus características físicas. Este resultado indicó que era necesario tomar una muestra del propio lecho de la quebrada de Lavapatás.

En 2011, aprovechando que se requerían muestras para el estudio del material consolidante, se tomó la muestra A de una zona ubicada 10 metros al sur de donde acaba el cobertizo y en donde no hay evidencia de talla prehispánica. Dicha muestra corresponde con la zona de dureza intermedia. Los datos obtenidos en el estudio de sus características físicas ilustran del comportamiento de la roca de la Fuente en esta zona y se presentan a continuación.

Se estima que la roca, tanto en la zona de dureza alta como en la zona blanda tiene algunas variaciones en las características, sin embargo los resultados obtenidos a partir de la muestra A plantean un marco general que da cuenta de las características de esta ignimbrita.



Figura 20. Zona del lecho de la quebrada donde se tomó la muestra A en 2011

Propiedades y características relacionadas con la porosidad

En la tabla 4 se presentan las principales propiedades relativas a la porosidad de la roca de la Fuente.

Tabla 4: Principales propiedades relativas a la porosidad de varias probetas de la muestra A

Propiedades		Margen total	Promedio y (desviaciones estándar)	
Porosidad accesible al agua [%]		28,4 – 33,05	30,5 (±2,07)	
Densidad real [kg/m ³]		2461 – 2481	2471,9 (±13,5)	
Densidad aparente [kg/m ³]		1661 - 1781	1717,9 (±53,0)	
Porosidad total (PIM) [%]			32,13	
Porcentaje de volumen total de poros – PIM (%)	Diámetro de poro > 5µm		6,47	
	Diám. de poro 0,1µm - 5µm		68,91	
	Diámetro de poro < 0,1 µm		24,61	
	Los Máximos:			
	Diám. de poro 0,1µm – 0,2µm		11,47	
	Diám. de poro 0,2µm - 0,5µm		32,42	
	Diám. de poro 0,5µm - 1 µm		12,92	

(Las desviaciones estándar se muestran entre paréntesis. Cuando no hay desviación estándar, esto indica que la medición se llevó a cabo utilizando sólo una muestra. Se presenta también el margen total de los resultados, en las propiedades en las que se obtuvo un amplio rango de valores)

La roca tiene con un 30 Vol-% una porosidad relativamente alta en comparación con otros tipos de roca pero, se encuentra en la gama general de las tobas que en su mayoría son rocas con una alta porosidad.

La distribución del tamaño de los poros muestra que gran parte de éstos presentan un diámetro entre 0,1 y 5 µm (Klopfer, 1985), permitiendo que el agua penetre por capilaridad. El 25% de los poros tienen un diámetro pequeño de 0,1 µm, correspondiendo a microporos en los cuales se produce condensación por capilaridad. Son pocos los poros que tienen un diámetro mayor a 5 µm.

Por lo mencionado se podría decir que la toba de la Fuente en cuanto a la porosidad, muestra un espectro equilibrado, en comparación con otras tobas volcánicas que tienen microporosidades altas.

Características de transporte de humedad

En la tabla 5 se presentan las principales características de transporte de humedad de la roca en el Lavapatatas.

Tabla 5: Principales propiedades relacionadas con características de transporte de humedad de varias probetas de la muestra A.

Propiedades	Margen total	Promedio y (desviaciones estándar)
Coefficiente de absorción de agua w [kg/m ² h ^{0,5}]	3,96 – 11,6	7,57 (±2,58)

Coeficiente de absorción de agua w [$l/m^2h^{0,5}$] <i>in situ</i>	0 – 1,7	0,84 ($\pm 0,64$)
Factor de resistencia al vapor de agua μ [adimensional]	11,4 – 14,6	13,4 ($\pm 1,8$)
Expansión hídrica $1-\varepsilon$ [mm/m]	0,816 – 1,567	1,05 ($\pm 0,35$)

(Las desviaciones estándar se muestran entre paréntesis. Cuando no hay desviación estándar, esto indica que la medición se llevó a cabo utilizando sólo una muestra. Se presenta también el margen total de los resultados, en las propiedades en las que se obtuvo un amplio rango de valores)

Las muestras estudiadas en laboratorio presentan un coeficiente de absorción de agua que se enmarca en una gama amplia de valores, éstos oscilan entre 3,96 y 11,6 $kg/m^2h^{0,5}$. Considerando que todas las muestras provenían de una sola roca con dimensiones 50 x 30 x 20cm, resulta evidente la heterogeneidad de la toba. En general la absorción de la muestra A se considera muy alta y pese al amplio espectro de los resultados y que el valor más bajo registrado fue 3,96 $kg/m^2h^{0,5}$, según la clasificación de las rocas en cuanto a su permeabilidad al agua, se considera que ésta ignimbrita “absorbe mucho” (Bliefert et al., 1997).

Tomando en cuenta la alta absorción de agua y el contenido en arcillas expansivas de la muestra A no es sorprendente que los núcleos estudiados presenten expansión hídrica. Los valores entre 0,81 – 1,57 mm/m permiten caracterizar esta roca como de expansión hídrica alta. Este grado de expansión hídrica es considerado como un factor importante del deterioro.

De la mencionada alta porosidad (30 Vol-%) resulta también una permeabilidad alta. El factor de resistencia al vapor de agua μ está entre 11 y 15, rango esperado para una toba y muy bajo en comparación con otros tipos de roca.

Los resultados presentados de la roca A necesitan ser discutidos más detalladamente y estudiados con mayor rigurosidad pues como ya fue descrito para gran parte de la Fuente, (zonas occidental y central) la absorción de agua no fue alta.

Estas diferencias plantean entonces la necesidad de revisar el tema y de postular dos posibles hipótesis. Es posible que la piedra en las zonas de alta y mediana dureza tenga menos poros o menos poros interconectados. También podría ser posible que en la superficie de la roca se hubiera formado una capa de oxalatos que impide la entrada de agua, lo cual podría explicar la baja absorción registrada.

En los dos casos, la interacción del agua con la roca resulta favorable para la estructura rocosa, pues al no penetrar el agua al interior, ésta no juega un papel importante en el deterioro pues no causa ni dilatación, ni contracción, ni alteración química.

Al mismo tiempo, el que no entre agua, o entre muy poco, en la estructura rocosa de la zona occidental y central, establece que la absorción de agua de estas zonas es muy diferente a la roca A. De lo que resulta que otras características de la roca en relación

con la presencia de agua como la expansión hídrica también difieran de los resultados de la roca A. De hecho si hay muy poca absorción de agua, no se debería dar tampoco una marcada expansión hídrica.

Con los resultados obtenidos con la muestra A podría plantearse una hipótesis basada en sus características de transporte de humedad y absorción de agua, estableciendo una correspondencia con las propiedades de la roca ubicada en el costado oriental de la Fuente, donde la absorción de agua es alta.

Los resultados de la absorción y de la dilatación hídrica en laboratorio permiten entender que en esta parte de la Fuente el agua es un factor importante en el deterioro pues provoca una dilatación importante cuando penetra en la estructura rocosa y una contracción cuando se seca la roca. Al mismo tiempo la presencia de agua en la estructura rocosa favorece procesos de alteración química.

Dentro del estudio todavía no se han evaluado las características del secado sin embargo considerando la alta absorción de agua y las observaciones *in situ* (la piedra se encontraba todavía muy húmeda tras 3 semanas de secado), puede establecerse que el proceso de secado en esta zona es lento. Eso se puede considerar en parte como una ventaja, pues al haber un secado lento, la contracción también sería gradual, y en parte como una desventaja pues el agua da paso a la alteración química.

Otras características físico-mecánicas

Tabla 6: Otras características físico-mecánicas de la muestra A)

Propiedades	Margen total		Promedio y (desviaciones estándar)
Resistencia a la tensión-flexión [N/mm ²]	1,25 – 3,35		2,16 (±0,88)
Módulo estático de la elasticidad [kN/mm ²]	0,22 – 0,82		0,47 (±0,23)
Expansión térmica α [10^{-6} / K] a 30°C a 40°C a 50°C a 60°C	<u>Orientación x</u>	<u>Orientación y</u>	
	0 – 1,0	4,06	
	3,2 – 7,3	4,36	
	5,56 – 6,67	5,75	
Expansión térmica [mm/m] de 20°C a 30°C de 20°C a 40°C de 20°C a 50°C de 20°C a 60°C	<u>Orientación x</u>	<u>Orientación y</u>	
	0 – 0,057	0,047	
	0,063 – 0,144	0,094	
	0,143 – 0,188	0,182	
de 20°C a 60°C	0,191 – 0,285	0,242	
Velocidad de ultrasonido V_L [km/s]	0,8– 1,06		1,0 (±0,1)

Para la roca original se determinó que la dureza se enmarca en un rango de valores que va de 1,4 a 3,4 N/mm² y un módulo estático de elasticidad entre 0,22 y 0,82 kN/mm². La dureza, comparando con otros tipos de roca, es relativamente baja, pero se encuentra dentro de la gama de valores de las tobas que son rocas bastante blandas. El módulo estático de la toba es muy bajo lo que significa que el material es bastante elástico lo que es considerado como favorable.

Partiendo del planteamiento que supone que el rango de valores obtenidos se puede aplicar a la roca de toda la Fuente², tenemos que posiblemente las zonas que de alta dureza seguramente presentan valores un poco más altos, mientras para las partes que siempre están húmedas (costado oriental) pueden ser más bajos.

La velocidad de ultrasonido de la altura de los núcleos extraídos de la roca A fue de 1 km/s. Esta resulta ser muy baja no solamente en comparación con otros tipos de roca, sino también con los resultados obtenidos por otros estudios de toba (J. Paul Getty Trust e Instituto Hondureño de Antropología, 2006) Esta baja velocidad de ultrasonido registrada, da por un lado cuenta de las múltiples discontinuidades y fisuras dentro de la estructura rocosa. Al mismo tiempo también influencia la orientación de los núcleos que se extrajeron en sentido vertical a la textura de la roca. En efecto en tanto que las medidas se realizaron en la altura del núcleo y por tanto en el sentido vertical a la textura, siguieron verticalmente las discontinuidades lo que baja mucho la velocidad.

En cuanto a la expansión térmica se determinó que la roca empieza a expandir una vez la temperatura aumenta de 20°C a 30°C. Sin embargo, esta expansión en datos absolutos, tiene un máximo de 0,057 mm/m en la orientación (x) y 0,047 mm/m en la orientación (y) lo que corresponde a valores muy bajos. Esto se hace todavía más evidente si se comparan estos datos con la expansión promedio 1,05 mm/m registrada cuando la roca absorbe agua. A esto se suma que la variación de la temperatura durante el día es muy equilibrada lo que hace que el impacto sobre la roca sea todavía menor. La expansión se incrementa con el aumento de la temperatura pero como se comprobó en la medición de las temperaturas superficiales de la roca de la Fuente, hoy en día la piedra puede experimentar una variación entre 13°C y máximo 33°C, y por tanto no hace falta evaluar la expansión térmica a temperaturas mayores a éstas.

También es importante mencionar que en las pruebas de laboratorio la roca se calentó constantemente por un tiempo de 30 min sin la influencia del viento o la sombra de las nubes, y que en la Fuente es probable que la temperatura registrada en superficie sea menor hacia el interior de la roca.

Estas observaciones permiten deducir que en las partes en las que la absorción de agua es alta, la expansión hídrica es mucho más influyente que la expansión térmica. En cuanto a las partes con baja absorción de agua, el proceso de expansión térmica no

² Dr. E. Wendler, Mesa de Trabajo internacional, Bogotá febrero, 2012.

debería afectar la conservación de la roca por las relativamente bajas temperaturas y el equilibrado calentamiento durante un día.

2.2.3 Conclusiones de las características de la roca

El reconocimiento de la roca de la Fuente, tanto *in situ* como en el laboratorio, demostró que se trata de una toba volcánica dacítica a andesítica. La roca tiene un alto contenido de ceniza, fragmentos minerales y contiene arcillas expansivas como la halloisita y el alófono.

El aporte más importante de este estudio fue entender la heterogeneidad de la toba en un área de dimensiones no tan grandes y determinar a partir de los estudios tres zonas nombradas zona de alta dureza, zona de dureza intermedia y zona blanda.

La zona blanda, situada en el costado oriental, se caracteriza por una baja dureza y principalmente por su alta absorción de agua. En las secciones delgadas se observa un cambio marcado de la matriz vítrea en arcillas. Los estudios en laboratorio proponen que la absorción de agua provoca una dilatación hídrica que puede ejercer una presión importante sobre la estructura pétreo.

La zona de dureza intermedia presenta una baja absorción de agua, lo cual hace que el agua no sea un factor determinante en el deterioro de esta zona. De igual manera, la expansión térmica tampoco es un proceso determinante para su deterioro, pues el impacto que tiene la radiación solar en la conservación del sitio es poco relevante.

La zona de alta dureza está cubierta por una costra de óxidos de hierro que le confieren una alta dureza y una absorción de agua muy baja, lo cual hace que el agua no sea un factor determinante en el estado de conservación de la roca de esta zona.

2.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS DETERIOROS DE LA ROCA

Helen Jacobsen y María Paula Álvarez*

Si bien en décadas anteriores se habían llevado a cabo varios levantamientos del estado de conservación de la Fuente de Lavapatas (Bautista: 1993, ICANH: 1994), el objetivo de un nuevo levantamiento era llenar vacíos existentes en estudios anteriores y completar información con nuevos análisis. Además levantar estos datos en formatos que documentaran el estado de conservación y puedan ser usados en monitoreos futuros.

La identificación, realizada en 2009, siguió la siguiente metodología:

Metodología

- Identificación de los deterioros de la roca
- Descripción y registro fotográfico de los deterioros, siguiendo el estándar internacional (Fitzner, Heinrichs, Kownatzki 1995; ICOMOS 2008).
- Levantamiento gráfico *in situ* de los deterioros y transferencia al software Photoshop

Resultados

Los deterioros identificados, descritos, registrados y graficados se describen a continuación:

- a) Deterioros causados por el cobertizo anterior,
- b) Fisuras,
- c) Desprendimientos y
- d) Decohesión.

En el tema de los deterioros también es importante considerar el levantamiento de las fracturas geológicas (capítulo 2.2.1) y del biodeterioro (capítulo 2.5). No se levantaron pérdidas de formas y tampoco la erosión de la superficie pues no se contaba con levantamientos más antiguos que permitieran hacerlo.

a. DETERIOROS CAUSADOS POR EL COBERTIZO ANTERIOR

Al construir el cobertizo se ocasionaron deterioros en algunas zonas del lecho de la Fuente pues se tallaron huecos para construir las bases de cemento que soportaban la estructura de madera. La talla de estos huecos generó fracturas y fisuras en el sector M, donde se observa además exceso de cemento que recubre la roca, dichos deterioros aparecen registrados en el gráfico a continuación.



Figura 21: Huevo tallado para la construcción de la cubierta en los años 40. En el primer plano se observan residuos de cemento.

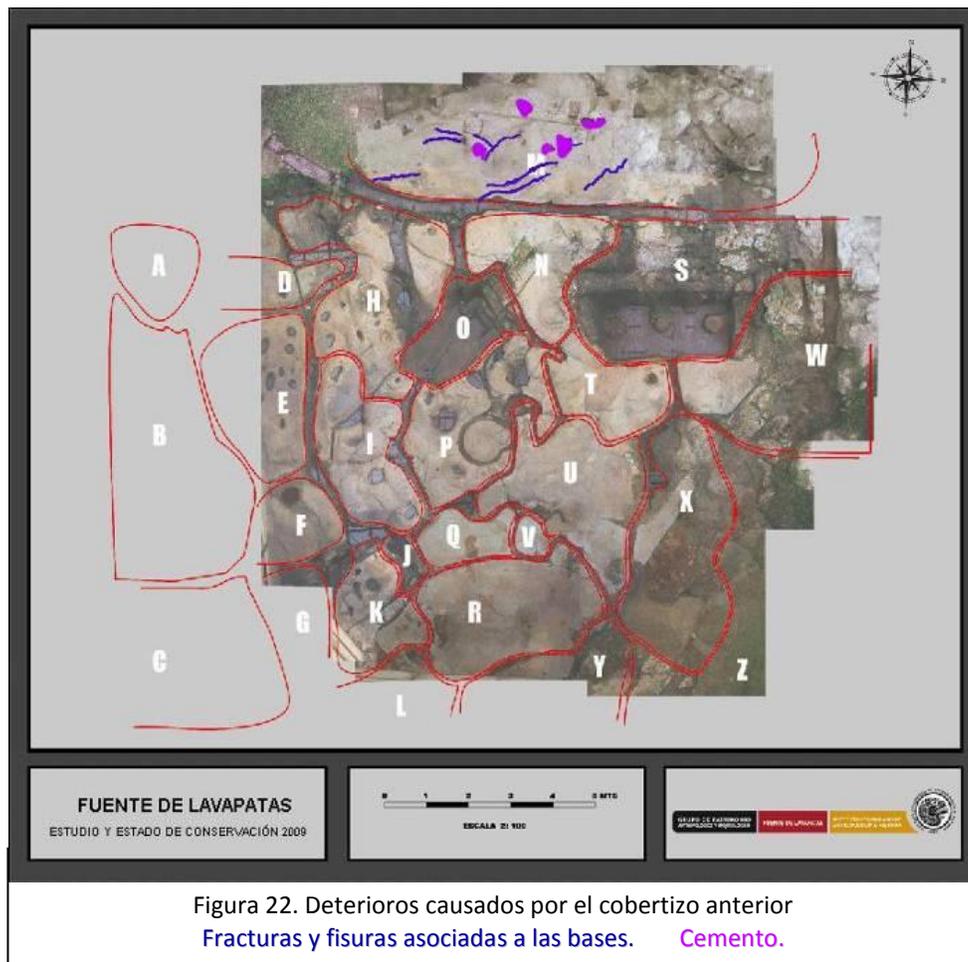


Figura 22. Deterioros causados por el cobertizo anterior
Fracturas y fisuras asociadas a las bases. **Cemento.**

b. FISURAS

Las fisuras son separaciones del material rocoso de menor dimensión que las fracturas. El estudio in situ de la roca permitió observar que además de las grandes fracturas de origen geológico y de las que se produjeron con la construcción de las bases del cobertizo anterior hay una gran cantidad de fisuras pequeñas que atraviesan la piedra. Las fisuras que se encuentran no tienen una dirección definida, cruzan irregulares la superficie. En su mayoría son muy poco abiertas.



Figura 23: Fisura pequeña que se observa en la superficie rocosa.



Figura 24: Varias fisuras presentes en la superficie rocosa.

Los cambios de humedad o temperatura, sumados al efecto constante del agua que penetra por capilaridad en las pequeñas fisuras de la superficie rocosa, hacen que la tensión y presión que se ejerce en la estructura pétreo genere la apertura lenta de las fisuras.

En cuanto al origen de las fisuras, no se tiene certeza del momento en que se generaron, sin embargo, por medio del estudio de la muestra A, se pudo establecer que la roca de la Fuente presenta fisuras y discontinuidades tanto en la superficie como en el interior de la estructura rocosa que aparecen atravesando la roca. De acuerdo con esto, es muy probable que tanto las discontinuidades como muchas de las fisuras hubieran sido originadas incluso antes de la talla de la Fuente, miles de años antes, durante la formación geológica de la roca.

Es importante mencionar que en la actualidad no hay mayor información, ni hipótesis convincentes basadas en buenas metodologías, que expliquen el avance de los deterioros como éste. Con los datos y observaciones que existen en este momento resulta más probable pensar que las fisuras se generaron hace miles de años y que hoy y muy lentamente se están abriendo por el efecto del agua en vapor y de la que corre en la Fuente. Considerando la apertura muy pequeña de las fisuras hoy en día tras mínimo 1000 años de existencia, se trata de es un proceso muy lento que no urge tratar en este momento.

Hay que mencionar que por el tamaño de la Fuente, el levantamiento fotográfico con el cual se cuenta y la enorme cantidad de fisuras de tamaño mínimo que existen en la superficie rocosa no fue posible graficar la totalidad de las fisuras, sin embargo éste levantamiento es una buena aproximación.

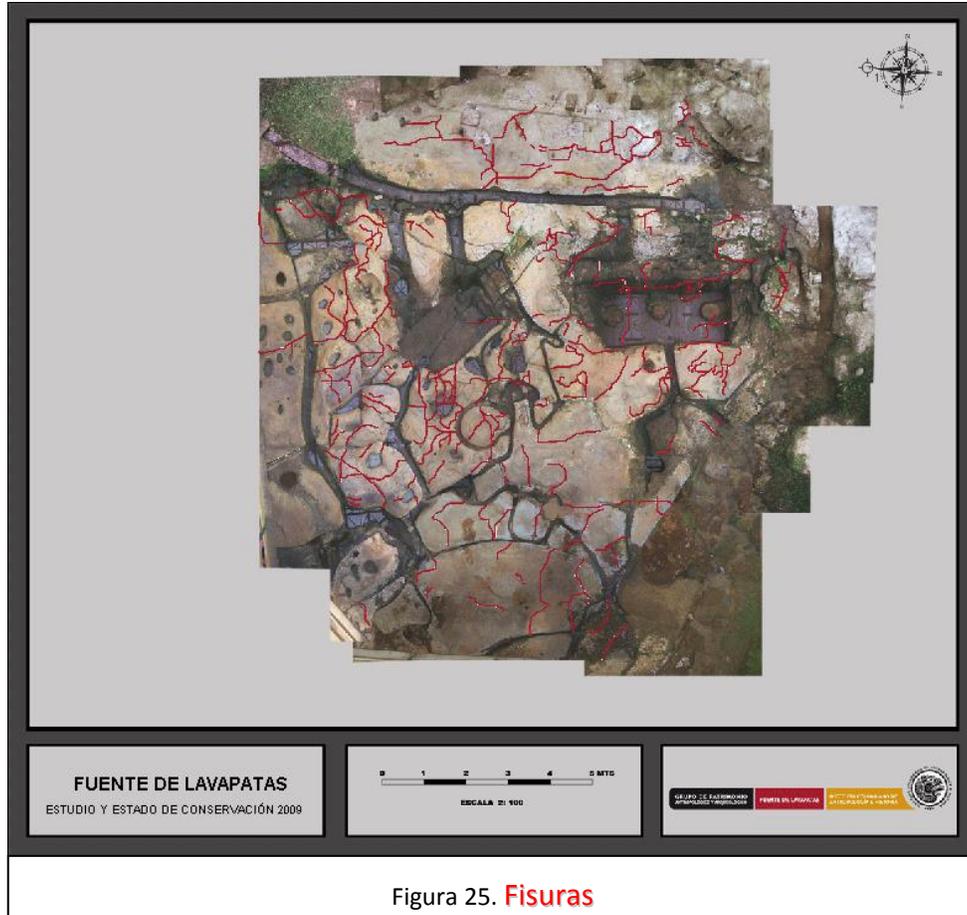


Figura 25. Fisuras

c. LOS DESPRENDIMIENTOS

Desprendimientos son porciones de roca que están parcialmente sueltas y que se separan porque existen oquedades o discontinuidades en la roca. Este deterioro se caracteriza por tener una dirección paralela a la superficie de la roca.

El estado de conservación de los desprendimientos puede ser muy diverso. Mientras algunos desprendimientos tienen bordes abiertos, otros están cerrados lo cual dificulta su localización a simple vista. Es por ello que los desprendimientos se detectan por medio del estudio de percusión de la superficie, que es un método sencillo frecuentemente utilizado en conservación de piedra y pintura mural para detectar desprendimientos. (Schmid, 2004; Weber & Köhler, 1997; Hammer, 1988)

Los desprendimientos están localizados a todo lo ancho y largo pero especialmente hacia el costado occidental de la Fuente, en los sectores M, S, W, T, X, U, V, Q y R. (ver levantamiento figura 34). De acuerdo con lo mencionado se diferenciaron tres tipos de desprendimientos:

1. Desprendimientos con bordes muy visibles asociados a fisuras de mayor amplitud,
2. desprendimientos cuyos bordes están asociados a fisuras de menor amplitud,
3. desprendimientos que por falta de una apertura o fisura en los bordes no son visibles y son reconocibles solamente por su sonido hueco.



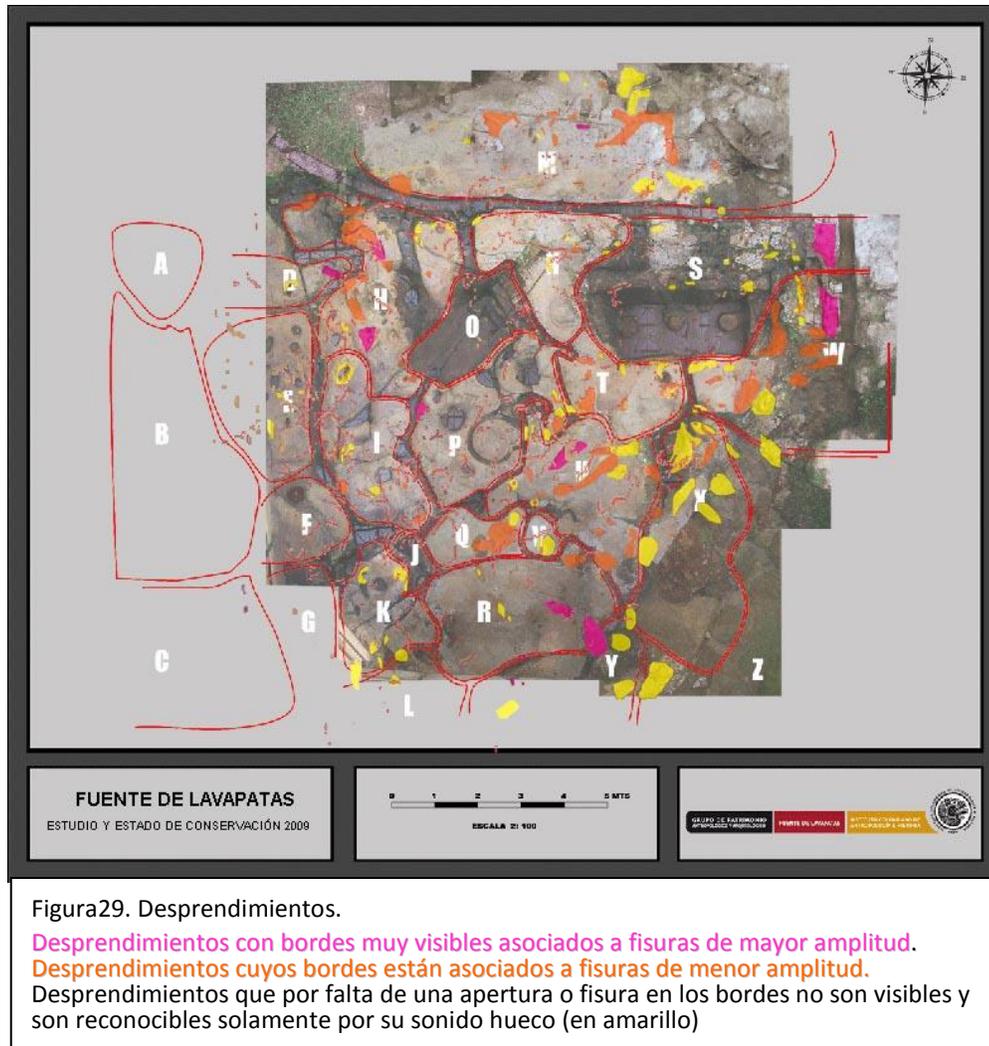
Figura 26.Desprendimiento con borde de poca anchura



Figura 27. Desprendimiento parcialmente abierto en los bordes



Figura.28 Desprendimiento con bordes abiertos



La observación de que los desprendimientos están cerrados pero suenan fuertemente, permitió plantear que éstos no son deterioros recientes, sino que corresponden al patrón de alteración radial que se observa en las discontinuidades de la roca. Como ya se mencionó en el apartado anterior, la toba presenta a escala macroscópica, una serie de discontinuidades dadas por capas de óxidos y mayor presencia de fisuras. A nivel microscópico este deterioro también se explica por la heterogeneidad en el tamaño de grano de los minerales (lapilli a ceniza fina), la presencia de arcilla y la distribución de los poros, que puede generar zonas más débiles y vulnerables a algún tipo de presión y/o tensión.

Los ciclos de dilatación y compresión dados desde cientos de años atrás, son responsables de la formación de fisuras que facilitan la penetración de agua y la consecuente apertura de las fases separadas y alteración de la matriz originando desprendimientos que aceleran el proceso de deterioro de la roca al permitir el acceso directo del agua a la estructura de la roca. Con el tiempo los desprendimientos abiertos tienden a caerse pues se pierde el contacto con el resto de la roca.

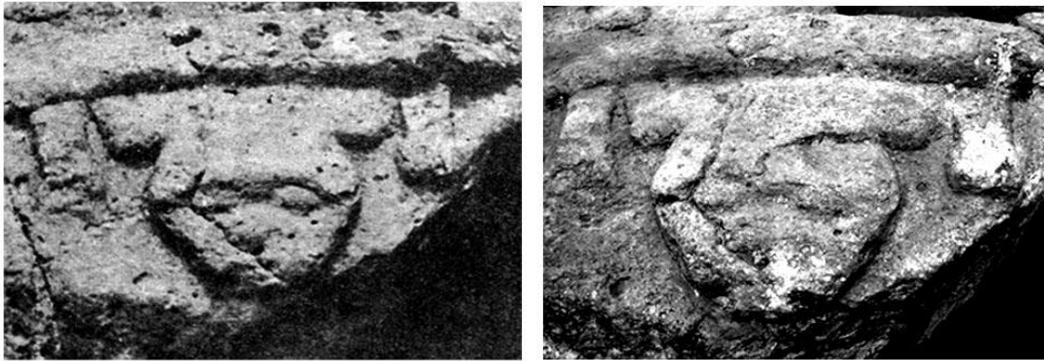


Figura 30. Fotos históricas de una zona con desprendimiento. Izquierda foto de 1937, Derecha se ve la pérdida de formas por la caída de un desprendimientos. Los bordes quedan muy marcados.

Como fue mencionado anteriormente para las fisuras todavía no hay claridad sobre la velocidad del deterioro ni en otros tiempos, ni en la actualidad. Con los desprendimientos ocurre lo mismo, se mencionaba que se empezaron a generar ya desde el momento de la formación de la roca, pero aún no se sabe cómo llegaron al punto de separarse de la roca. Lo que sí se puede formular como hipótesis, observando las circunstancias de equilibrio que caracterizan la Fuente hoy, es que los daños que observamos en la figura 30 se dieron sobre todo durante el periodo de tiempo posterior al redescubrimiento del sitio, cuando aún el acceso al sitio no estaba controlado y por allí pasaban hasta caballos.

d. DECOHESIÓN

La decohesión supone la pérdida de mínimas unidades de roca. Debido a que la toba está compuesta por una matriz vítrea, fragmentos de vidrio y en menor proporción cristales de plagioclasa, cuarzo, biotita y fragmentos de roca ígneos y metamórficos; en las zonas decohesas se desprenden partes de la matriz vítrea, cristales o partes de cristales de diferentes tamaños.



Figura 31. Zonas limitadas con decohesión, alrededor la piedra se encuentra estable



Figura 32. Las zonas decohesas presentan usualmente una coloración más clara pues en estas zonas la capa de biodeterioro se ha perdido y los minerales están a la vista.

Por medio de la prueba al tacto se identifica este deterioro que se caracteriza por superficies pulverulentas, con partes de mínimo tamaño que se desprenden fácilmente. A nivel microscópico en las zonas con decohesión se observan muchas fisuras ramificadas que tienen dimensiones entre 4 y 70 μm . A eso se suma la presencia de unas pocas fisuras con dimensiones mayores a 200 μm .

Las zonas que muestran decohesión en la Fuente están irregularmente distribuidas y generalmente asociadas con zonas de volúmenes prominentes.

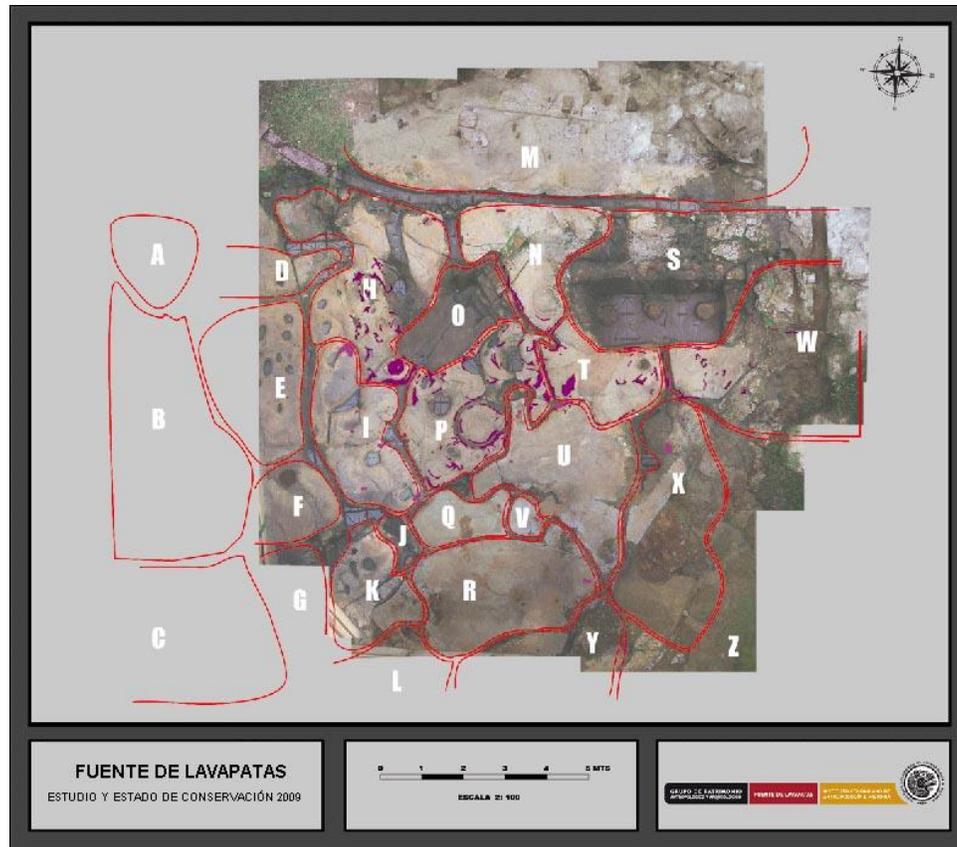


Figura 33. **Decohesión**

El fenómeno de la decohesión está asociado a la formación de fisuras. Las fisuras permiten que el agua (bien sea en forma líquida o de vapor) entre al material rocoso causando dilatación hídrica. Esto ocasiona la disolución de la matriz vítrea, la pérdida de contacto entre cristales y fragmentos y la consecuente pérdida de soporte de los cristales, causando la disgregación de la superficie de la roca y como consecuencia el desprendimiento de partículas y la pulverulencia de la superficie pétreo.

Adicionalmente los cambios en el ambiente (temperatura y agua) provocan la expansión y contracción del material pétreo, fuerzas que generan rupturas. Pero como este proceso se desarrolla lentamente y requiere de muchos ciclos lo más probable es que las zonas decohesas que observamos hoy en día ya se empezaron a formar mucho

tiempo atrás. Es probable que hoy en día, con las condiciones de equilibrio que ha alcanzado la roca en la Fuente, gracias al cobertizo y a la entrada más o menos regular de agua, éste deterioro no esté avanzando, sin embargo es importante decir que cuando el agua de la quebrada se rebosa o se pisa la superficie pétreo, ocurren condiciones fuera del equilibrio que favorecen el avance de éste deterioro.

Decohesión asociada a fisuras de mayor tamaño

Junto al deterioro llamado decohesión, se añade aquí la “decohesión asociada a fisuras de mayor tamaño” en la cual se observan fisuras y redes de fisuras mayores a $200\ \mu\text{m}$, que se encuentran localizadas en ciertos puntos de las zonas decohesas. Estos sectores presentan una mayor vulnerabilidad al deterioro, pues cuando se originan pérdidas de material rocoso, se pierden partes más grandes afectando la conservación de la Fuente.

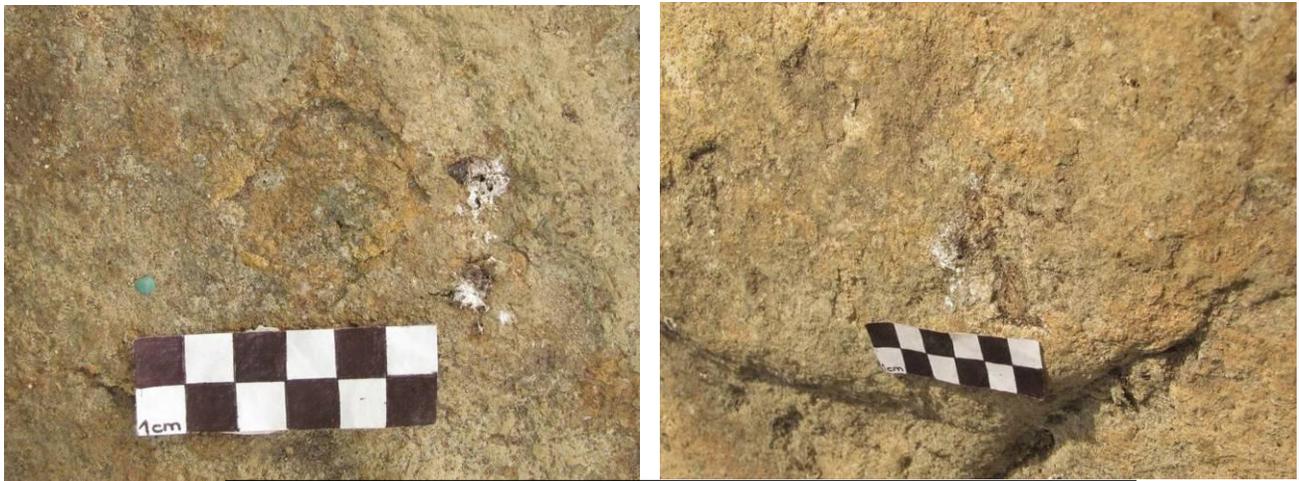


Figura 34. Fotografías de la Decohesión asociada a fisuras de mayor tamaño

2.5. BIODETERIORO

Luz Stella Villalba Corredor *

En 2008, 2009 y 2011 se realizaron las investigaciones sobre el diagnóstico del biodeterioro (líquenes, musgos, selaginellas, hepáticas, algas) de la roca y la determinación del tipo de contaminación microbiológica del agua de circulación de la fuente. Estas investigaciones se desarrollaron en campo colectando los especímenes de la roca y en laboratorio para realizando su identificación.

Metodología

- Colecta e identificación de organismos: líquenes, musgos, selaginellas y hepática, microalgas, bacterias totales aerobias, hongos filamentosos, bacterias sulfatoreductoras, nitrificantes y coliformes totales y fecales.
- Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y EDAX

I. COLECTA DE ESPECÍMENES E IDENTIFICACIÓN.

La colecta de líquenes, musgos, selaginellas y hepáticas se efectuó en los sectores M, N, S, I, P, U, Q y V, de acuerdo con la metodología descrita por el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia. Los especímenes fueron llevados al Herbario de la Universidad para su identificación por claves taxonómicas.

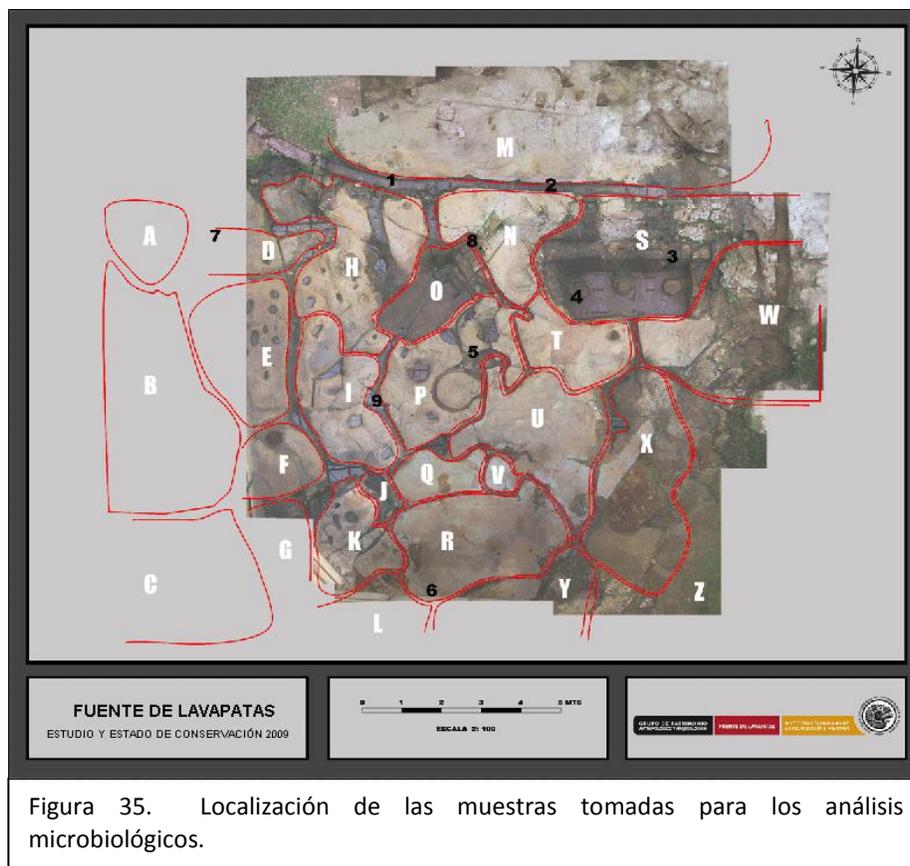


Figura 35. Localización de las muestras tomadas para los análisis microbiológicos.

Para recolectar las algas y cianobacterias, se seleccionaron aleatoriamente diez puntos en canales y roca con indicadores como pigmentación negra o café, costras, pátinas y desprendimientos (canales de las zonas M, S, Z, O y P). Las muestras se tomaron asépticamente por hisopado, raspado y con espátula.

La identificación de las microalgas se realizó en microscopio óptico Olympus (40x y 100x) con ayuda de las claves taxonómicas de Bicudo y Menezes (2006), Cox (1996) y Whitford y Schumacher (1968). Para el análisis de las microalgas cada muestra se trabajó como una comunidad y se elaboraron histogramas de frecuencia.

Para el aislamiento e identificación de bacterias totales aerobias, hongos filamentosos, bacterias sulfatoreductoras, nitrificantes y coliformes totales y fecales se seleccionaron siete puntos críticos a partir de crecimientos miceliares o pátinas negras para recuperar las bacterias sulfatoreductoras. Se realizaron siembras en superficie en medios de cultivo específicos para cada grupo microbiano.

II. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) Y EDAX

Para precisar el deterioro de la roca por acción de los organismos, se efectuaron observaciones de pequeños fragmentos con microscopio electrónico de barrido (SEM) y análisis EDAX .

Resultados y Discusión

Organismos

La identificación de la flora liquénica a género y especie no pudo realizarse, pues debía efectuarse un análisis destructivo del material para desprender el organismo unido fuertemente al sustrato. De manera que según las características macroscópicas se identificaron seis morfotipos. A continuación se presentan los organismos identificados en los diferentes sectores:

LÍQUENES: Liquen rosado-sp1, Liquen Verde- sp2, Liquen blanco-sp3, Liquen naranja-Ocre- sp4, Liquen vinotinto- sp5, Liquen Fucsia- sp6. (Ver figura 36).

HEPÁTICAS: *Marchantia chenopoda*, *Marchantia polymorpha*, *Megaceros sp*, *Frullania sphaerocephala*. (Ver figura 37).

SELAGINELLAS: SP1, sp2, sp3, sp4, sp5, sp6. (Ver figura 37).

MUSGOS: *Brachythecium stereopoma*, *Hyophila involuta*, *Bryum capillare*, *Bryum densifolium*, *Pseudosymblypharis schimperiana*, *sematophyllum galipense*, *Didymodon rigidulus*. (Ver figura 38).

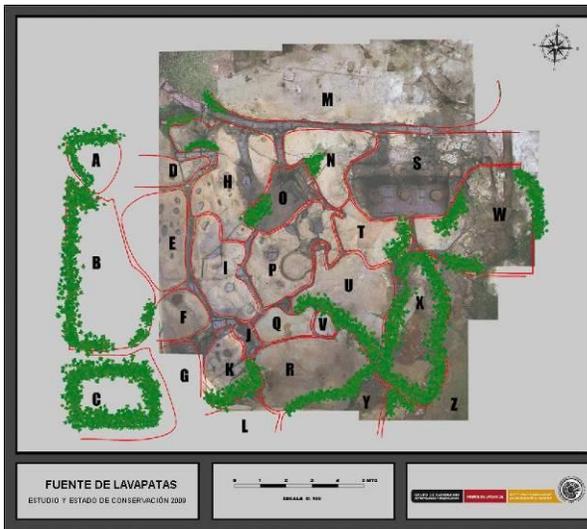


Figura 36.
 Líquen blanco
 Líquen naranja
 Líquen rosado
 Líquen verde
 Líquen violeta

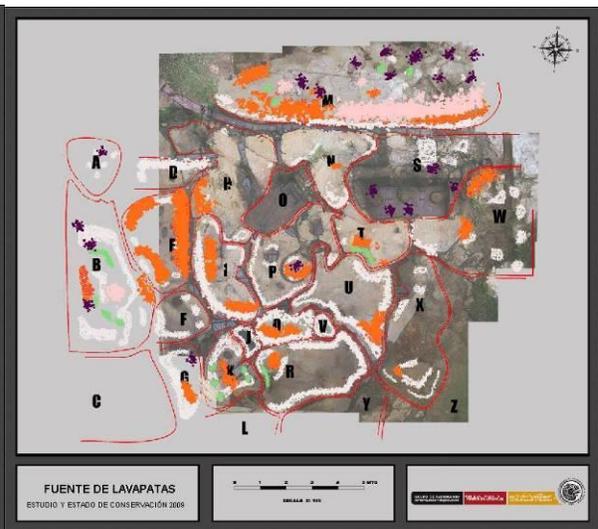


Figura 37.
 Hepáticas y
 selaginellas

PLÁNTULAS: *Hyptis atorubens* (Flia Lamiaceae), *Eleocharis cf* (Flia Cyperaceae), *Oplismenus burmannii* (Flia Poaceae), *Gomochaeta americana* (Flia Asteraceae), *Paspalum cf notatum* (Flia Poaceae), *Pseudoelephantopus sp* (Flia Asteraceae), *Youngia cf. Japonica* (Flia Asteraceae), Flia Cyperaceae. (Ver figura 39).

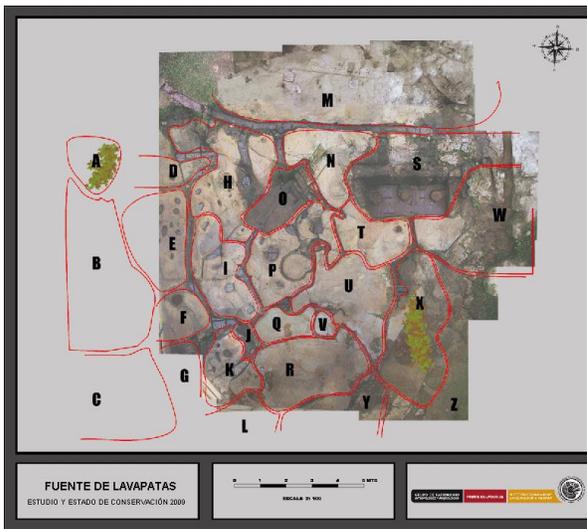


Figura 38. Musgo.

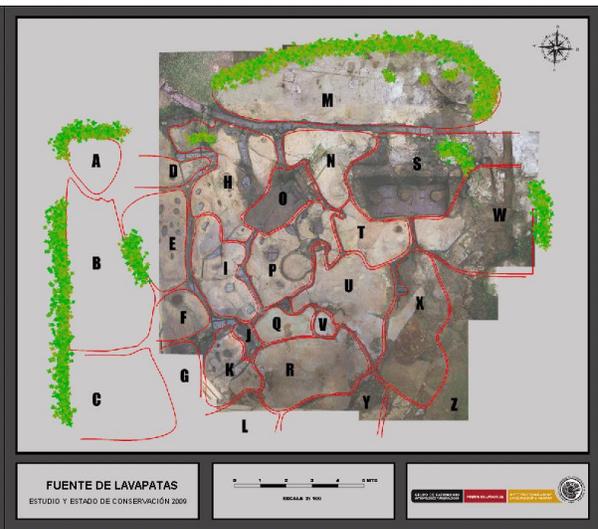


Figura 39. Plántulas

Los **líquenes** encontrados son denominados saxícolas por su crecimiento en rocas y minerales, son 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 puede 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.

El mecanismo de acción sobre el material rocoso esta determinado principalmente por los ácidos producidos como 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 está desintegrando en pequeñas partículas que se van acumulando como parte del suelo. Así mismo como fue evidente con la Microscopia 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 (Valencia, M & Aguirre, J, 2004).

Igualmente es evidente la presión física en el soporte por las contracciones y expansiones del talo en función de la humedad y por tanto de la absorción de agua. Pero el daño más significativo es el químico que se ejerce por tres procesos: producción de ácido carbónico, excreción de ácido oxálico y generación de compuestos liquénicos con propiedades quelante.

En cuanto al componente **algal**, de acuerdo con los resultados se puede inferir que es una comunidad de organismos constituida de las divisiones taxonómicas: Chlorophyta, Cyanophyta, Bacillarophyta y Euglenophyta.

La problemática de las algas sobre el material rocoso de la Fuente de Lavapatás se puede agrupar en dos deterioros:

(i). **Estético** se refiere a la proliferación de costras de color negro y manchas de color verde, que varían

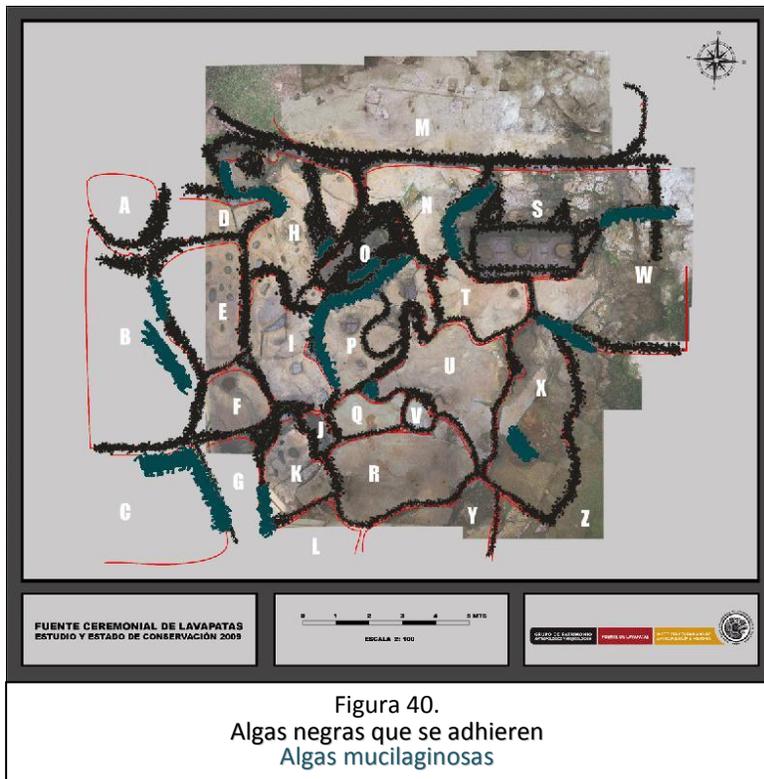


Figura 40.
Algas negras que se adhieren
Algas mucilaginosas

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 mucilaginosa, pátina negra-verde adherida al soporte y mucílago pardo.

De acuerdo con los análisis efectuados, la pátina negra mucilaginosa 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. 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 & Toole. G, 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, 2002). La estructura mucilaginosa parda 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.

(ii). Físico-químico, Ocurre cuando las algas absorben el agua, la retienen por un tiempo prolongado manteniendo la superficie del sustrato saturado y origina 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 su debilitamiento (acidólisis).

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, su relación con el sustrato puede dividirse en epilíticas que crece en la superficie y endolíticas que colonizan en profundidad. Las costras o pátinas que se aprecian en los canales y áreas expuestas a la luz y agua como las presentes en los sectores S, L y O (Ver Figura39), son debidas a las algas epilíticas.

Microorganismos asociados

De acuerdo con los análisis se recuperaron bacterias totales heterótrofas, los hongos filamentosos: *Penicillium sp.*, *Aspergillus sp.*, *Botrytis sp.*, *Mortierella sp.*, *Mucor sp.*, *Cephalosporium sp.*, *Trichoderma sp.*, 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 (Ver Figura39).

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

Bacterias sulfato reductoras ó sulfúricas: El mecanismo de acción de este grupo está relacionado con la presencia de azufre 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.

Bacterias nitrificantes o nitrobacterias: Son bacterias aerobias que oxidan el amoníaco proveniente del agua lluvia, polvo, hollín, excrementos de pájaros, convirtiéndolo en ácido nitroso y nítrico. Según Videla (2010) el indicador característico de la acción destructiva de este grupo es la degradación de la superficie de la roca que pasa de porosa a casi polvo de color amarillo muy claro, típico en ambientes con aguas estancadas (Referencia) Para el caso de la Fuente se observa en el sector M.

Hongos filamentosos: El desarrollo de los hongos en la superficie de la piedra exige un rango de humedad de 50 a 98%, son tolerantes a bajos pH posibilitados por los procesos de acidólisis y el ambiente ácido producto de las bacterias sulfatoredutoras y nitrificantes.

Su mecanismo de acción sobre el soporte es de tipo bioquímico 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 este trabajo se aislaron miembros del género *Aspergillus* y *Penicillium* los cuales son reconocidos por su producción de ácido oxálico.

Igualmente, algunos de los hongos producen melaninas que en ocasiones pueden manchar el soporte y generan un deterioro mecánico pues sus hifas al penetrar 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.

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. Estas se presentan 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. El grupo coliformes está formado por los siguientes géneros: Escherichia, Klebsiella, Enterobacter, Citrobacter.

No todos los coliformes son de origen fecal, por lo que se hizo necesario desarrollar pruebas para diferenciarlos a efectos de emplearlos como indicadores de contaminación. Se distinguen por lo tanto, los coliformes totales que comprende la totalidad del grupo y los coliformes fecales de origen intestinal.

De ahí la importancia de haber realizado la determinación para estos dos grupos, esto confirma 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 se debe realizar análisis para este grupo en los puntos de distribución del agua hasta la Fuente y en el tanque de abastecimiento para establecer un plan de seguimiento.

A parte de ser un problema de salud pública por los efectos adversos a la salud, contribuyen significativamente al deterioro del material por su metabolismo fermentativo y producción de ácidos mixtos como el propiónico, succínico y láctico, contribuyendo de esta forma a brindar condiciones favorables para el establecimiento y desarrollo de otras comunidades de organismos, como los hongos.

En el año 2011, se realizó el seguimiento de las diferentes poblaciones de organismos deteriorantes con el fin de comparar los agentes biológicos encontrados en el 2008 y los del 2011. Del seguimiento anterior se pudo concluir que las diferentes poblaciones de organismos se mantuvieron en términos de cantidad y distribución en relación con los hallazgos del 2008. Es importante destacar la presencia en el 2011 de bacterias aerobias filamentosas: actinomicetos, estos microorganismos tienen un mecanismo de acción similar al de los hongos filamentosos y fueron aislados de todos los sectores evaluados.

Igualmente los análisis para coliformes (bacterias relacionadas con la contaminación microbiológica del agua) fueron negativos, específicamente para E. coli y fecales, solo se obtuvieron resultados positivos para coliformes totales.

En cuanto a los resultados obtenidos de los análisis de la Microscopia Electrónica de Barrido y los perfiles EDAX, éstos corroboran el proceso activo de biodeterioro sobre la roca, por microorganismos (algas, bacterias y hongos) 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 & Braams, 2000).



Figura 41.

Muestra 1. Parte vegetativa de liquen

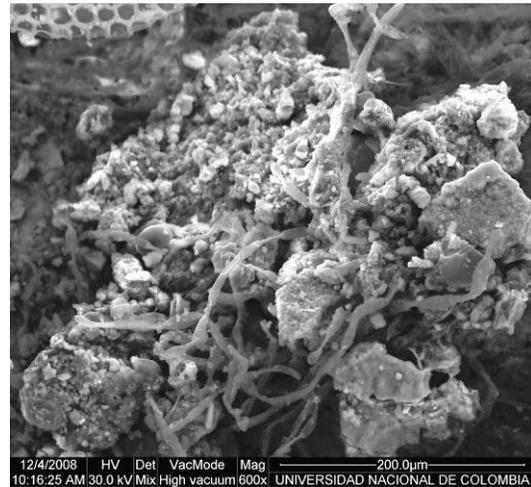


Figura 42.

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

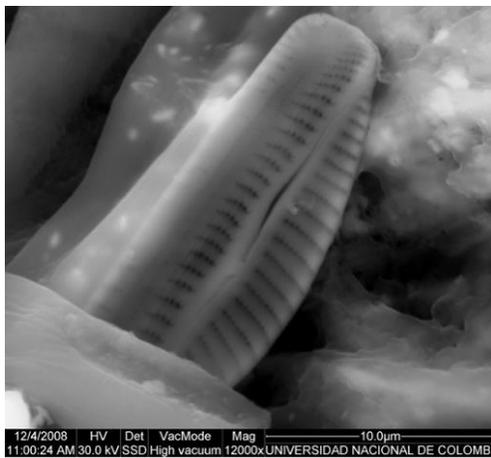


Figura 43. Muestra 5. Diatomeas en Sector S. Pátina que se adhiere a la roca. .

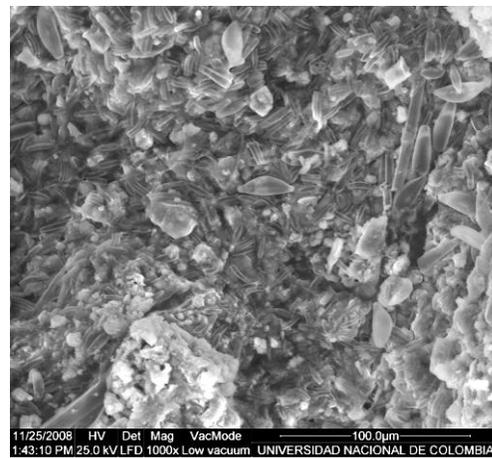


Figura 44. Muestra 10. Pátina negra sector M. Se observa claramente el biofilms constituido de microalgas de la división Bacillarophyta y Cyanophyta, incrustadas en la matriz mineral.

Conclusiones

De acuerdo con lo anterior el debilitamiento y deterioro de la roca está 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.

En cuanto a los microorganismos, estos persisten en la roca gracias a la estructura de biofilms desarrollada, que les da protección contra la radiación solar, la desecación y los cambios de pH entre otros, así mismo el ambiente endolítico en el poro de la roca (milímetros o centímetros), favorece un hábitat ubicuo para las comunidades de organismos, principalmente fotosintéticos.

Otro factor importante a tener en cuenta, además de las características físicas y químicas de la roca, es la ubicación de la fuente, que facilita una exposición permanente del material a la luz y humedad y favorece la permanencia de los organismos.

Así, la roca de la fuente exhibe desarrollo de típicos biofilms los cuales se han establecido en diferentes periodos a velocidades distintas y que son el resultado de interacciones entre la roca y sus compuestos, los organismos y la atmósfera. 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.

Los organismos de los biofilms expuestos a la atmósfera dependen de fuentes de energía externa a diferencia de los ubicados en estratos en profundidad que obtienen sus nutrientes de acumulación de una amplia cantidad de elementos.

Igualmente es muy importante conocer las sucesiones ecológicas que posiblemente se han establecido en el material rocoso, 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 suceden en 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 pátinas sobre la Fuente protegen la matriz de los biofilms de las condiciones adversas del medio.

Los cambios relacionados con la diversidad y cantidad de especies a través del tiempo están directamente asociados con la disponibilidad de nutrientes en la roca y cambios ambientales.

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.

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 susceptibilidad de estos compuestos utilizados en restauración de piedra. La acción biodeteriorante sobre los polímeros es posible especialmente en ambientes con un elevado porcentaje de humedad relativa.

Además de los procesos de limpieza y de tratamiento para eliminar los organismos biodeteriorantes, debe considerarse el tratamiento 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 meteorización del material debida al intemperismo.

2.6. CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES

Catalina Bateman y Helen Jacobsen *

A causa de distintas discusiones generadas alrededor del cobertizo y su posible influencia sobre la roca y su conservación, se llevó a cabo la implementación del programa de estudio de las condiciones medioambientales de la fuente, implementado en 2008.

A continuación se ilustran en primer lugar generalidades de las condiciones medioambientales del Parque Arqueológico de San Agustín en las cuales se enmarcan las características medioambientales de la Fuente de Lavapatatas, que posteriormente serán presentadas en detalle con sus respectivos resultados, análisis y conclusiones obtenidas hasta el momento, pues el programa continúa en ejecución para seguir profundizando y comprendiendo aun más este tema en los próximos años.

Metodología

Para la evaluación de las condiciones medioambientales se utilizó la siguiente metodología:

- Revisión de los estudios medioambientales que se han desarrollado en el parque y caracterización general de la zona.
- Medición de la temperatura y humedad relativa con dos datalogger Testo Testostor 171 en dos puntos:
 - **Bajo la estructura del domo** se realizó la medición durante los meses de julio, agosto, noviembre, diciembre del 2008 y enero, febrero del 2009
 - **Bajo el puente** se realizó la medición durante los meses de marzo, abril, mayo, julio, agosto, septiembre, octubre, diciembre del 2008 y enero, febrero, marzo y abril de 2009
- Medición de la temperatura superficial de la roca con el termómetro de contacto Testo 735, siguiendo dos métodos
 - Método 1:** Se seleccionaron 12 puntos en la Fuente, con características distintas de exposición a la luz (figura 49) bajo el cobertizo y tres puntos fuera del cobertizo. Las mediciones se realizaron durante 4 días en los meses de febrero/marzo del 2009 a las 10 am., 12.30 am., 3.30 pm, 5.30pm; además se realizó una vez la medición a las 12pm y a las 4.30am
 - Método 2:** El equipo fue ubicado en una sola área (figura 49, punto 5), tomando mediciones en zonas de la roca seca donde no hay contacto con el agua y zonas de la roca húmeda como canales y pozetas. (Ver figura 50), la toma de datos fue realizada durante 24 horas, con registro de los datos cada media hora.

Resultados y Conclusiones

2.6.1 Características generales del área

Las condiciones ambientales en la Fuente de Lavapatás corresponden a las de un clima templado con una altura de 1.730 m.s.n.m.

Como aparece descrito por Álvarez (1999),

Debido a su ubicación en la parte alta del río Magdalena y la proximidad al Páramo de las Papas, estrella fluvial colombiana, el área del Parque está sujeta, como el resto de esta zona del Alto Magdalena, a una cantidad considerable de precipitación que alcanza una media anual entre 1100 mm y 1700mm. De acuerdo con los datos obtenidos por el Sistema Nacional Ambiental durante el periodo 1971-1997 el comportamiento de las lluvias no es el mismo a lo largo del año. Los valores medio mensuales de precipitación indican que hay dos épocas de lluvia durante el año. La primera se extiende desde marzo hasta julio, la segunda de octubre a diciembre. Los meses más secos del año son enero, febrero y septiembre y corresponden con la época de verano.

La humedad relativa (HR) en la zona del parque es de aproximadamente del 80%. Los valores más altos de humedad alcanzan a ser hasta del 90%. Los valores más bajos aparecen hacia el medio día cuando la humedad tiene un promedio del 60%. De acuerdo con las mediciones tomadas en 1996 la HR varía de la siguiente manera: entre las 20h y las 9h la HR promedio es del 80%. Entre las 9h y las 14h disminuye hasta el 55%. Entre las 14h y las 20h aumenta hasta el 80%. De acuerdo con los datos del Sistema de Información Nacional Ambiental (estación meteorológica 2101503 Parque Arqueológico) en la zona los meses que presentan valores más elevados de HR son junio y julio mientras que los valores más bajos los encontramos en enero y febrero.

La temperatura promedio es de 18°C. De acuerdo con las mediciones tomadas en 1996 la temperatura presenta las siguientes variaciones diarias: Entre las 22h y las 7h la temperatura oscila entre los 10°C y los 14°C. Entre las 8h y las 14h aumenta hasta los 22°C. Entre las 14 y las 22h disminuye hasta los 13°C. En cuanto al comportamiento de la temperatura a lo largo del año encontramos que la amplitud diurna es máxima en verano (finales de diciembre a marzo, y entre agosto a septiembre) cuando alcanza los 18°C y los 21°C, las más bajas entre abril y mayo (14°C a 12°C). Las heladas son frecuentes en el verano.

2.6.2 Condiciones medioambientales en la Fuente

a. Temperatura y humedad relativa

Tabla 8. Meses con datos comparativos: bajo el domo y bajo el puente															
Temperatura y HR promedio y máximo															
	MARZO 2008	ABRIL 2008	MAYO 2008	JULIO 2008		AGOSTO 2008		OCTUBRE 2008	NOV. 2008	DICIEMBRE 2008		ENERO 2009		FEBRERO 2009	
	bajo el puente	bajo el puente	bajo el puente	bajo el domo	bajo el puente	bajo el domo	bajo el puente	bajo el domo	bajo el domo	bajo el domo	bajo el puente	bajo el domo	bajo el puente	bajo el domo	bajo el puente
Prom. % HR	89,6%.	89,7%	93,3%	90,6%	93%	89,9%	91,4%	89,1%	91,2%	90,8%	91,7%	91%	90,1%	88,7%	89,7%
HR Máx.	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99,6%
HR Mín.	57%	47,4%	61,1%	46,2%	56,8%	41,6%	49,4%	45,1%	40,4%	48,8%	55,8%	51,7%	53,14%	37,5%	25,6%
Prom. de T°	16,9°C	17,5 C°	17,03°C	16,5C°	16,3C°	16,5C°	16,4C°	17,1°C	17,8°C°	17,5C°	17,2 C°	17,6 C°	17,2 C°	18,1C°	17,6 C°
Temp. Máx	24,9°C	26,3°C	24,8°C	26,2°C	24,6°C	28,2°C	24,8°C	26,5°C	29,1°C	28,6°C	26,8°C	27,4°C	24,9°C	30,1°C	25,8°C
Temp. Mín	11°C	11°C	10,9°C	8°C	9,2°C	9,2°C	9,3°C	9°C	9,7°C	10,6°C	11,5°C	11,4°C	11,9°C	12,5°C	12°C
Convenciones: Datos bajo el domo Datos bajo el puente															

En términos generales, al analizar los datos registrados se evidencia un comportamiento similar a lo largo de los 12 meses donde se presentan tres ciclos marcados. El primero es en las horas de la madrugada cuando la temperatura tiende a estar entre los 12 y los 15°C con una HR entre el 97 y 99%. El segundo ciclo comienza a medida que transcurre la mañana cuando la temperatura se eleva (lo que produce el descenso de la HR) y alcanza su mayor temperatura entre las 12m y las 2 p.m. con temperaturas entre los 19 y 24°C y HR entre los 50 y 70%. A medida que transcurre la tarde, comienza el tercer ciclo, cuando la temperatura vuelve a descender, con el proceso inverso de la HR. Entre las 6 y las 8 de la noche, estas temperaturas han bajado considerablemente (entre los 16 y 13°C aproximadamente).

Contrario a lo que se pensaba anteriormente cuando se planteaba que había un incremento de la Humedad Relativa durante el horario en que se encendía la bomba que permite la circulación de agua en la Fuente (9 a.m. a 5 p.m.), a partir de los resultados analizados dentro de este estudio se observa que no se registraron cambios durante este horario. Al contrario, durante este lapso de tiempo la temperatura alcanza sus mayores valores y la HR desciende drásticamente.

En términos generales, de acuerdo a los resultados comparativos de los 5 meses registrados, se observan cambios más drásticos en la HR y la T° debajo del domo que debajo del puente. Sin embargo, los datos en estos dos lugares no difieren considerablemente. Se identificó un patrón de comportamiento común con una humedad relativa superior al 95%, constante que varía en el momento crítico del día, que es de 7 a.m a 3 p.m cuando hay incremento de la temperatura y disminución pronunciada de la HR.

Diciembre se caracteriza por tener uno de los períodos más largos de estabilidad climática.

Hay días excepcionales que muestran las condiciones ambientales ideales en la medida en que las variaciones no son tan drásticas. Por ejemplo, entre las 7 p.m. del 7 de mayo y las 7 a.m. del 8 de mayo se registró una temperatura constante de 16°C (99%HR) y a las 1 p.m. sólo ascendió hasta los 20,2°C (81,3%HR). Si bien la temperatura se mantuvo sobre este rango, la HR si descendió hasta 79% a las 3 p.m. En la madrugada, a las 2 a.m. se registró la temperatura mínima con 14,8°C, la cual se mantuvo constante, la máxima temperatura de 18°C se alcanzó a las 11 a.m.

Sería recomendable que el sistema de protección contribuyera a que las condiciones ambientales siguieran el comportamiento anteriormente descrito. En lo posible la variación no debe ser mayor a HR de 30%, es decir, que el rango se encuentre entre el 99 y el 70%. Por tanto resultaría necesario amortiguar las variaciones de temperatura que se registran durante el punto crítico del día, es decir, entre las 10 y las 3 p.m. En lo posible la temperatura debería no fluctuar tanto ni con tanta rapidez.

En la medida en que no se contó con datos de las condiciones medioambientales en el exterior del domo, este estudio no permite determinar con certeza si el domo ha generado o no un microclima en su interior. Por tanto, es importante iniciar la medición de humedad relativa y temperatura del exterior del domo para así complementar la información que existe hasta ahora.

b. Temperatura superficial de la roca

Método 1

En el gráfico se presentan los puntos de medición de la temperatura superficial.

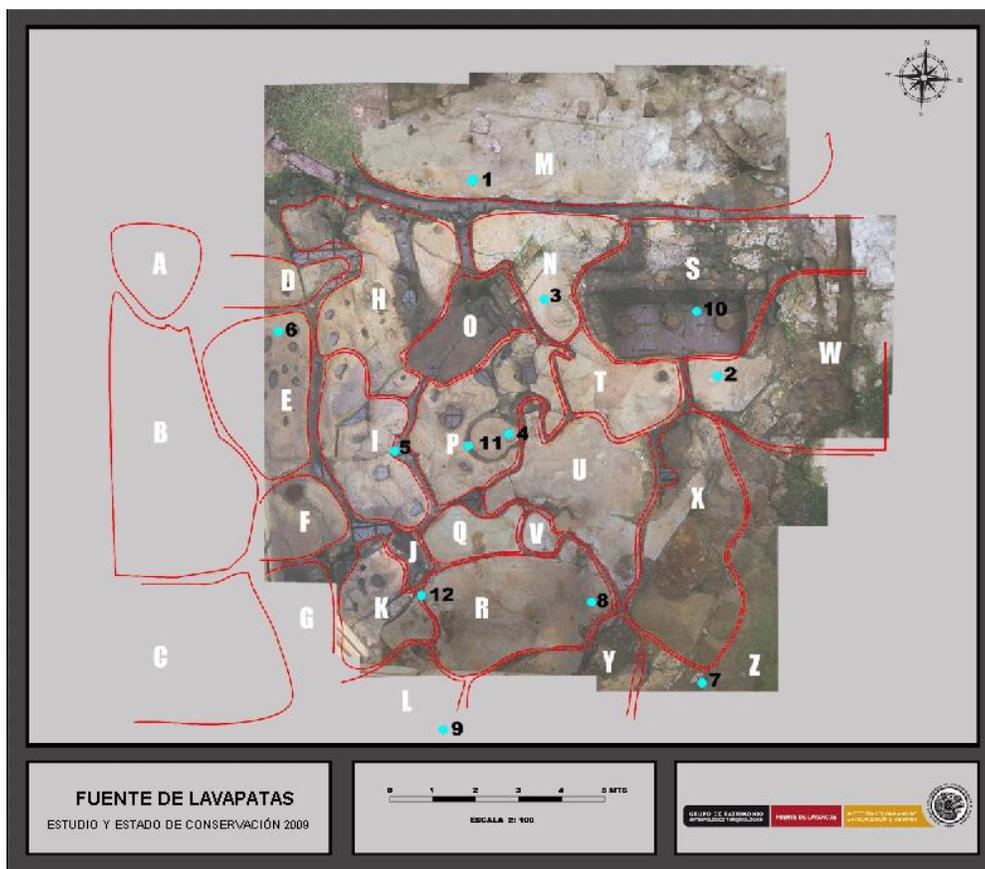


Figura 45. Localización detallada de los puntos de medición de la temperatura superficial de la roca.●



Figura 46: Mediciones de temperatura superficial de la roca en la misma zona durante un lapso de tiempo prolongado. Se tomó datos en un área con condiciones secas y húmedas

A continuación se presentan los resultados de los datos obtenidos durante la salida de campo del mes de Febrero:

Tabla 9. Método 1. Variaciones de temperatura superficial de la roca a la misma hora en diferentes puntos			
Hora	Punto de Medición	Temperatura Superficial máxima[°C]	Temperatura Superficial mínima[°C]
4.30	dentro del domo	18,6	16,7
	fuera del domo	20,3	17,5
	Agua	20,6	18,0
10.00	dentro del domo	26,4	17,6
	fuera del domo	32,4	18,7
	Agua	26,4	18,2
12.30	dentro del domo	32,6	18,1
	fuera del domo	32,6	18,8
	Agua	26,7	18,9
15.30	dentro del domo	26,7	16,7
	fuera del domo	32,5	17,5
	Agua	22,7	18,0
17.30	dentro del domo	22,9	18,4
	fuera del domo	25,3	18,7
	Agua	21,8	18,8
24.00	dentro del domo	19,0	17,2
	fuera del domo		
	Agua	19,7	17,8

Método 2

Los datos estadísticos se resumen en la siguiente Tabla:

Tabla 10. Método 2 de Medición de la temperatura superficial de la roca

Medición en zona seca °C		Medición en zona Húmeda °C	
Valor mín.	13,2	Valor mín.	14,4
Valor máx.	25,8	Valor máx.	21,3

Se observó una coincidencia entre el ciclo establecido para las mediciones de temperaturas superficiales con relación al patrón identificado en el análisis de la temperatura y humedad relativa, lo que quiere decir que la superficie de la roca es influenciada directamente por las condiciones medioambientales y la insolación. Esto significa que las temperaturas superficiales de la roca suben durante el día y bajan en la noche.

Durante el día las temperaturas superficiales aumentan a 20°C y llegan a sus máximos entre mediodía y las 3:30 p.m. A las 12:30am las temperaturas de la superficie de la piedra debajo del domo están en el rango de 21,5°C a 25,5°C (promedio) y el máximo registrado fue de 32,6°C. Por la tarde las temperaturas bajan nuevamente y pueden llegar a 13°C mínimo en la noche.

En general se observan diferencias entre la temperatura superficial afuera y dentro del domo de 5 y 7°C. Entre las 3:30pm y hasta las 5:30pm las temperaturas debajo del domo oscilan entre 21.6 y 22.7°C, mientras que afuera las temperaturas registradas son más altas y varían entre 26.7 y 32.5°C.

En resumen, las temperaturas de la superficie de la piedra debajo del domo oscilan entre 13°C (temperatura mínima de 13°C) y 33°C (temperatura máxima 32,6 °C) margen que en cuanto a la preservación de material pétreo de esta naturaleza se considera inofensivo, tanto para las temperaturas máximas y mínimas como para el cambio de temperatura a lo largo del día. Una temperatura inferior a 33°C no representa un riesgo para la piedra, pues no genera expansión térmica importante, lo cual se pudo constatar con el estudio en laboratorio de muestras investigadas en el apartado de las propiedades físicas de la roca.

Con relación a la Humedad Relativa registrada bajo el puente y bajo el domo hay que constatar que por la distancia entre los datalogger y la superficie rocosa no se tiene certeza de su influencia en la roca sino de su comportamiento general bajo puente y bajo domo, donde la humedad permanece 19 horas entre el 85 y 99% de HR y baja 5 horas por debajo del 70%. Por lo anterior, es recomendable estudiar la humedad relativa cerca de la superficie pétreo y relacionarla con a) las isotermas de adsorción y b) la dilatación hídrica de la roca bajo diferentes humedades.

De acuerdo con todo lo anterior, se concluye que el cobertizo atenúa el efecto de la radiación lumínica, de hecho las temperaturas de las superficies de la roca bajo el cobertizo, resultan algo menores desde el mediodía hasta la tarde. Se pudo estudiar un clima equilibrado sin cambios abruptos lo que se evalúa como favorable en la conservación de la Fuente.

2.7. EVALUACIÓN DEL DETERIORO DE LA FUENTE

Helen Jacobsen y María Paula Álvarez

Podemos comprender de manera integral el deterioro de la Fuente de Lavapatas gracias a los estudios realizados entre 2008 y 2012, a la cuidadosa observación realizada en campo, y a algunas de las consideraciones identificadas en diagnósticos realizados en los años 80s y 90s.

Estamos de acuerdo con los diagnósticos anteriores cuando afirman que en el deterioro inciden factores como la radiación solar, las fluctuaciones de humedad relativa y la temperatura, las características del agua (fuerte caudal con presencia de elementos corrosivos, abrasivos y contaminantes), y la presencia y proliferación del biodeterioro.

El estudio de los deterioros *in situ*, las características físicas de la roca y, sobre todo, las características geológicas, nos permiten ahora completar esta mirada, y nos aclaran que los factores más determinantes para entender el deterioro de la roca son su naturaleza y su composición.

Como se mencionó anteriormente, y se describirá de manera más detallada a continuación, es muy importante comprender mejor la velocidad del deterioro en la Fuente. No obstante, en este momento podemos afirmar que en comparación con otras tobas donde corre agua, la Fuente se encuentra en un sorprendente buen estado de conservación, teniendo en cuenta el rápido deterioro característico de este tipo de roca, potenciado en ambientes húmedos.

Las características de la roca

Uno de los resultados arrojados por los estudios fue la identificación de tres zonas que muestran grandes diferencias, tanto a nivel microscópico, como a nivel macroscópico.

Primero, existe la llamada zona dura, donde la piedra se encuentra en un buen estado de conservación. Todavía se observan, incluso, huellas de la talla. La piedra en esta zona se presenta muy estable y la dureza de la superficie es alta. La roca presenta a nivel macroscópico una costra de hierro muy dura y una absorción de agua nula. De acuerdo a secciones delgadas de muestras provenientes de la zona, se observaron biotitas parcial y totalmente oxidadas, y microfracturas rellenas de hematita. La roca es algo porosa, pero los poros no están interconectados. Esto, junto con la costra de hierro, impide la absorción de agua. La costra de hierro observada es producto, probablemente, del contacto de la roca con aguas de pH alcalino, que favorece la precipitación del hierro que va en solución. Aunque no se puede establecer hace cuánto tiempo se dio éste proceso, se sabe que no es actual, ya que, según indican los estudios *in situ* en la roca, no se encontró precipitación reciente de hierro.

La segunda zona, llamada zona de dureza intermedia, muestra algunas formas de deterioro. La superficie presenta una apariencia erosionada, con pequeñas cavidades, y se observan deterioros tales como la decohesión y los desprendimientos, los cuales indican la pérdida de las propiedades físico mecánicas de la roca y son manifestaciones del intemperismo. La superficie se caracteriza por una dureza superficial intermedia y por tener una absorción de agua muy baja. A nivel macroscópico presenta discontinuidades y fisuras, y a nivel microscópico se evidencia una cierta alteración de la matriz vítrea en arcillas. Además resulta evidente la heterogeneidad en el tamaño de grano de los minerales (de lapilli a ceniza fina), la presencia de arcillas, una mayor distribución de los poros y la presencia de más microfisuras en las partes deterioradas.

La tercera zona, ubicada en el costado oriental y llamada la zona blanda, presenta una dureza muy baja y evidencia alteración de la roca. Es una zona con alta absorción de agua. A nivel microscópico muestra algo de oxidación y menor cantidad de minerales ferromagnesianos. Se encontraron fundamentalmente arcillas como producto de alteración de la matriz vítrea y zeolitas relleno de espacios vacíos.

Los resultados permiten deducir que las diferencias en la dureza y en el estado de conservación se relacionan directamente con la composición de la roca. Mientras que en la zona de dureza alta la capa de hierro la hace poco susceptible a los procesos de deterioro y muy dura, en la zona blanda la cantidad de matriz vítrea alterada en arcillas hace que esta zona tenga una dureza mucho más baja y se disgregue.

Las diferencias de estas tres zonas permiten hacer las siguientes reflexiones: primero, su diferencia original está dada por la transformación implícita en los minerales, procesos éstos desarrollados en la formación geológica de la roca, y por tanto muy lentos.

Vale la pena mencionar que en la zona de dureza alta se encuentran muy pocas formas talladas. Existen en cambio, pequeños pozos con formas irregulares que permiten suponer que fueron generados naturalmente por el efecto del agua y no por el hombre. La mayoría de las tallas de la Fuente se encuentran en la zona de dureza intermedia; pero es en la piscina de la zona blanda, (costado occidental, sector S), donde se observan tallas de gran detalle como la cabeza antropomorfa y la forma zoomorfa. En el pozo del sector O, donde la roca muestra una alta dureza, no se encuentra ninguna talla. Lo anterior permite suponer que cuando se talló la Fuente, la roca ya presentaba diferentes durezas y composiciones.

Los deterioros de la roca, sus procesos y velocidad

Como se describió anteriormente, la Fuente se talló en toba volcánica, roca caracterizada por sufrir un rápido deterioro que es potenciado en ambientes húmedos. Teniendo en cuenta estas características y el hecho de haber estado expuesta al agua

por miles de años, la Fuente se encuentra en un buen estado de conservación. Sin embargo, se presentan varios deterioros y la pérdida de formas descritas anteriormente.

En los últimos años se ha reportado preocupación en cuanto al avance del deterioro de la Fuente. Sin embargo, durante los estudios desarrollados, no se pudo confirmar esta observación.

El único punto de referencia en los estudios anteriores son algunas descripciones realizadas en los años 40s y 50s, y fotografías que datan del descubrimiento de la Fuente, las cuales en su gran mayoría no permiten realizar comparaciones entre el estado actual y el anterior. En varias fotos se observa la pérdida de formas, específicamente desprendimientos, pero incluso, si se logran constatar algunas pérdidas, es incierta la manera en la que este proceso ocurrió. Resumiendo los datos y observaciones de los estudios realizados entre 2008 y 2012, es muy posible que estos hayan sucedido en gran medida después del descubrimiento, como lo menciona Pérez de Barradas en 1943 (Barradas, 1943: 102): “en mi última estancia en San Agustín pude comprobar que ya habían desaparecido varios relieves y que la fecha de destrucción completa estaba próxima, no sólo por la acción de la intemperie, sino por los visitantes y dueños del terreno que han escogido el lugar para lavar ropa y para baño” (Pérez de Barradas, 1943: 102).

Los deterioros que se encuentran hoy en día en la roca de la Fuente son fisuras, desprendimientos, decohesión y decohesión asociada a fisuras más grandes. Predominantemente, los deterioros se dan por procesos muy lentos, tales como la entrada constante de agua en las fisuras, y los ciclos de mojado y secado que están asociados con la expansión y contracción de la roca. Resumiendo la información que existe hasta la actualidad, podemos afirmar que, con las condiciones relativamente estables que hay en este momento, no deberíamos contemplar grandes avances en el deterioro.

Es la llamada zona blanda la que se encuentra en avanzado estado de deterioro, pero incluso en esta zona no hay certeza de su velocidad.

En cuanto a su causa, los estudios indican que éste se debe a procesos que empezaron en el momento en el que se formó la roca, y que, cuando se talló la Fuente, ya existía una roca con diferentes propiedades en sus diferentes zonas. Todavía no es del todo claro el cómo pudo diferenciarse tanto la roca en un área que no es tan grande, pero podemos afirmar que en la zona blanda observamos una mayor presencia de fracturas geológicas, lo que facilita la entrada de agua. Teniendo en cuenta que los procesos de degradación de la roca no se desarrollan de manera lineal sino exponencial, esto significa que si una piedra ya muestra una cierta degradación, o si absorbe ya una cierta cantidad de agua, los procesos de deterioro avanzarán más rápidamente. Fue entonces en la zona blanda, donde la piedra mostró una extensa meteorización cuando fue tallada, donde desde entonces los factores del deterioro, en particular el agua, han

incidido hasta el punto que hoy en día la zona se encuentra en un avanzado estado de deterioro.

Existe también la hipótesis de que los suelos que recubrieron durante varios cientos de años esta zona y su cercanía a la pared húmeda recubierta de vegetación, contribuyeron al deterioro, dada la retención de humedad y la proliferación de organismos. Como se pudo aclarar junto con los profesores Hauff y Wendler durante la Mesa Internacional de Trabajo en el 2012, existen dos razones por las que esto parece muy poco probable. (I) El tipo y el grado de alteración estudiado es un proceso lento que se da básicamente en tiempos geológicos y (II) la alteración de la roca (o también la formación de suelos) está asociada a condiciones inestables, tales como cambios de temperatura y humedad. Es entonces muy poco probable que la alteración se haya dado bajo condiciones estables mientras la piedra estuvo cubierta de suelo. Lo cierto es que cuando se redescubrió el sitio en los años 40's, esta zona experimentó grandes cambios, lo que generó tensiones en la piedra y seguramente incidió en el avanzado estado de alteración que hoy manifiestan las zonas más occidentales de los sectores S y W.

La zona blanda generó discusiones opuestas durante la Mesa Internacional de Trabajo en el 2012. Mientras que la microbióloga ve un gran riesgo en los microorganismos que colonizan toda la zona blanda, las restauradoras de piedra y los expertos alemanes ven esta colonización como un proceso que es incluso favorable, ya que podría tener un efecto de capa protectora.

El biodeterioro

El biodeterioro incluye organismos como microalgas, líquenes y bacterias sulfatoreductoras y nitrificantes, los cuales son colonizadores primarios y condicionan la superficie rocosa para el desarrollo de los demás organismos como bacterias, hongos y plantas. En cuanto a los microorganismos, estos persisten en la roca gracias a la estructura de biofilms desarrollada, que les da protección contra la radiación solar, la desecación y los cambios de pH, entre otros. Tanto las características físicas del poro de la roca como las condiciones ambientales (T°, HR e insolación) favorecen el crecimiento de organismos principalmente fotosintéticos.

La presencia de biodeterioro tiene un impacto en dos aspectos: por un lado afecta la roca a nivel estético, pues los diferentes colores y texturas de las algas, líquenes y plantas modifican la apreciación de la superficie pétreo. Por otro lado, la presencia de estos organismos contribuye con los procesos físico-químicos de degradación de la roca dados por biolixiviación producida por las algas, por la absorción y retención prolongada de agua, lo que puede facilitar el debilitamiento del soporte por acidólisis.

Las bacterias aportan productos metabólicos como compuestos reducidos y oxidados de azufre, ácido nitroso y nítrico que contribuyen con la degradación de la superficie de la piedra. De igual manera los hongos aportan a la superficie rocosa ácidos orgánicos como

el cítrico, oxálico, glucónico, láctico y fumárico los cuales forman agentes quelantes, que favorecen la disolución del sustrato. Los Coliformes totales y fecales tienen un metabolismo fermentativo y productivo de ácidos mixtos como el propiónico, succínico y láctico, contribuyendo a brindar condiciones favorables para el establecimiento y desarrollo de hongos. Los líquenes, por su parte, ejercen presión física en el soporte por las contracciones y expansiones del talo en función de la humedad, y por tanto de la absorción de agua, y sirven de punto para el arraigo de plantas vasculares pequeñas, musgos y hepáticas entre otras. También producen ácido carbónico, excreción de ácido oxálico y generación de compuestos liquénicos con propiedades quelantes. En la Fuente los biofilms contribuyen al deterioro de la roca de manera general y en la zona blanda se suman a la acción deteriorante de las plantas y sus raíces. El agua favorece el crecimiento de organismos como algas, líquenes, musgos, hongos, bacterias, coliformes, hepáticas y plantas.

Considerando lo anterior, según Villalba, realizar el control del biodeterioro minimiza las causas de alteración de la roca.

El agua

Considerando que el agua juega un rol fundamental en la meteorización de la roca, el deterioro en la zona dura es mínimo pues allí el agua casi no entra en la estructura pétreo. De igual manera, como se puso de manifiesto con los estudios de las características físicas, en la zona intermedia, a excepción de las partes que muestran decohesión, el agua casi no penetra en el interior de la estructura pétreo y causar deterioro. Es en cambio en la zona blanda donde observamos una profunda infiltración de agua, lo que contribuye fuertemente con los procesos de deterioro.

Lo anterior permite concluir que en gran parte de la Fuente (zona dura y zona de dureza intermedia) no hay necesidad de quitar el agua.

En la parte más blanda de la Fuente, (lastimosamente, la parte que tiene la talla más detallada y que es por lo tanto muy valiosa), el agua sí es un factor importante de deterioro. Pero incluso allí no es considerado favorable quitar el agua en este momento por el siguiente motivo: la piedra en esta zona ya se encuentra muy alterada, dejarla secar implicaría correr el riesgo de poner a la piedra bajo tensiones que pueden causar aún más deterioros. Se considera entonces fundamental en este momento estabilizar las condiciones en esta zona. Como se explicó ya, es el cambio de las condiciones, por ejemplo los ciclos de secado y mojado, los que generan tensiones y deterioro. Para evitar dichas tensiones lo mejor es que la zona mantenga siempre la misma humedad.

A pesar de que el agua favorece el crecimiento de organismos biológicos tales como algas, líquenes, musgos, hongos, bacterias, coliformes, hepáticas y plantas: como se pudo demostrar, no contribuye en gran medida al deterioro de la Fuente y puede

incluso generar condiciones equilibradas favorables. Por esto se descarta la posibilidad de suspenderla.

El cobertizo

Si bien durante los años 80's y 90's se dudaba de la efectividad del cobertizo y se consideraba que su presencia era perjudicial para la conservación de la Fuente, gracias a los estudios de las condiciones ambientales y las características físicas de la roca, la presencia del cobertizo atenúa el impacto de la intemperie y no causa un efecto negativo en la conservación de la roca.

Por el contrario contribuye con la estabilidad de las condiciones por lo que se considera muy favorable para la conservación de la Fuente

Las condiciones de equilibrio

Como mencionamos anteriormente, los procesos del deterioro están asociados a cambios o condiciones inestables. No es la entrada de agua a la roca lo único que ocasiona el deterioro sino los múltiples ciclos de expansión y contracción.

Para asegurar la conservación de la Fuente lo más importante es entonces que se creen condiciones estables. En este momento, y en gran medida gracias a la presencia del cobertizo, y a que existe un sistema de circulación del agua que deja ingresar siempre el mismo caudal, encontramos una situación relativamente estable.

Considerando lo anterior se recomienda estabilizar aún más el clima ambiental de la Fuente. Además con respecto al agua, como fue mencionado, es recomendable que el caudal corra siempre y que el agua no se rebose por encima de la piedra ni se salga de los canales en el evento en que, por ejemplo, crezca la quebrada. Cuando se apaga el sistema de circulación de agua llevan a que la piedra comience a secarse, y se expanda de nuevo cuando el agua ingresa de nuevo.

Si bien hoy no es del todo claro qué tanto se seca la Fuente en el lapso de tiempo en que se apaga el sistema de circulación del agua, (entre las 5 de la tarde y las 9 de la mañana del día siguiente), es muy importante que no se cambien las condiciones de humedad que inciden en la roca de la Fuente.

En la pileta del sector blando justo sobre la figura antropomorfa hay una zona por donde no corre el agua. Aunque es recomendable hacer un monitoreo específico para esta zona, las observaciones realizadas señalan que sería ideal que en esa parte también corriera el agua.

Necesidades de conservación

Los deterioros que causan más pérdidas en toda el área de la Fuente son los desprendimientos. Como se describió ya, estas son porciones de piedra que se desprenden en dirección horizontal.

En segundo lugar es la decohesión y la decohesión asociada a fisuras más grandes las que causan deterioros.

Si se evita que se pise la superficie de la Fuente, y que la quebrada no se rebose, el avance del deterioro no debería ser mayor.

Con el fin de poder acceder a la Fuente para realizar su mantenimiento estos deterioros deben tratarse con procesos de consolidación.

La zona blanda, la zona más deteriorada de la roca, ya ha sufrido un proceso de transformación a suelo y los organismos arraigados allí, como parte de este sistema no permiten su disgregación, por lo que no deben eliminarse en este momento.

Finalmente es de gran importancia comprender rigurosamente la velocidad del deterioro.

2.8. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE BIOCIDAS PARA EL CONTROL DEL BIODETERIORO

Luz Stella Villalba Corredor*

De acuerdo con los resultados obtenidos en los proyectos de investigación del 2008 y 2011, donde se identificaron los organismos que están ocasionando los procesos de biodeterioro, se desarrolló la segunda etapa que consistió en la evaluación de diferentes productos biocidas de síntesis química para controlar el deterioro. A continuación se describe la metodología, recomendaciones y conclusiones de la investigación.

- Colecta del material biológico para los ensayos frente a los biocidas (fase de campo y laboratorio)
- Selección de productos biocidas
- Ensayos de toxicidad (Concentración Mínima Inhibitoria (CMI) y tiempo de contacto) y efectos sobre el material pétreo.
- Ensayos *in situ* de los productos seleccionados

I. COLECTA DEL MATERIAL BIOLÓGICO PARA LOS ENSAYOS FRENTE A LOS BIOCIDAS.

Los organismos aislados para efectuar los ensayos con los biocidas fueron bacterias gram positivas, hongos filamentosos *Penicillium* sp., *Aspergillus* sp., *Mucor* sp. y *Mortierella*. En cuanto a las microalgas, de los cultivos realizados se observó alta dominancia del género *Anabaena* (Cianobacteria) que se mantuvo hasta el final de los cultivos, seguido de las diatomeas, algunas especies fueron remplazadas por otras y los géneros más importantes fueron: *Achnanthes*, *Naviculaceae*, *Nitzschia*, *Amphora*, *Cymbella*, *Frustulia* y *Achnanthidium*, géneros representativos para los ensayos.

Los cambios más perceptibles se observaron con el grupo de las Clorofíceas, y con el tiempo se incrementó el número de células de los géneros *Selenastrum*, *Coelastrum* y *Chlorella*, este grupo se proyectó a ser el dominante. El hecho de que la composición de los géneros de algas en los cultivos cambiara, fue determinante para la tendencia esperada en la composición celular de los cultivos, pues se lograron géneros resistentes a ciertas condiciones ambientales, ideal para la prueba de toxicidad para obtener resultados confiables respecto al rango de acción de los productos.

II. SELECCIÓN DE PRODUCTOS BIOCIDAS

Teniendo en cuenta que éste es un bien patrimonial con valores históricos, los productos biocidas escogidos para esta investigación cumplieron con los siguientes requisitos: Eficacia contra los agentes biológicos, no interferencia con los materiales constitutivos del bien, baja toxicidad para el hombre, bajo impacto ambiental, bajo costo y mínima concentración.

La eficacia de los biocidas, referidos como agentes bactericidas, fungicidas, alguicidas y herbicidas, será considerada de acuerdo a la dosis del producto necesaria para ejercer su acción (cantidad de biocida/ unidad de volumen de aire o superficie) y el espectro de acción (amplitud de actividad contra los organismos a controlar) (Caneva, *et. al.*, 2000).

Los productos seleccionados para las pruebas de laboratorio se describen a continuación:

1R3- Rocima 363: Combinación de carbendazina, octylisothiazolona y diuron. Este biocida de amplio espectro se caracteriza por tener una rápida degradación, mínima toxicidad, mínima bioacumulación y ser efectivo a bajas concentraciones.

2K-Kathon LX 1.5%: Microbiocida de amplio espectro efectivo para controlar bacterias aerobias y hongos filamentosos y levaduras cuyos ingredientes activos son 5-cloro-2metil-4isotiazolinona/ 2metil-4isotiazolinona, cloruro de magnesio, nitrato de magnesio y nitrato cúprico **1.5%**. Este producto se caracteriza por ser económico, de baja toxicidad, requiere mínimas concentraciones de uso, baja persistencia en el ambiente y ha sido registrado por la EPA (Environmental Protection Agency).

3P-Preventol WB L-A: Es una combinación de sustancias Fenólicas exento de pentaclorofenol, soluble en agua, biodegradable y de fácil manejo. Tiene efecto fungicida y bactericida.

R6-Rocima 622: Es una combinación de sustancias de control biológico, compuesto básicamente de isotiazolinonas (clorometil-metilisotiazolinona) y formaldehído.

CD601-Preventol CD 601: Es una combinación de clorometacresol, ortofenilfenol y glutaraldehído como ingredientes activos con un amplio espectro, efectivo a una mínima concentración.

III. ENSAYOS DE TOXICIDAD Y EFECTOS SOBRE EL MATERIAL PETREO.

Del material biológico recuperado e identificado se seleccionaron dos hongos filamentosos: *Penicillium sp* y *Aspergillus sp*, y dos bacterias aerobias: cocobacilo Gram negativo y bacilo Gram positivo, para evaluar la efectividad de los productos se empleó la técnica de Gauze Ellis y Waller (1997), NCCLS (1997): Concentración Mínima Inhibitoria y tiempo de contacto. De cada uno de los productos se evaluaron tres concentraciones y los ensayos se efectuaron por cinco replicas para fines estadísticos.

Según el protocolo, halos mayores de 9mm indicaban sensibilidad del microorganismo a la concentración evaluada del producto (Escobar & García, 2007).

Para el compoente algal se realizaron los Ensayos de Concentración Mínima Inhibitoria (CMI) y Toxicidad (USEPA, 2002). En esta etapa de laboratorio, se trabajó con el producto que obtuvo los mejores resultados en términos de efectividad, acción al menor tiempo y con la menor concentración: Rocima 363. Se evaluó el efecto de los dos solventes agua y alcohol al 75%.

Para el conteo con microscopio se siguieron las recomendaciones de APHA (1992) o USEPA (1973), Lund *et al.*, (1958), se contaron hasta 400 células por replica para obtener $\pm 10\%$ de precisión y un 95% de nivel de confianza, en un microscopio Olympus.

Para evaluar el efecto del biocida seleccionado sobre el material, éste se sometió a un tratamiento de inmersión, en condiciones extremas con el biocida seleccionado a la máxima concentración y se compararon los elementos químicos presentes en el mineral antes y después del tratamiento, por medio de análisis cuantitativo realizado con la técnica de Fluorescencia de Rayos γ y se efectuaron análisis petrográficos antes y después del ensayo, igualmente se evaluaron cambios cromáticos.

Así, una probeta de la roca de ensayo, se sumergió en una dispersión acuosa del producto comercial ROCIMA – 363, en concentración del 7%, concentración extrema, teniendo en cuenta los ensayos de Concentración Mínima Inhibitoria que recomienda entre 3,12 y 5,62%, y se mantuvo a temperatura constante de 60°C en estufa, durante 72 horas continuas. Este tratamiento en condiciones extremas de humedad y temperatura, tiene como finalidad verificar si se presentan alteraciones en la concentración de los componentes elementales de la roca bajo la acción agresiva del biocida.

El material de las probetas de roca, procesadas para los análisis de Fluorescencia de Rayos X, antes y después del ensayo bajo condiciones extremas se entregó al Centro de Equipos Inter Facultades-CEIF-Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia, para el análisis cuantitativo de composición elemental. Las muestras fueron referenciadas como se observa en la Tabla 10.

Tabla 13. Códigos de referencia para análisis cuantitativo de composición elemental.

REFERENCIA MUESTRA	REFERENCIA CEIF
Muestra 1 toba volcánica: fragmento de roca antes del ensayo bajo condiciones extremas.	XRF - 1417
Muestra 2 toba volcánica: fragmento de roca después del ensayo bajo condiciones extremas	XRF - 1418

IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- ***Bacterias aerobias y hongos filamentosos***

El conjunto de datos obtenido de los análisis de CMI presentó una distribución normal en relación con la variable observada (diámetro del halo de inhibición frente al producto biocida). Esto favoreció la aplicación de las pruebas estadísticas convencionales (ANOVA y prueba *t*) para la comparación de los resultados. Estos mostraron la comparación estadística de las medias observadas del halo de inhibición para los diferentes niveles de biocida aplicados y su efecto sobre los microorganismos analizados de acuerdo con la eficacia comparativa de la concentración.

Según los análisis respectivos, el producto Preventol CD 601, evidenció los resultados más altos (estadísticamente significativos) con relación al diámetro del halo de inhibición en comparación con los productos restantes. Únicamente en el caso del Hongo filamentoso 2, el producto Rocima 363 presenta un halo estadísticamente más amplio. Una comparación con los resultados de las concentraciones máximas arroja conclusiones similares. El producto Preventol CD 601 exhibe los halos de inhibición mayores, seguido por Rocima 363.

En síntesis, con el producto Preventol CD 601, se obtuvo los halos de inhibición significativos para la mayor fracción de los microorganismos analizados, en particular en el conjunto de las Bacterias Gram. Por otra parte, el producto Rocima 363, presentó resultados comparables al Preventol CD 601, con halos de inhibición superiores a 9mm.

- ***Microalgas***

Se prepararon 6 soluciones del producto, las tres primeras diluidas en agua destilada para obtener concentraciones finales de 1.56%, 3.12% y 6.25%, las tres siguientes diluidas en alcohol al 75% para obtener las mismas concentraciones. Cada solución se evaluó usando cuatro réplicas más dos adicionales para hacer medidas en los tiempos $T=2h$ y $T=24h$, se agregó un 0.4ml de la solución de producto a evaluar por cada 1.8ml de medio de cultivo. Para facilitar el análisis de resultados se llevaron formatos de control.

Los resultados presentaron tendencia lineal, a medida que aumenta la concentración del producto, la concentración de células disminuye.

Según los resultados obtenidos, podría afirmarse que las Cianobacterias son un componente sensible. Se pueden utilizar los dos solventes, el alcohol puede presentar una actividad tóxica, pero este se volatiliza muy rápido por lo que su efecto es poco

duradero, sin embargo, su volatilidad contribuye a mantener la concentración del producto usado en campo y de este modo aumentar su efectividad comparado con el diluyente agua destilada.

Los resultados usando policultivos (comunidad de algas del lugar) nos presenta una LC50 (concentración letal) a una concentración del 12% para el producto disuelto en agua, y una LC50 a una concentración al 15% del producto disuelto en alcohol al 75%, mostrando mejores resultados el producto disuelto en agua destilada. Cabe anotar que en los tubos hubo poca volatilidad del alcohol ya que se mantuvieron sellados durante toda la prueba, en el Lavapatás está volatilidad será máxima pues la aplicación se hará al aire libre.

Se realizó un análisis de sobrevivencia a partir de una prueba Probit para detectar la concentración letal al 50%, para esto se utilizó el programa PROBIT PROGRAM VERSION 1.5 de acceso libre el cual mostró que la concentración letal calculada es del 5.6298%.

Los resultados obtenidos por conteos y el análisis Probit realizado a los datos de absorbancia nos permiten recomendar como máximo la concentración al 6.25% y como mínimo 3.12% del producto disuelto en agua, ya que una concentración mayor puede provocar desgaste en la roca y residualidad del tóxico en el ambiente que afecte otras comunidades de organismos. Independientemente de la regeneración de células al final de la prueba, este rango de concentraciones demostró una alta efectividad al inicio de la prueba de toxicidad.

- **Evaluación del biocida seleccionado frente al material**

Los resultados del análisis XRF, se presentan en forma de compuestos para los primeros diez elementos que están en mayor concentración en los minerales, esto es en porcentaje de óxidos, y para los demás, se expresan en partes por millón (ppm) del elemento metálico, tal como de se presentan a continuación en la Tabla 11:

Tabla 14. Concentración de minerales antes y después del tratamiento biocida

Compuesto y/o elemento	XRF – 1417 (antes)	XRF – 1418 (después)	RMS*
SiO ₂	66.77	67.29	+/+ 0.62655
Al ₂ O ₃	19.97	21.02	+/- 0.94270
Fe ₂ O ₃	3.90	1.60	+/- 0.16874
Na ₂ O	0.88	0.79	+/- 0.00669
K ₂ O	0.31	0.34	+/- 0.03693
MnO	0.25	0.16	+/- 0.00478
TiO ₂	0.25	0.23	+/- 0.01726
CaO	0.23	0.21	+/- 0.02637
MgO	0.09	0.08	+/- 0.00890
P ₂ O ₅	0.02	0.02	+/- 0.00873

Zr	229ppm	206ppm	+/- 0.00041
Sn	80ppm	87ppm	+/- 0.0090
Sr	48ppm	46ppm	+/- 0.00102
Nb	27ppm	28ppm	+/- 0.00047
Rb	20ppm	33ppm	+/- 0.0056
Cr	--*	22ppm	+/- 0.00235
Y	13ppm	14ppm	+/- 0.00058

El análisis comparativo de los resultados de concentración de elementos en forma de óxidos, en las muestras 1 y 2, nos determinó lo siguiente:

Las ligeras diferencias en las concentraciones de los elementos mayores: sílice como SiO₂, aluminio como Al₂O₃ y hierro como Fe₂O₃, corresponden a variaciones naturales en la composición mineral de la roca, cuya heterogeneidad especialmente en la distribución de ferro-magnesianos es evidente a simple vista en las muestras analizadas. Este fenómeno se aprecia con mayor claridad en los datos de sílice y alúmina, los cuales presentan valores de concentración algo mayores en la muestra analizada después del tratamiento.

Otros elementos, como los alcalino-térreos, los cuales sí son susceptibles de sufrir transformaciones químicas de hidrólisis en condiciones extremas de humedad y temperatura, no presentan cambios significativos, que puedan sugerir deterioro de los compuestos y minerales de la toba volcánica, tal como se aprecia en la comparación de los resultados antes y después del tratamiento en las concentraciones de los óxidos de sodio, potasio, calcio y magnesio.

De acuerdo con las observaciones anteriores, se puede concluir que el producto ROCIMA 363, en baja concentración o en las concentraciones evaluadas y recomendadas, no ejerce acción química alguna sobre los compuestos minerales de la roca de la Fuente. Esta conclusión confirma la postura teórica de la inocuidad de las sustancias orgánicas (biocidas) sobre las estructuras minerales, en cuanto a su posible actividad química en reacciones de hidrólisis o de oxidación. Lo anterior, se hace extensivo a otras sustancias orgánicas de similar categoría, como el PREVENTOL CD601.

V. ENSAYOS *IN SITU* DE LOS PRODUCTOS SELECCIONADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos en laboratorio sobre el producto 1R3: Rocima 363 y extensivos a Preventol CD601 en relación con el espectro de acción, inercia sobre el material, concentración y tiempo idóneos para el control de los organismos, se procedió a su aplicación en campo. De acuerdo con los resultados obtenidos en laboratorio sobre los productos 1R3.

Con la restauradora del ICANH Patricia Ramírez se seleccionaron cuatro puntos de los sectores S, P, V, B, cada uno con área de 20cm² (0.04m²). Para ésta selección se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: el nivel de biodeterioro, la diversidad de organismos deteriorantes y la cobertura.

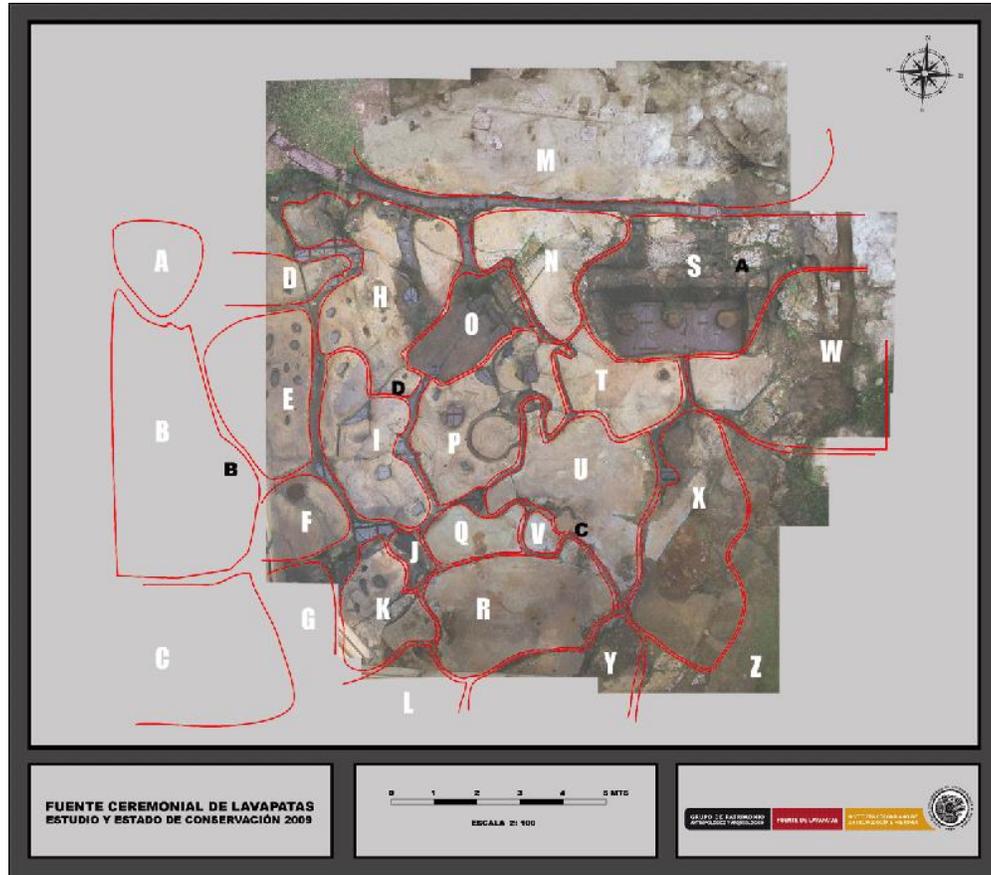


Figura 47. Aplicación del producto biocida

Se preparó un litro de cada producto seleccionado, Rocima 363 y Preventol CD601, disueltos en agua a la concentración de 3,12%. El método de aplicación utilizado fue por aspersión. Por otra parte, para la primera aplicación, previamente no se efectuó ningún tipo de limpieza, pues al intentar eliminar los organismos se ocasiona daño mecánico a la roca, por el crecimiento abundante y colonización de éstos por los rizoides y raicillas que están adheridas fuertemente y que penetran en muchas ocasiones el lecho rocoso.

Por lo tanto con la primera aplicación del producto se da muerte a los organismos de los primeros estratos de biodeterioro y se permite efectuar una limpieza mecánica segura, sin deterioro alguno para el material. La limpieza es un procedimiento esencial para complementar el tratamiento sobre el material.

En la investigación se llevaron a cabo dos niveles de limpieza: Nivel 1, posterior a la primera aplicación y un nivel 2, luego de la segunda aplicación, que eliminó por completo los restos de organismos de los últimos estratos de biodeterioro de la

superficie, dejando el lecho rocoso libre de contaminantes. Es importante mencionar que es necesario verificar que se eliminen todos los estratos de biodeterioro, para evitar la rápida re infestación.

De acuerdo con lo anterior se llevó a cabo el siguiente esquema:

Tabla 15. Ensayos *in situ* de los productos seleccionados

Primera aplicación	Limpieza nivel 1	Segunda aplicación	Limpieza nivel 2
Periodo de evaluación del 3 de julio al 3 de agosto de 2009. Producto evaluado Rocima 363. tres aplicaciones, cada una por tres días consecutivos y cada día en dos momentos: a las 10:00am y 4:00pm	limpieza mecánica en seco y húmedo para remover materia orgánica y facilitar la acción del producto en la siguiente aspersion	Periodo de evaluación del 8 al 31 de agosto de 2009 Producto evaluado Preventol CD 601.	limpieza mecánica en seco y húmedo para remover materia orgánica y eliminar los restantes estratos de organismos muertos

A continuación se presenta el registro fotográfico, que evidencia la efectividad de los productos evaluados:

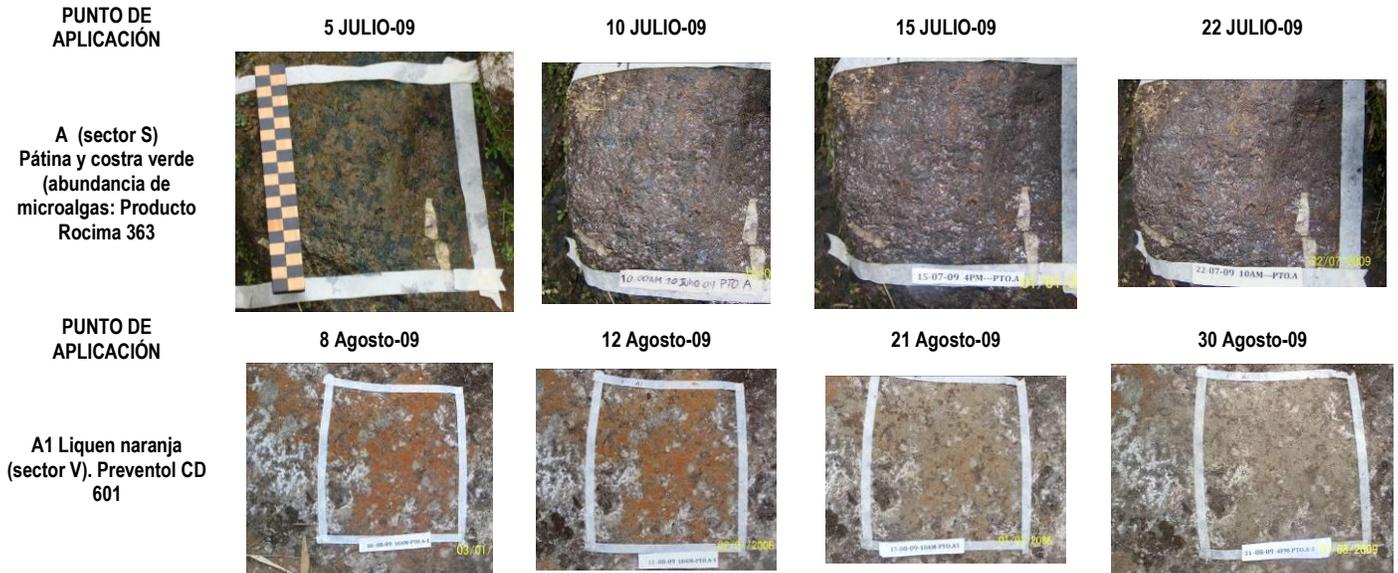


Figura 48. Efectividad de los productos evaluados

CONCLUSIONES

Considerando las condiciones ecosistémicas descritas en el apartado del biodeterioro, es vital que la selección de productos de control se continúe, bajo el esquema evaluado y aprobado con este proyecto de investigación, pues como es de conocimiento universal, los organismos tienden a desarrollar resistencia con el tiempo y lo más importante es que la tendencia a la formación de biofilms, es una estrategia efectiva para contrarrestar la acción letal de los productos biocidas. Es de mencionar que el control de bacterias Gram negativas es vital en superficies rocosas, pues ellas juegan un papel crucial en la formación y estabilización de los biofilms. Su tratamiento representa una vía para controlar el biodeterioro. Miembros del género *Pseudomonas* y *Sinorhizobium*, son productores potenciales de EPS (Alakomi, H.L. *et. al.*, 2006), adicionalmente poseen una membrana celular rica en lipopolisacárido, que actúa como barrera para evitar la entrada de los principios activos de los biocidas, por lo tanto la eficacia de los productos contra este grupo de organismos debe considerarse un parámetro de selección a la hora de evaluar los biocidas, lo anterior se pudo confirmar con los productos a base de isotiazolinonas y el ortofenilfenol: ROCIMA 363 y PREVENTOL CD601.

Igualmente, se confirmó en campo la efectividad de los productos sin alterar la roca. La acción letal de los biocidas ROCIMA 363 y PREVENTOL CD601, fue evidente para los líquenes.

El uso de isotiazolinonas en combinación con el diuron, tienen excelentes resultados. El diuron ya se había utilizado en un trabajo de investigación en la zona arqueológica de Palenque México, por el Dr. Pablo Torres Soria del Instituto Nacional de Antropología e Historia para el control de algas de los templos. En este caso la formulación adicionada con isotiazolinonas, brinda mayor eficiencia al tratamiento, pues tiene mayor espectro de acción. De manera que su uso para el control de las microalgas responsables de las costras y pátinas verdes en los sectores S, O y L, sería muy significativo.

Igualmente, la formulación es más segura para el operario y para el medio ambiente, sin embargo es estrictamente necesario que se aplique considerando las normas mínimas de bioseguridad, como guantes de caucho, tapabocas, overol y monogafas protectoras, pues son productos irritantes.

De otra parte, la limpieza es un procedimiento necesario para complementar el tratamiento, pues además de ayudar a la apreciación de las formas de la fuente y su correcta interpretación, remueve los restos de materia orgánica (líquenes, algas y demás organismos) y es un paso fundamental previo a un tratamiento de consolidación para mejorar la adhesión de los agentes protectores.

Es importante seguir el esquema propuesto, prestando atención al momento de llegar al soporte y que quede libre de agentes deteriorantes, que en algún momento pueden reactivarse.

Otro punto a tener en cuenta son las manchas oscuras producto de la mineralización de la clorofila de las microalgas, este fenómeno se da principalmente en los canales de la fuente. La eliminación de esa oscura coloración podría efectuarse por medio de solventes (tolueno, dimetilo dialquil-hidroxido de amonio cuaternario y metanol.) (Rodríguez, D & Valero J, 2002), sin embargo es necesario que se realice previamente un estudio de este particular.

Para la limpieza de plántulas, se recomienda no arrancarlas vivas, sino después de la aplicación de los biocidas, para que posterior a la muerte se sequen y sea fácil retirarlas sin producir daños físico-mecánicos en las zonas donde están adheridas, para este caso se debe tener en cuenta las zonas de dureza baja para evitar deterioros del material.

Finalmente, es importante mencionar que si se prevé una consolidación del material, se debe tener en cuenta que con el advenimiento de la ciencia de los materiales en las últimas décadas, ha sido dramático el uso de polímeros sintéticos como adhesivos, consolidantes y cubiertas protectoras por artistas y conservadores. Sin embargo no se debe desconocer que muchos de ellos se han reportado por ser degradados por microorganismos, de manera que es importante asegurarse, que el producto o productos a utilizar no sean fácilmente degradados por microorganismos.

2.9. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DEL CONSOLIDANTE PARA ZONAS DECOHESAS

Helen Jacobsen*

Como se demostró en los estudios anteriores, uno de los deterioros que más afecta actualmente la conservación de las formas esculpidas es la decohesión. El tratamiento de conservación adecuado para este tipo de deterioro es la consolidación. El consolidante adecuado se determina a partir de estudios comparativos donde se evalúan diferentes consolidantes, sus concentraciones y efectos en la roca.

Metodología

La investigación siguió la metodología propuesta por Snethlage, Wendler y Sasse (Snethlage & Wendler 1995; Sasse & Snethlage, 1996; Snethlage 1997) que consta de las siguientes etapas:

- Toma de muestras en la Fuente Lavapatas en una parte de menor importancia y sin talla. Y selección de muestras adecuadas para el estudio comparativo en el laboratorio SIKA, Bogotá.
- Estudio geológico de las muestras
- Selección de los materiales consolidantes a evaluar.
- Determinación de las características físicas de la roca antes y después de la consolidación en los laboratorios de la Universidad de Ciencias aplicadas de Potsdam, Alemania

Procedimiento

Este estudio tenía como objetivo determinar un consolidante adecuado para tratar el deterioro conocido como **decohesión** que se describe en detalle en el capítulo 2.3. Se trata de una desagregación de mínimas partículas de roca y se manifiesta con la pulverulencia de la superficie rocosa. Con la prueba al tacto con la que se comprueba este deterioro, partes de roca de tamaño mínimo se desprenden fácilmente.

Para el estudio se usaron dos rocas que provenían una directamente de la Fuente (roca A) y una que se encontró suelta (roca B) en el lecho de la quebrada. Durante los estudios se observaron varias diferencias entre la roca original de la Fuente A y la roca B. Es por eso que se decidió no seguir trabajando con la roca B. La roca A fue apta para el estudio y aparece descrita en el capítulo 2.2.2.



Figura 49: Vista general de la zona donde fue tomada de la muestra A. Corresponde a la zona norte donde no hay evidencia de talla
Foto der. : Detalle de la zona de donde fue tomada de la muestra A para el estudio consolidante.



Figura 50: La muestra B que se encontraba suelta en el lecho de la Fuente

Preparación de los núcleos



Figura 51: Núcleos que se extrajeron de la muestra Algunos de estos núcleos se seccionaron debido a las discontinuidades características de la roca.

Para realizar un estudio comparativo se necesita contar con una gran cantidad de muestras que se encuentren en el mismo estado de conservación y que presenten características similares a las de las zonas decohesas. Por lo cual se decidió deteriorar artificialmente una gran parte de los núcleos extraídos de las rocas A y B. Después de revisar las diferentes posibilidades para realizar el deterioro artificial (Pérez et al. 1995; Matteini & Moles 1990: 149ss.; Grimm & Schwarz, 1984: 81ss.; Sneath, 1984: 118ss; Menzl, 2002; Jacobsen, 2006) se decidió usar el método de calentamiento y enfriamiento, lo que resultó efectivo.

Las muestras deterioradas (artificialmente) mostraron un deterioro muy parecido al deterioro “decohesión” presente en la Fuente. Como sucede *in situ* también poseían un perfil de deterioro con la parte superior más deteriorada y la parte inferior menos deteriorada. Mientras que las series deterioradas entonces permitieron entender los efectos de los diferentes consolidantes sobre la decohesión, se contó también con una serie original que no estaba deteriorada. Esta serie permitió entender qué riesgo se corre con la consolidación pues al aplicar el consolidante en una zona decohesa no se va a poder evitar que entre algo del consolidante en la zona alrededor en buen estado de conservación.

Con el fin de determinar los productos consolidantes que debían ser utilizados en la investigación sobre el material consolidante para las zonas decohesas, se llevó a cabo una revisión bibliográfica amplia. Esta puso de manifiesto, en primer lugar la dificultad de la consolidación de las tobas, piedras que han sido descritas como blandas, poco homogéneas y con poros poco favorables para la consolidación. Los resultados obtenidos por los diferentes estudios ponen en evidencia las dificultades encontradas y resumen al final que la consolidación de la toba es sumamente difícil y en algunos casos imposible. (Paterno & Charola 2000; Steindlberger & Auras 1999; Siedel, Honsinger & Breitbach, 1995; Stück, Forgó, Rüdrieh, Siegesmund & Török, 2008)

A partir de los resultados de la revisión se decidió hacer pruebas solamente con silicatos de etilo en diferentes concentraciones. Además, utilizar un producto que buscara disminuir la dilatación hídrica y uno que permitiera aumentar la conexión entre el consolidante y la superficie rocosa.

A continuación se presentan los productos aplicados y en la tabla 16 se presentan todas las series en detalle.

Productos consolidantes: Silicato de etilo KSE 300, Remmers, Loeningen - Alemania; Silicato de etilo elastificado KSE 300 E, Remmers, Loeningen – Alemania

Producto para aumentar la conexión entre el consolidante y la superficie rocosa: Primer. Acido tartárico al 0,14 % diluido en alcohol etílico, Fischer

Producto para disminuir la expansión hídrica: Antihydro, Remmers, Loeningen - Alemania

Figura 52: En la foto se documenta la impregnación de núcleos con el Antihydro. producto que debería disminuir la dilatación hídrica, sucede en un flujo continuo.



Tabla 16: Resumen de las series de consolidantes.

Nombre de serie	Serie A	Serie B	Serie C	Serie D
Estado de conservación	Natural	artificialmente deteriorada	artificialmente deteriorada	artificialmente deteriorada
Nombre de los núcleos	A9, A1, A6-2	A7, A3, B4	A6, A4, A5	A8-1, A8-2, A2
Tratamiento contra la expansión hídrica.	X	X		
Impregnación con Primer		X		
Impregnación con silicato de etilo KSE 300 diluido 1:2 en alcohol etílico		X		
Impregnación con silicato de etilo KSE 300 diluido 1:1 en alcohol etílico	X	X	X	X
Impregnación con silicato de etilo KSE 300	X	X	X	
Impregnación con silicato de etilo KSE 300 E				X

La evaluación de los resultados siguió la metodología propuesta por Snethlage, Wendler (Snethlage & Wendler 1995; Snethlage 1997) y los estudios y el tipo de evaluación se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 17: Los estudios reglamentarios para la evaluación de las propiedades de la roca (Snethlage 1997; Snethlage, Wendler 1995)

1. propiedades y características relativas al espacio de poros	
Porosidad accesible al agua	Norma del Instituto Alemán de Normalización DIN 52102
Densidad aparente y densidad real	Norma DIN 52102
Porosimetría de intrusión de mercurio (PIM)	Norma DIN 66133
Isotermas de adsorción	
2. características de transporte de humedad	
Coficiente de absorción de agua por capilaridad en laboratorio	Norma DIN 52617
Permeabilidad al vapor de agua	Norma DIN 52615, "wet-cup"
Expansión hídrica	Norma DIN 52450
3. Resistencia mecánica	
Resistencia de tensión flexión y el módulo estático de la elasticidad	Wittman, Prim 1985. Sattler, 1992. Calculo de acuerdo con Kozub, 2008
4. Otros	
Velocidad de ultrasonido	generador ultrasonido, 350 kHz de frecuencia
Expansión térmica	Norma DIN 53752 Montaje de ensayo desarrollado en Fachhochschule Potsdam, Alemania. (Menzl, Schmeikal 2002)
Propiedades visuales	Estudio no estandarizado, sistema L*a*b
Profundidad de consolidación	Estudio no estandarizado

Tabla 18: Condiciones a cumplir en la evaluación de la consolidación (Snethlage, 1997: 81.)

Propiedad	Símbolo	Dimensión	Condición
Propiedades visuales / cambio de color	-	-	Ningún cambio de color, ningún oscurecimiento, ningún brillo
Coefficiente de absorción de agua	w	Kg/m ² √h	$W_{tr} \leq w_o$
Profundidad de consolidación	s	cm	Más profundo que la zona de de humedad máxima $w = 0,1 - 0,5: x = 1 \text{ cm}$ $w = 0,5 - 3,0: x = 3 \text{ cm}$ $w > 3,0: x = 6 \text{ cm}$
Expansión hídrica	α_{hy}	mm / m	Ningún aumento frente a la piedra no tratada (máx. aumento aceptable < 20 %) ³
Expansión térmica	α_T	K ⁻¹	Máx. aumento < 20% frente a la piedra no tratada ⁴
Factor de resistencia al vapor de agua μ	μ	-	Aumento $\leq 20\%$ (Aumento $\leq 50\%$) ⁵
Resistencia de tensión flexión	β_{Bz}	N / mm ²	$\beta_{Bz,tr} = \beta_{Bz,o}$ perfil equilibrado , si no: $(\beta_{tr} - \beta_o) / \beta_o < 0,5$ $\Delta\beta_i / \Delta x_o < 0,2 \text{ N/mm}^2 * \text{mm}$
módulo estático de la elasticidad	E	kN / mm ²	$E_i \leq 1,5 E_o$ y $E_i / \beta_i \leq E_o / \beta_o$ Y perfil equilibrado $\Delta E / \Delta x \leq 1$ kN / mm ² * mm
Velocidad de ultrasonido	v_p	km / s	$v_{p,tr} = v_{p,o}$

Índice o: piedra original, sin tratar **Índice tr:** piedra tratada **Índice x:** profundidad

Resultados y conclusiones

El estudio comparativo para la evaluación de consolidantes tuvo en cuenta los estándares y requisitos internacionales, se llevó a cabo en los laboratorios de la Fachhochschule (Universidad de Ciencias Aplicadas) de Potsdam, Alemania, y lleva a las siguientes conclusiones:

La evaluación de la velocidad de penetración reveló la dificultad de realizar el tratamiento de consolidación en la toba volcánica. A partir del coeficiente de absorción de agua se dedujo que 6 cm era la profundidad necesaria para una consolidación. Durante el proceso de consolidación fue muy difícil alcanzar esta profundidad a pesar de trabajar durante un tiempo extremadamente prolongado (hasta 15 horas para el silicato de etilo). Además se observó una gran heterogeneidad en el material rocoso. Es por esto

³ Snethlage, Wendler (1995), p. 14.

⁴ Ibid, p. 14.

⁵ Ibid, p. 14.

que se descarta cualquier aplicación de los productos consolidantes con pincel o aspersor, muy común en conservación de piedra. En lugar de eso se recomienda un método que asegure un flujo constante del consolidante en un tiempo prolongado. La mencionada heterogeneidad hace imposible planear una consolidación de manera general, pero en cada una de las zonas será muy importante reconsiderar la intervención.

El estudio demostró que la consolidación permitió la precipitación del gel al interior del espacio poroso de la roca lo que tiene varios efectos sobre ésta. La porosidad, la permeabilidad al vapor de agua y el coeficiente de absorción de agua disminuyeron en todas las series pero lo hicieron dentro de un marco muy aceptable. En cuanto a la absorción, comparándola con la absorción *in situ* que en gran parte de la Fuente es muy baja, la de las zonas consolidadas podría bajar aún más.

El estudio de la expansión hídrica reveló la eficacia del producto Antihygro que disminuye la expansión. Considerando que gran parte de la roca de la Fuente casi no absorbe agua y por eso tampoco expande mucho, y que las zonas decohesas en cambio, si absorben agua y según los resultados deberían tener una expansión hídrica marcada, se llega a la conclusión de que el uso del Antihygro es favorable.

No se pudo verificar la eficacia del producto ácido tartárico y por eso no se recomienda su uso.

La expansión térmica encontrada es muy equilibrada en todas las series y por eso no es un parámetro que requiera ser considerado en la evaluación de la consolidación.

Las propiedades más importantes dentro del estudio fueron la resistencia de tensión-flexión y el módulo estático de elasticidad que brindan información respecto a la posibilidad de estabilizar las zonas decohesas y de cómo cambia la rigidez de la roca al ser tratada. Se pudo demostrar que es la serie de la piedra en su estado original que mejores resultados mostró. Una consolidación en la zona cerca de la zona decohesa no debería causar efectos negativos y se obtuvo un perfil de dureza bastante equilibrado. Pero en las tres series deterioradas los resultados fueron muy heterogéneos y en ninguna serie se pudo generar un perfil de dureza y elasticidad favorable. Es más se generaron perfiles que tienen un alto riesgo de poder generar daños en la roca.

Sin embargo los resultados indican que se debería plantear una serie más. Mientras que en la parte inferior se debería realizar la consolidación con el producto silicato de etilo muy diluido (2:1) es solamente en el primer centímetro de la parte superior donde se debería aplicar un consolidante más concentrado. Es importante que estas indicaciones se verifiquen primero en laboratorio.

3. PROCESOS Y TRATAMIENTOS RECOMENDADOS A FUTURO

3.1 El agua y su calidad

Es de vital importancia que el agua que circula por la Fuente sea lo menos corrosiva posible y no presente material abrasivo ni contaminación biológica alguna. Por esto se hace necesario realizar un estudio del estado de las aguas y, posterior al conocimiento de los microorganismos contaminantes, un posible proceso de saneamiento. En la actualidad el agua que baña la roca de la Fuente proviene tanto de aquella que circula a través del sistema controlado de bombeo, como de la que se filtra por las paredes de vegetación del costado occidental de la Fuente, y aquella que proviene de la quebrada de Lavapatas la cual entra al área de la Fuente cuando el caudal crece.

Tanto la Mesa Internacional de Trabajo como el resultado de la evaluación del deterioro recomiendan el equilibrio constante del agua que compone la Fuente. Por eso resulta indispensable que un profesional en el tema plantee la manera en la que se debe realizar el manejo adecuado de las aguas, de forma que se controlen las filtraciones y se evite la entrada del agua de la quebrada en época de crecida.

En cuanto a la labor de estudio y posible saneamiento del agua estará a cargo de la microbióloga Luz Stella Villalba y contemplará el realizar análisis completos de las diversas aguas señaladas y su debido tratamiento. Debido a que el agua de los tanques se renueva mensualmente, es recomendable estudiar la calidad del agua al comienzo y al final del mes, mínimo cada dos meses.

3.2 Monitoreo de las condiciones medioambientales

Con el fin de identificar los cambios en los factores medioambientales que puedan afectar la conservación de la piedra, y determinar las condiciones con las cuales debe contar el cobertizo como medio atenuante, es necesario continuar con la toma de mediciones de humedad relativa y temperatura, y su correspondiente evaluación. Dicho registro debe realizarse dentro y fuera del cobertizo, y debe contemplar la medición de las temperaturas superficiales de la roca.

Para asegurar esta labor es indispensable contar con un profesional que pueda analizar los datos mensualmente, notificar en caso de notar algún cambio inesperado en las condiciones medioambientales, y que pueda dar cuenta de cualquier daño que se manifieste en el cobertizo.

3.3. Estudios de la roca

Es necesario complementar los estudios que se han desarrollado en la roca de la Fuente, con aquellos que incluyen el análisis de la humedad relativa cerca de la superficie pétreo, la humedad al interior de la roca, así como las isotermas de adsorción y los resultados de la dilatación bajo diferentes condiciones de humedad.

Es importante también profundizar en el tema de la porosidad y absorción de agua. Como se describió anteriormente no es del todo claro por qué en unas partes hay absorción de agua y en otras no, a lo cual se presentaron diferentes hipótesis y también algunas discusiones en la Mesa Internacional de Trabajo, las cuales mostraron la importancia de obtener claridad suficiente sobre este tema.

Los anteriores estudios estarán a cargo de la restauradora Helen Jacobsen.

3.4 Estudios de biodeterioro sobre la toba volcánica

De acuerdo con el estudio inicial (diagnóstico) que determinó los agentes biológicos comprometidos en el proceso de colonización y deterioro de la roca, y según las discusiones generadas en torno al tema en la Mesa de Trabajo, se deben desarrollar análisis *in situ* y en laboratorio para establecer el proceso o mecanismos de deterioro que es llevado por las diferentes poblaciones biológicas, específicamente para este caso particular de la toba volcánica. Lo anterior permitirá dar respuesta a los diversos interrogantes sobre el efecto directo o indirecto de los organismos sobre el material rocoso y plantear medidas de control, si es el caso por agentes biocidas ó mecanismos alternativos. Estos estudios serán llevados a cabo por la microbióloga Luz Stella Villalba.

3.5. Monitoreo de los deterioros

3.5.1 Monitoreo de los deterioros de la roca

En el año 2009 se llevó a cabo el registro de los deterioros de la roca de la Fuente, y en ese entonces se definieron las metodologías que se emplearían en su levantamiento. El monitoreo requiere de:

- Observación detallada de la zona a evaluar,
- Registro mediante fotografía y ubicación en el plano por medio de la herramienta Photoshop.
- Descripción de la zona y de los cambios que se observan con relación a los levantamientos anteriores.

Los deterioros que serán monitoreados corresponden a los desprendimientos, fisuras, decohesión, y cambios en la dureza de la roca. Los deterioros causados por el cobertizo anterior no requieren de monitoreo.

El monitoreo, como fue planteado por las restauradoras Álvarez y Jacobsen, se llevará a cabo sobre las tres zonas que presentan diversos estados de conservación según lo revisado en la evaluación de los deterioros:

1. Zona de dureza alta, estable.
2. Zona de dureza intermedia, con manifestaciones de intemperismo.
3. Zona “blanda”, de dureza muy baja y mayor alteración en la roca.

En cada una de estas zonas se ubicó un sector en el cual confluyen los deterioros, de esta manera el monitoreo arrojará a futuro información que pueda cruzarse, dando cuenta de la evolución del sector.



Figura 53: Registro fotográfico de las zonas a monitorear.

Las zonas seleccionadas para el monitoreo se definieron *in situ* en el marco de la Mesa internacional de Trabajo en marzo de 2012 (ver tabla 19), éstas se registraron fotográficamente con la cámara Réflex Nikon D3100, hacia futuro debe definirse la cámara con la cual se va a realizar el registro fotográfico durante el monitoreo y se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El registro debe hacerse siempre en las mismas condiciones de iluminación, por ejemplo al medio día, cielo parcialmente nublado.
- Se toman dos fotos a distancia de un metro para reconocer la zona donde se lleva a cabo el monitoreo. Las dos fotos tomadas corresponden a dos posiciones del lente. En la primera el lente está paralelo a la superficie pétrea y en la otra el lente está paralelo al cobertizo.
- Luego se toman fotos detalladas de deterioro a monitorear, a la mínima distancia posible del objetivo y graduando la inclinación, enfoque y estabilidad por medio de un trípode. Se anotan todos los detalles de la foto (distancia, detalles de la toma)
- Las tomas se hacen usando escala de colores, escala de grises y de escala de medición. Es favorable trabajar con fotos en color y fotos en blanco y negro.

- Las descripciones deben ser lo más detalladas posible de tal manera que permitan identificar cambios.

El monitoreo debe realizarse en el primer año cada seis meses y luego cada dos años. Se recomienda que se utilice la herramienta definida en la tabla 19.

A continuación se presentan las metodologías específicas a tener en cuenta para levantar cada uno de los deterioros a monitorear:

- **Desprendimientos:** se detectan por medio del “estudio de percusión” golpeando la totalidad de la superficie registrando diferentes tonalidades y relacionando las más graves con la presencia de oquedades y discontinuidades internas. Éste método sencillo es frecuentemente utilizado en conservación de pintura mural y piedra para detectar desprendimientos. (Schmid, 2004; Weber & Köhler,1997; Hammer, 1988)



Figura 54: Detección de desprendimientos por medio del estudio de percusión con la herramienta donada por el Prof.

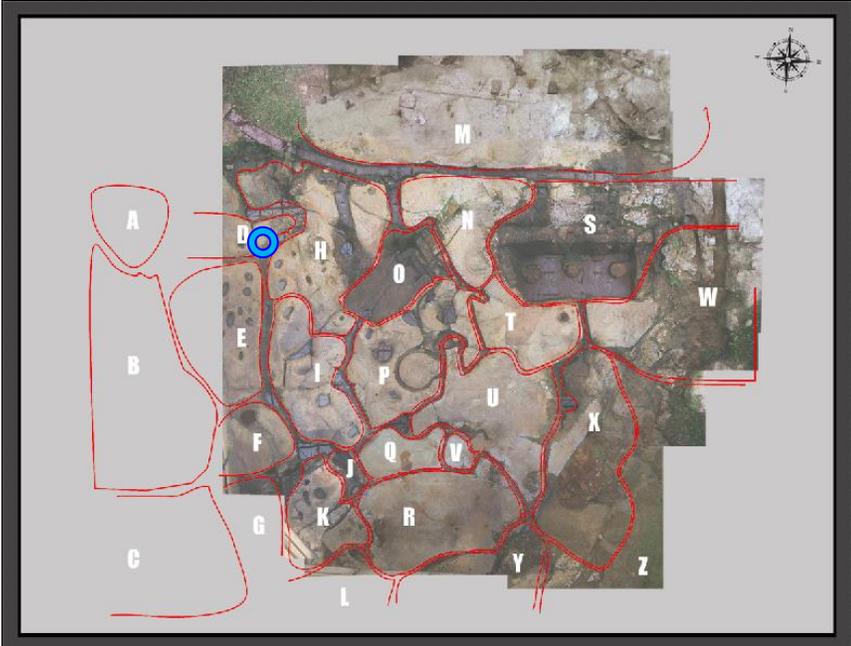
El “estudio de percusión” se puede hacer con una herramienta donada por el Dr. Wendler que consiste en una esfera metálica con la que se puede golpear la superficie de la misma manera en que se hacía con los nudillos de la mano, facilitando la realización del procedimiento.

Se diferenciaron los desprendimientos en tres

- tipos: -Desprendimientos con bordes muy visibles asociados a fisuras de mayor amplitud,
 -desprendimientos cuyos bordes están asociados a fisuras de menor amplitud y
 -desprendimientos que por falta de una apertura o fisura en los bordes no son visibles y son reconocibles solamente por su sonido hueco.

- **Las Fisuras** están relacionadas con el deterioro de la roca, son menores que las fracturas, no tienen una dirección definida, cruzan irregulares la superficie y en su mayoría son poco abiertas. Hay que mencionar que por el tamaño de la Fuente y la enorme cantidad de fisuras de tamaño mínimo que existen en la superficie rocosa, el levantamiento con el que actualmente se cuenta no incluye la totalidad de las fisuras, sin embargo es una buena aproximación.

- **Decohesión**, para realizar el levantamiento de este deterioro se hizo la prueba al tacto y aquellas zonas de la roca donde hay pulverulencia y partículas se desprenden son las zonas decohesas. Actualmente se cuenta con un buen levantamiento de este deterioro.
- **Dureza**. el registro de este deterioro siguió un procedimiento hecho de manera puntual sobre toda la superficie cuidando de no afectar la apariencia de la roca, teniendo en cuenta la escala relativa de dureza de Mohs. La evaluación fue realizada teniendo en cuenta la escala relativa de dureza de Mohs. Para realizar la evaluación se consideró la dureza de la uña en 2.5 y la punta del martillo en 5.5.

Tabla 19. Monitoreo de deterioros de la roca en cada una de las 3 zonas				
ZONAS A MONITOREAR	FISURAS	DECOHESIÓN	DESPRENDIMIENTOS	CAMBIOS EN LA DUREZA DE LA ROCA
1. Zona de alta dureza, estable	FOTOGRAFIA	FOTOGRAFIA	FOTOGRAFIA	FOTOGRAFIA
	DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN
	__/__/____	__/__/____	__/__/____	__/__/____
	FECHA REGISTRO	FECHA REGISTRO	FECHA REGISTRO	FECHA REGISTRO
Plano de la 1 zona a monitorear: SECTOR H				
				

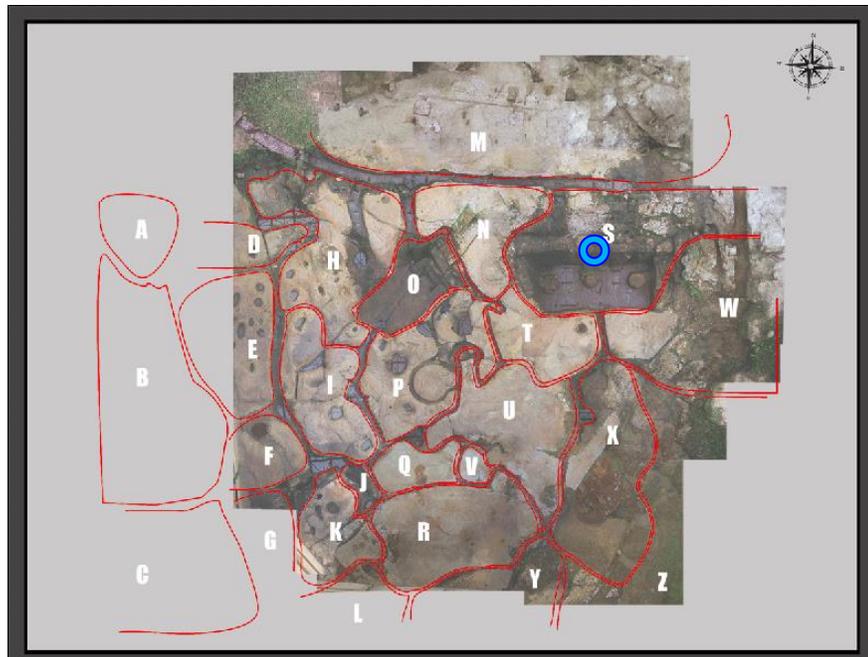
ZONAS A MONITOREAR	FISURAS	DECOHESIÓN	DESPRENDIMIENTOS	CAMBIOS EN LA DUREZA DE LA ROCA
2. Zona de dureza intermedia, con manifestaciones del intemperismo	FOTOGRAFIA	FOTOGRAFIA	FOTOGRAFIA	FOTOGRAFIA
	DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN
	__/__/____ FECHA REGISTRO	__/__/____ FECHA REGISTRO	__/__/____ FECHA REGISTRO	__/__/____ FECHA REGISTRO

Plano de la 2 zona a monitorear: SECTOR P



ZONAS A MONITOREAR	FISURAS	DECOHESIÓN	DESPRENDIMIENTOS	CAMBIOS EN LA DUREZA DE LA ROCA
3. Zona “blanda”, de dureza muy baja y mayor alteración de la roca.	FOTOGRAFIA	FOTOGRAFIA	FOTOGRAFIA	FOTOGRAFIA
	DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN
	__/__/____ FECHA REGISTRO	__/__/____ FECHA REGISTRO	__/__/____ FECHA REGISTRO	__/__/____ FECHA REGISTRO

Plano de la 3 zona a monitorear: SECTOR S-W



3.5.2 Monitoreo del biodeterioro

Considerando los grupos de organismos identificados, se llevará a cabo un monitoreo y evaluación in situ de la tasa de crecimiento y colonización, para líquenes, embriofitos basales, antocerotales y hepáticas, por un periodo de 1 a 2 años. Inicialmente cada dos meses, y al año se analizará si la periodicidad de monitoreo es necesario modificarla.

Se realizarán registros fotográficos de las comunidades, se evaluará la biomasa y el área colonizada.

Paralelamente se expondrán probetas del material en diferentes puntos de la Fuente para su posterior evaluación en términos de crecimiento de agentes y sus productos.

Finalmente se evaluará el efecto de los biocidas sobre el material .

Tabla 20. Monitoreo del biodeterioro

FLORA LÍQUENICA	Registro fotográfico	Características Macroscópicas	UBICACIÓN	PRODUCTOS DE CONTROL (1985-2008)	FECHA Y ÉPOCA DEL AÑO OBSERVACIONES A CONSIDERAR EN EL SEGUIMIENTO	PERIODICIDAD DEL SEGUIMIENTO Y TRATAMIENTO
Líquen rosado-sp1		Líquen endolítico mancha crustácea de borde irregular, pigmentación rosada, pulverulenta, al removerla se observa coloración verdosa	En todos los sectores, principalmente al borde de los canales del Sector M	Hipoclorito de sodio 5%, sulfito de sodio 5% y Dinamin 0.5% (Todo en 1985)	Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
Líquen Verde-sp2		Líquen endolítico, borde irregular, pigmentación verde	En todos los sectores, menos en el C, G y O.	Hipoclorito de sodio 5%, sulfito de sodio 5% y Dinamin 0.5% (Todo en 1985)	Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
Líquen blanco-sp3		Líquen endolítico, color biege en el centro, borde irregular blanquecino	En todos los sectores, menos en el J		. Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
Líquen naranja-Ocre- sp4		Líquen endolítico, color naranja, borde.	En todos los sectores, menos en el C, J, K, Y, Z		Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
Líquen vinotinto- sp5		Líquen endolítico, pigmentación vinotinto, borde rosado irregular y pulverulento.	En todos los sectores, menos en el A, C, G, J, O		Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
Líquen Fucsia-sp6-		Líquen endolítico, pigmentación fucsia, borde rosado	Solo Sector C		Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual

FLORA MUSICOLA	Registro fotográfico	Características Macroscópicas	UBICACIÓN	PROUCTOS DE CONTROL (1985-2008)	FECHA Y ÉPOCA DEL AÑO OBSERVACIONES A CONSIDERAR EN EL SEGUIMIENTO	PERIODICIDAD DEL SEGUIMIENTO Y TRATAMIENTO
<i>Brachythecium stereopoma</i>					Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
<i>Hyophila involuta</i>					Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
<i>Bryum capillare</i>				En 1985, Dinamin 0.5%	Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
<i>Bryum densifolium</i>				En 1985, Dinamin 0.5%	Fecha del seguimiento. Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
<i>Pseudosymblepharis schimperiana</i>					Fecha del seguimiento. Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
<i>Sematophyllum galipense</i>				Identificado el genero en 1988	Fecha del seguimiento. Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
<i>Didymodon rigidulus</i>					Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual

HEPATICAS	Registro fotográfico	Características Macroscópicas	UBICACIÓN	PRODUCTOS DE CONTROL (1985-2008)	FECHA Y ÉPOCA DEL AÑO OBSERVACIONES A CONSIDERAR EN EL SEGUIMIENTO	PERIODICIDAD DEL SEGUIMIENTO Y TRATAMIENTO
<i>Marchantia chenopoda</i>			En los sectores O, S, T, X D, J y F		Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
<i>Marchantia polymorpha</i>			En todos los sectores menos en el A, F, G, H y O		Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
<i>Megaceros sp</i>			En los sectores O, S, T, X D, J y F		Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
<i>Frullania sphaerocephala</i>			En los sectores O, S, T, X D, J y F	En 1985 Hipoclorito al 5%	Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual

SELAGINELLAS	Registro fotográfico	Características Macroscópicas	UBICACIÓN	PRODUCTOS DE CONTROL (1985-2008)	FECHA Y ÉPOCA DEL AÑO OBSERVACIONES A CONSIDERAR EN EL SEGUIMIENTO	PERIODICIDAD DEL SEGUIMIENTO Y TRATAMIENTO
sp1			En los sectores D, M, E, F, G y Z		Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
sp2					Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
sp3					Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
sp4					Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
sp5					Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual
sp6					Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente.	Mensual

SELAGINELLAS	Registro fotográfico	Características Macroscópicas		PROUCTOS DE CONTROL (1985-2008)	FECHA Y ÉPOCA DEL AÑO OBSERVACIONES A CONSIDERAR EN EL SEGUIMIENTO	PERIODICIDAD DEL SEGUIMIENTO Y TRATAMIENTO
PLANTULAS	Registro fotografico	Caracteristicas Macroscopicas		PROUCTOS DE CONTROL (1985-2008)	FECHA Y ÉPOCA DEL AÑO OBSERVACIONES A CONSIDERAR EN EL SEGUIMIENTO	PERIODICIDAD DEL SEGUIMIENTO Y TRATAMIENTO
Hyptis atrorubens (Flia Lamiaceae)						Mensual
Eleocharis cf (Flia Cyperaceae)						Mensual
Oplismenus burmannii (Flia Poaceae)						Mensual
Paspalum cf notatum (Flia Poaceae)						Mensual
Psendoelephantopus sp (Flia Asteraceae)						Mensual
Youngia cf. Japonica (Flia Asteraceae)						Mensual

COMPONENTE ALGAL	Registro fotográfico	Características Macroscópicas	UBICACIÓN	PRODUCTOS DE CONTROL (1985-2008)	FECHA Y ÉPOCA DEL AÑO OBSERVACIONES A CONSIDERAR EN EL SEGUIMIENTO	PERIODICIDAD DEL SEGUIMIENTO Y TRATAMIENTO
Comunidad de algas de las divisiones taxonómicas: <i>Chlorophyta</i> , <i>Cyanophyta</i> , <i>Bacilliarophyta</i> y <i>Euglenophyta</i>		Mucilaginoso verde	En todos los canales de la Fuente		Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente	Mensual
Comunidad de algas de las divisiones taxonómicas: <i>Chlorophyta</i> , <i>Cyanophyta</i> , <i>Bacilliarophyta</i> y <i>Euglenophyta</i>		Mucilaginoso marrón	En todos los canales de la Fuente		Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente	Mensual
Comunidad de algas de las divisiones taxonómicas: <i>Chlorophyta</i> , <i>Cyanophyta</i> , <i>Bacilliarophyta</i> y <i>Euglenophyta</i>		Negra - verde adherida	Principalmente en las zonas S y O		Cambio de color, aparición en una zona particular de la fuente	Mensual

3.6 Limpieza y saneamiento

Uno de los tratamientos propuestos por investigaciones anteriores y que buscan atenuar el impacto de los factores deteriorantes, es el que propone el saneamiento y limpieza para realizar el control del biodeterioro aplicando un material biocida y posteriormente eliminando la materia orgánica y los residuos.

Hasta 2011 la microbióloga Luz Stella Villalba había estudiado la posibilidad de controlar la colonización de los distintos organismos identificados en el apartado de biodeterioro y en la investigación para la selección de un producto biocida con sus respectivos análisis, pruebas y conclusiones (Capítulos 2.5 y 2.9).

Sin embargo, como se planteó con los últimos estudios y en la Mesa Internacional para la Conservación de la Fuente en marzo de 2012, es necesario establecer los mecanismos de deterioro de los diferentes agentes biológicos encontrados para determinar el real impacto del biodeterioro, el producto biocida y sus efectos posteriores sobre la Fuente. Es por esto que en este momento es recomendable adelantar el monitoreo de probetas tratadas en la Fuente para estudiar *in situ* el efecto del biocida, así como analizar el comportamiento de las zonas decohesas con los procesos de limpieza y saneamiento.

3.7 Consolidación de zonas decohesas

El deterioro de la decohesión, que tiene un impacto importante en el estado de conservación del sitio, puede ser tratado mediante un proceso de consolidación cuyo material fue determinado en la investigación desarrollada en 2012 por Helen Jacobsen.

No obstante el tratamiento de consolidación tampoco es recomendable en este momento en el que se debe desarrollar primero el estudio y monitoreo de probetas tratadas *in situ* para tener mayor claridad acerca del efecto del consolidante sobre la estructura rocosa, su interacción con el producto biocida y el biodeterioro.

3.8 Investigación y Consolidación de los desprendimientos

Considerando que los desprendimientos son el deterioro más grave que puede presentarse en la Fuente, resulta indispensable desarrollar un proceso de conservación donde se realice la aplicación de un mortero de inyección que permita estabilizar y readherir las fases de la roca que están desprendidas. Lo anterior requiere una investigación que conste de las siguientes fases:

1. Revisión bibliográfica de otros casos donde se haya utilizado morteros de inyección en toba volcánica.
2. Escogencia de los materiales a ser utilizados para la preparación del mortero.

3. Investigación sobre las características del mortero: adhesión, absorción de humedad, permeabilidad al vapor de agua, resistencia a la flexión tensión, elasticidad, expansión hídrica y térmica.
4. Análisis de resultados.
5. Evaluación de las pruebas *in situ*
6. Monitoreo de pruebas *in situ*
7. Aplicación en la totalidad de las zonas con desprendimientos

3.9 Levantamiento tridimensional

Desde el año 2007 cuando se planteó el programa de conservación de la Fuente de Lavapatas, se vio la necesidad de realizar un levantamiento tridimensional que permitiera no sólo obtener un registro fiel de los volúmenes y las formas esculpidas, sino también contar con una herramienta con la cual hacer el seguimiento de los deterioros de la roca, particularmente aquellos como los desprendimientos y pérdidas asociadas a estos y las fisuras. En el año 2008 el ICANH hizo un primer intento para que el levantamiento tridimensional fuera realizado, sin embargo no se tuvo ningún resultado, este punto debe solucionarse todavía. Se recomienda que el levantamiento tridimensional sea realizado por un equipo experto en el tema y que cuente con equipos como un escaner tridimensional que permita llevar a cabo este levantamiento de manera óptima.

3.10 Evaluación y mejora del sistema de protección

En el 2009 el estudio de las condiciones medioambientales permitió determinar las características que debía reunir el cobertizo para atenuar el impacto de la radiación lumínica, la humedad relativa, y la temperatura, sobre la roca de la Fuente. El sistema de protección con el que actualmente se cuenta, como menciona dicho estudio, resulta adecuado en la medida en que atenúa el impacto de las condiciones medioambientales, pero inapropiado en la medida en que presenta goteras y daños estructurales que no permiten hoy en día la circulación de turistas por el área ubicada sobre las figuras de mayor importancia. Deben entonces revisarse las condiciones del cobertizo para contemplar la posibilidad de cambiarlo y mejorarlo

Por el momento se puede decir que el cobertizo minimizó el impacto directo de los rayos solares, tal y como se evidenció en las tomas de temperatura superficial de la roca que no está protegida por el cobertizo.

Para conseguir minimizar el efecto de cambios drásticos es fundamental utilizar materiales amortiguantes en la construcción del cobertizo tales como la guadua, paja, o

esterilla. Los materiales deben estar apropiadamente inmunizados y secos para maximizar sus cualidades y evitar la proliferación de plagas.

Estos materiales deben combinarse con una membrana impermeable que además tenga protección de luz ultravioleta. En el mercado hay variedad de estos productos que reducen hasta el 80% la entrada de este tipo de luz. Se trata de las membranas textiles utilizadas en arquitectura. Tienen la ventaja de disminuir el impacto de la luz UV sin disminuir el grado de iluminación al interior de la estructura.

Se espera que la combinación de los materiales propuestos (membrana más material amortiguante) minimice el impacto del medio ambiente sobre la Fuente de Lavapatas. Se reconoce que se está hablando de un lugar inmerso en unas condiciones climáticas bastante fuertes y difíciles de manejar. Por el momento se sabe que una de las ventajas del cobertizo actual fue su altura. Esta altura ha permitido la ventilación de tal manera que las fuertes condiciones que se registran cerca al domo, disminuyen notablemente al llegar cerca a la superficie de la roca, seguramente por la corriente de aire que atraviesa el lugar de manera constante. Por tanto, es preciso que el nuevo diseño considere conservar esta altura.

El nuevo sistema de protección debe cubrir el área completa de la Fuente pues en la actualidad hay zonas que se encuentran a la intemperie. Es importante que dentro del proceso de contratación del nuevo sistema se contemple dentro de la etapa de diseño un período de evaluación que permita determinar su efectividad para establecer si realmente cumple la función de amortiguante.

CONCLUSIONES

Este informe es una mirada integral de los estudios desarrollados en la Fuente entre 2008 y comienzos de 2012, y da cuenta de un enfoque integral, en el que las disciplinas de la conservación, la microbiología, la geología, y el diseño gráfico, aportan y se ponen al servicio de un bien patrimonial.

Conocer su historia y antecedentes es muy importante porque permitió al grupo de investigadoras que han trabajado recientemente, llenar los vacíos que existían y plantear relaciones entre el estado de conservación actual y las intervenciones realizadas de una u otra manera sobre la Fuente con anterioridad.

Los estudios realizados en los últimos 4 años alcanzaron la profundidad que planteaban como necesaria los diagnósticos realizados en los años 80s y 90s. En su mayoría constituyen trabajos pioneros en Colombia que proponen metodologías rigurosas y que cumplen con los estándares internacionales. Estos estudios se refieren a la identificación del biodeterioro, la determinación del tratamiento biocida, el estudio de las características físicas y geológicas de la Fuente, y la determinación del material consolidante para la decohesión.

Es importante que se desarrollen la totalidad de las etapas pendientes por ejecutar, con el fin de cumplir con los objetivos planteados por los diferentes estudios, asegurando así un buen proceso de conservación en un sitio tan importante como la Fuente de Lavapatás.

El seguimiento de las condiciones medioambientales resulta indispensable no sólo para precisar las condiciones que debe cumplir el sistema de protección, sino también para registrar posibles cambios en el sitio y detectar el impacto del cambio climático.

El monitoreo de los deterioros, a su vez, es necesario para determinar la velocidad en que estos se están desarrollando en la roca, lo que permitiría tener argumentos más sólidos para evaluar su impacto. Si bien los estudios realizados hasta la fecha establecen las metodologías con las cuales se puede hacer el registro de los diferentes deterioros, es de vital importancia que se lleve a cabo el levantamiento tridimensional que permitirá hacer el monitoreo riguroso de los deterioros.

Como fue expuesto, los diagnósticos realizados entre los años 80s y 90s mencionaban una serie de factores y mecanismos que intervenían en la conservación de la Fuente, los estudios desarrollados recientemente, en particular aquellos relacionados con las características físicas y geológicas y el biodeterioro de la roca, permiten aclarar y precisar el tema. De hecho, conocer la complejidad de la naturaleza geológica de la roca de este lugar, así como haber identificado sus minerales constitutivos, sus características

físicas y el estado de meteorización en el que se encuentran ciertas zonas, ha permitido entender en detalle los mecanismos de deterioro presentes, y relacionar los factores propios del intemperismo, la meteorización y el biodeterioro, con la naturaleza del material y con su estado de deterioro actual.

Adicionalmente, es importante entender que estos procesos se vienen dando en su mayoría desde hace muchos miles de años, y que por tanto varios de los deterioros evidentes hoy se han manifestado desde hace mucho tiempo.

Lo que resulta más preocupante es que hoy haya pérdida de material rocoso, pues esto implica la pérdida de las formas escultóricas. Esto hace que los procesos de conservación propuestos hacia futuro, planteen soluciones como la consolidación.

Considerando lo anterior, es importante que en el mantenimiento diario se tomen unas medidas preventivas que posibiliten el cuidado especial de las zonas con mayores problemas de conservación, como lo son las zonas decohesas y las que presentan desprendimientos. Los trabajadores del parque deben conocer las zonas de mayor vulnerabilidad de la roca, para no circular sobre éstas.

Si bien el biodeterioro está causando un impacto a nivel estético en la apreciación de las formas, (la diversidad de colores propios de los microorganismos genera una sensación visual que interfiere con la correcta lectura de las formas escultóricas), el control del biodeterioro mediante un agente biocida debe realizarse sólo en las zonas donde el estado de conservación de la piedra lo permita, es decir, aquellas zonas donde la dureza de la roca es alta y no hay presencia de desprendimientos, decohesión o alteración de la roca.

El estudio de las condiciones medioambientales permitió entender el comportamiento del sitio a lo largo del año, y comprender el impacto de estas condiciones sobre la meteorización de la roca, así como la necesidad inminente del sistema de protección. De acuerdo con la Mesa de Trabajo estos estudios deben continuarse y complementarse con estudios de humedad relativa en superficie y al interior de la roca.

Resulta de vital importancia que la información producida hasta la fecha, sea puesta al servicio de la etapa de observación y monitoreo que está por venir en los próximos dos años en la Fuente, como recomendó la Mesa Internacional de Trabajo, resulta de gran importancia realizar el monitoreo de los deterioros así como de la interacción entre la piedra de la Fuente y los tratamientos propuestos: aplicación del biocida y consolidación.

El personal del parque, encargado del mantenimiento diario del sitio, debe contar con los levantamientos de los diferentes deterioros y conocerlos en detalle, de manera que pueda alertar a los profesionales especializados en caso de notar un cambio o alteración particular, evitando a toda costa la circulación sobre las zonas donde la roca presenta

deterioros como decohesión y desprendimientos, así como la zona de dureza blanda de mayor alteración de la roca.

A lo largo de los últimos años se evidenció la necesidad de completar los estudios relacionados con la conservación de la Fuente con estudios de arqueología y relativos a la recuperación de la Quebrada Lavapatas. Al hacer el estudio *in situ* en 2009 se observó que en el sector M, parte de las formas escultóricas aun se encontraban cubiertas por una capa de suelo. Lo anterior permite pensar que esta zona puede ser estudiada desde la arqueología lo cual precisaría los límites de la zona esculpida en este sector, y definiría la presencia de nuevos relieves. En cuanto a la recuperación de la quebrada, esto permitiría integrar a la Fuente de Lavapatas con la dinámica regional, haciendo posible que un Bien de Interés Cultural como este, movilice un proceso de conservación ambiental y el trabajo pertinente realizado las comunidades vecinas a la cuenca de la quebrada.

GLOSARIO

ALOFANA: Es un nombre dado a minerales que ocurren naturalmente. Estos son hidroaluminosilicatos no cristalinos con una amplia variación en la composición química. Se forman en ambientes que permiten la coprecipitación de sílice e hidroxialuminios. Producto amorfo y coloide de la alteración de materiales como el vidrio y la ceniza volcánica, compuesto básicamente por sílice y aluminio

ANFÍBOL: Mineral perteneciente al grupo de los inosilicatos, color verde a marrón rojizo. Presenta una compleja estructura química porque contiene abundantes elementos. Por esta razón se clasifica en variedades, de tal manera que existen más de 40 de estas, entre las cuales se encuentran: hornblenda, tremolita, actinolita, afdversonita, tschermakita, glaucofana.

ARCILLAS: él término se refiere a un tamaño de grano menor a 0.0039 mm, y a un grupo de filosilicatos hidratados, que tienen una estructura cristalina particular y generalmente son el resultado de procesos de meteorización y de alteración hidrotermal.

ARGILIZACIÓN: La argilización es el resultado de la meteorización más importante, se caracteriza por un patrón de alteración pervasivo, es decir que penetra los más profundo de la matriz de las rocas. Los cristales que están embebidos en la matriz se ven afectados por esta alteración pervasiva, ya que pierden soporte y poco a poco la caolinita va penetrando dentro de los feldespatos como anortoclasa y plagioclasa, debilitándolos y permitiendo la formación de otras arcillas sobre estos. La argilización en los feldespatos, se manifiesta primero a manera de escamas y parches, luego se va extendiendo hasta formar zonas de argilización y finalmente el cristal ha sido totalmente reemplazado por arcillas, bien sea caolinita o illita-smectita.

BAHÍAS DE CORROSIÓN: También se conocen como engolfamientos. Son huecos que se forman generalmente en cristales félsicos, por la entrada de vidrio volcánico en su interior. Esto se da tanto por el crecimiento rápido de los cristales como por el impedimento en su crecimiento. Esta textura es común en rocas volcánicas de composición intermedia a ácida, y es frecuente en los cristales de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico.

BIOCIDAS: Agentes bactericidas, fungicidas, alguicidas y herbicidas, son frecuentemente usados para eliminar e inhibir el crecimiento biológico. La eficacia del producto está en función de su actividad contra los organismos diana o blanco, para lo cual hay que considerar la dosis del producto necesaria para

ejercer su acción (cantidad de biocida/ unidad de volumen de aire o superficie) y el espectro de acción (amplitud de actividad contra los organismos a controlar).

BIODETERIORO: Cambio no deseado a las propiedades, físicas y químicas de un material por la acción vital de los diferentes organismos.

BIOFILMS: Una comunidad de organismos, caracterizada por células que están adheridas irreversiblemente a un substrato o interfase, o unas con otras, encerradas en una matriz de sustancias poliméricas extracelulares que ellas han producido. La matriz es muy hidratada debido a que incorpora grandes cantidades de agua dentro de su estructura, llegando este elemento a representar hasta el 97% de ésta. En menor cantidad se encuentran otras macromoléculas como proteínas, ácidos nucleicos, y diversos productos que proceden de la lisis de los organismos. En la matriz también puede hallarse materiales no bacterianos, tales como cristales de sales Minerales y partículas de corrosión.

BIOLIXIVIACIÓN: Conjunto de reacciones químicas llevadas a cabo por microorganismos que tienen como resultado la disolución de minerales de la piedra para obtener la energía que necesitan a expensas de sustancias inorgánicas. Generalmente el proceso es llevado a cabo por bacterias que tienen la capacidad de oxidar minerales sulfurados (Ej: *Thiobacillus* sp) permitiendo la liberación de metales contenidos en ellos, el producto final de la biolixiviación es una solución ácida (ácido sulfúrico) que contiene el metal en su forma soluble.

BIOTITA: Mineral perteneciente al grupo de los filosilicatos, color verde a marrón rojizo. En su estructura cristalina contiene gran variedad de elementos (K, Fe, Al, Mg, F) pero su base principal es óxido de silicio SiO₂. Se caracteriza por su hábito hojoso.

FRAGMENTOS LÍTICOS: Componentes de las rocas piroclásticas y sedimentarias. Se trata de fragmentos de roca que son arrancados de rocas preexistentes y quedan incluidos en otras rocas por la acción de diferentes procesos como erupciones volcánicas y sedimentación.

CAOLINITA: Mineral del grupo de las arcillas, rico en aluminio, que se forma por la meteorización o alteración hidrotermal de rocas ricas en aluminio.

CALDERA: Estructura volcánica formada por la pérdida de volumen de magma de una cámara magmática y el hundimiento del cráter volcánico. Tiene una geometría circular a semicircular y diámetros mayores a 30m.

CÁMARA MAGMÁTICA: Reservorio de magma que alimenta un conducto volcánico. Está situada a varios kilómetros de profundidad de la superficie.

CONCENTRACIÓN MÍNIMA INHIBITORIA (CMI): Se define como la mínima concentración de un producto biocida que en un periodo de tiempo determinado es capaz de inhibir el crecimiento microbiano. Dicha concentración se determina a nivel de laboratorio por métodos basados en la difusión en agar como difusión de discos y tiras de E-test.

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE AGUA éste describe como cociente la absorción de agua [kg] por unidad de superficie en función del tiempo.

COLOR: El color de las rocas, evidentemente, está en función de sus componentes minerales principales o secundarios. Esta propiedad, determinada bajo criterios científicos y escalas objetivas, facilita la caracterización macroscópica de las piedras y permite la comparación y diferenciación de posibles variedades pétreas.

El color de una roca puede cambiar con el tiempo según el grado de exposición del material a la intemperie. Por consiguiente, podría considerarse como indicador del grado de alteración producido. (Gómez, 2001: 108)

CUARZO: Mineral petrogenético o formador de roca que se caracteriza por su ubicuidad. Exhibe variedad de colores, entre ellos está blanco (cuarzo lechoso), rosado (cuarzo rosado), morado (amatista) y amarillo (cuarzo citrino). Está compuesto básicamente por dióxido de silicio, SiO_2 , está presente tanto en rocas ígneas como en metamórficas.

EXPANSIÓN HÍDRICA: característica de un material de cambiar su extensión cuando está húmedo.

EXPANSIÓN TÉRMICA: Es la dilatación que sufren los materiales como consecuencia del aumento de temperatura y se expresa como la variación relativa de la longitud de la probeta por grado, para una temperatura dada. (Gómez, 2001: 110)

DECOHESIÓN: El fenómeno de la decohesión sucede cuando se deteriora la matriz vítrea provocando la pérdida de soporte de los cristales y por lo tanto la superficie de la roca resulta friable y pulverulenta.

DESPRENDIMIENTOS: corresponden a porciones de roca que están parcialmente separados y que se separan con oquedades o discontinuidades.

DUREZA: De manera muy general puede definirse como el comportamiento frágil o plástico de una roca frente al impacto. En específico puede definirse también la **dureza superficial de la roca** como una propiedad mecánica también conocida como resistencia superficial a la deformación y es un término muy amplio que podría implicar la resistencia al rayado, a la abrasión, a la absorción de energía bajo cargas de impacto (dureza por rebote), a la indentación o penetración bajo cargas estáticas o dinámicas (dureza por impacto) y resistencia a la depresión en la superficie del material pétreo (dureza por perforación), (Gómez, 2001: 109-111)

FELDESPATO POTÁSICO: Mineral petrogenético o formador de roca que se encuentra dentro del grupo de los feldespatos. Es típico en rocas ígneas de composición intermedia a ácida y contiene sílice, aluminio y potasio, eventualmente puede contener sodio. Este nombre comprende a los siguientes minerales: ortoclasa, sanidina, anortoclasa y adularia.

FISURAS: separación del material rocoso de menor dimensión a la de la fractura

FRACTURAS: Las fracturas son producto de la deformación frágil de la roca en su génesis y ocurren cuando esta llega a su límite de plasticidad y la roca se rompe. Se definen mediante planos con una orientación determinada.

FRAGMENTOS VÍTREOS: Se conocen también como trizas vítreas y shards. Estos son fragmentos de vidrio que se encuentran en la matriz de una roca piroclástica.

HEMATITA: Es un óxido de hierro color rojo brillante que aparece con frecuencia como producto de alteración de los minerales que contiene hierro.

HALLOISITA: Se conoce también como caolinita hidratada, presenta una estructura cristalina tan desordenada que incorpora agua dentro de esta. Se forma a partir de la caolinita, heredando su estructura en gran parte, aunque también puede provenir de la alófana.

IGNIMBRITRA: Roca o depósito formado por un flujo piroclástico pumítico, independientemente de si está soldado o no. Los fragmentos pueden ser de tamaño muy variados, con pómez y otras rocas flotando en una matriz de ceniza.

METEORIZACIÓN E INTEMPERISMO: El deterioro de la roca está dado por dos procesos: la meteorización, proceso químico generado por la interacción de la roca con el ambiente y el intemperismo, proceso de degradación física.

Los principales elementos del clima que hacen posible la meteorización son la lluvia, que controla la cantidad de agua disponible para que ocurra este proceso químico, y la temperatura, que influencia la tasa de reacciones químicas (particularmente la tasa de descomposición de materia orgánica) y afecta la disponibilidad del agua por incremento de la evaporación o por enfriamiento.

Los productos de meteorización en una roca se conocen como minerales residuales primarios de rocas parentales. La mayoría de minerales de rocas ígneas y metamórficas son inestables, debido a su solubilidad en al menos cantidades traza. Entonces los minerales disueltos lentamente se hacen más abundantes en materiales meteorizados, y son mezclados con los minerales nuevos formados por meteorización en zonas caracterizadas por tener presión y temperatura mucho más bajas que en las que se formaron y porque al agua, el dióxido de carbono y oxígeno son más abundantes.

Los productos de meteorización de la roca de la Fuente son compuestos como zeolitas, silicatos de arcillas y óxidos tamaño arcilla como goetita y limonita. De acuerdo a la secuencia de capas encontradas en la estructura cristalina se obtiene una arcilla u otra, dentro de las cuales se distinguen: caolinita, esmectita, halloisita, clorita, illita y vermiculita.

En cuanto al intemperismo, este “ocurre cuando alteraciones físicas tales como desprendimientos, decohesión, fracturas y fisuras ocurren en la roca. Estas alteraciones tienen que ver con la pérdida de las propiedades físico mecánicas de la roca y son fácilmente observables en la Fuente de Lavapatas” (Álvarez & Jacobsen, 2009).

MATRIZ DE LA ROCA: En general las rocas ígneas, sedimentarias, metamórficas y algunas tectonitas, presentan una distribución de tamaño de grano de forma que un máximo corresponde a tamaños finos y otro a los tamaños más gruesos. La población fina es a lo que se denomina Matriz. En las rocas volcánicas la matriz es la parte afanítica o **vítrea** en la que están incluidos los fenocristales (población gruesa). (Castro, 1988: 24)

METABOLITOS SECUNDARIOS: Compuestos orgánicos sintetizados por organismos vivos que se caracterizan por NO ser esenciales para el crecimiento o para el metabolismo central a diferencia de lo que sucede con los metabolitos primarios, pero contribuyen a la adaptación y supervivencia del organismo bajo ciertas condiciones ambientales. Se sintetizan en la fase en la que el

microorganismo no crece, pero sigue metabólicamente activo (idiofase para hongos).

OXIDACIÓN: La oxidación es otro de los productos de meteorización, influenciado en gran manera por la presencia de agua. La oxidación tiene varios patrones de alteración, el primero es pervasivo, como ocurre en la zona de dureza más alta. En esta parte se ha desarrollado una costra de hierro a causa de la oxidación pervasiva, que ha invadido la matriz de la roca, las microfracturas y los espacios vacíos entre cristales y matriz conformando una especie de cemento y soportando la roca. **El segundo patrón de alteración es de tipo radial**, este consiste en que se inicia la oxidación en un mineral ferromagnésico como biotita y/o anfíbol y se extiende por el cristal, luego penetran la matriz, las microfracturas y otros espacios vacíos, de tal manera que la oxidación se reparte hacia todos los sectores de la roca e incluso penetra a profundidad. Se debe tener en cuenta que la oxidación es una alteración que depende totalmente de la presencia de minerales que contengan hierro.

PLAGIOCLASA: Mineral formador de roca, que se encuentra dentro del grupo de los feldespatos, de color blanco a gris claro. Conformar rocas. Contiene Aluminio, sílice y una mezcla de sodio y calcio. En sus estados más puros contiene solo calcio y solo sodio, estos se conocen como Anortita y albita respectivamente.

PÓMEZ: Tipo de roca que se caracteriza por su vesicularidad y un abundante contenido de vidrio volcánico, generalmente en textura. Es producto de erupciones volcánicas con alto contenido de volátiles y magmas intermedios a ácidos, que permiten la formación de las vesículas en la pómez y contienen abundante sílice.

PIROCLASTOS: Son cristales individuales, fragmentos de cristales, fragmentos de roca y vidrio generados por rotura y disgregación producida como resultado directo de la actividad volcánica. Típicamente son clastos angulosos ya que no han sido retrabajados por medio de transporte alguno. Los piroclastos se clasifican granulométricamente en:

Bomba: Piroclasto de diámetro medio mayor de 64mm.

Bloque: Piroclasto de igual tamaño que las bombas pero de forma más irregular y angulosa.

Lápili: Piroclastos, de cualquier forma, de diámetro medio comprendido entre 2 y 64mm.

Ceniza: Piroclasto de diámetro medio entre 2 y 1/16mm.

Ceniza fina o polvo: Piroclasto de diámetro medio menor de 1/16mm.

(Castro, 1988: 50)

POROSIDAD: La porosidad es el volumen de los espacios vacíos de la roca y define la posibilidad de ésta de almacenar más o menos cantidad de fluido. Se expresa por el porcentaje de volumen de poros interconectados respecto al volumen total de la roca. La porosidad puede ser de tipo primario, cuando está asociada a la naturaleza y génesis de la roca, o de tipo secundario, cuando algunos de los minerales sufren procesos de hidrólisis o alteraciones y su tamaño varía dejando poros. El concepto de porosidad efectiva está directamente relacionado con el de permeabilidad.

RESISTENCIA TENSIÓN Y FLEXIÓN, MÓDULO ESTÁTICO DE LA ELASTICIDAD: La resistencia tensión flexión se define cómo la tensión flexión máxima que se produce sobre una loncha con una fuerza anular. Esta propiedad se conoce en inglés con el nombre de bending strenght. El módulo estático de la elasticidad describe el comportamiento elástico de la piedra.

ROCA ÍGNEA: Es un tipo de roca generada por el enfriamiento de cámaras magmáticas. Este enfriamiento puede ser lento o rápido dependiendo de esto la roca tendrá diferentes texturas. Entre estas rocas se encuentran el granito, la andesita y dacita.

ROCA METAMÓRFICA: Es un tipo de roca que sufre un proceso de transformación químico y físico debido a cambios en las condiciones de presión y temperatura a las que fue sometida para su formación. Como ejemplo de estas rocas se tiene el mármol, la cuarcita y la pizarra.

ROCA PIROCLÁSTICA: Tipo de roca que se ha formado por un flujo piroclástico, a partir de la erupción de un volcán. Dentro de este tipo de roca se encuentran los flujos de pómez (ignimbritas), depósitos de caída (tobas), lavas y oleadas piroclásticas entre otros.

SUCESIONES ECOLÓGICAS: Evolución que se produce de manera natural en un ecosistema en el que diferentes grupos de organismos se relacionan. A manera general, en una sucesión ecológica pueden diferenciarse especies colonizadoras primarias o pioneras que intervienen en la primera etapa y especies que aparecen en las etapas de maduración del ecosistema. Estas relaciones ecológicas permiten en muchos casos, amortiguar cambios de temperatura, pH, humedad y deficiencias de nutrientes en el medio.

TEXTURA: Conjunto de las relaciones intergranulares de tamaño forma de los cristales o clastos que forman una roca determinada. Las denominaciones texturales y los criterios utilizados varían según el tipo de roca considerada. (Castro, 1988: 20)

VELOCIDAD DE ULTRASONIDO Con el análisis de la velocidad ultrasónica se determina el tiempo que necesita el sonido para recorrer una distancia definida. El resultado da información sobre la estructura de la piedra.

VIDRIO VOLCÁNICO: Material amorfo encontrado en rocas volcánicas y piroclásticas, producto del enfriamiento rápido de magmas. Está compuesto en un cien por ciento por sílice.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez E. María Paula, Bateman V. Catalina, Quintero D. Cristina & Ramírez N. Patricia. (2007). Componente de Conservación Parque Arqueológico de San Agustín. Bogotá: ICANH.
- Álvarez E. María Paula. (1999). Estudio de materiales, técnica de elaboración y estado de conservación de las esculturas policromadas del purutal, San Agustín, Huila. Bogotá: Tesis para optar por el título de Restaurador de Bienes Muebles, Universidad Externado de Colombia. Facultad de Restauración de Bienes Muebles.
- Álvarez, E. María Paula & Jacobsen, Helen. (2009). Determinación del estado de conservación de la Fuente de Lavapatas a partir de la evaluación de las características físicas y geológicas de la Fuente. Bogotá: ICANH.
- Álvarez, E. María Paula, Bateman V. Catalina & Ramírez N. Patricia. (2008). Programa de conservación de la Fuente de Lavapatas, Parque Arqueológico de San Agustín, Fuente Ceremonial del Lavapatas 1936-2008, Etapas II y III. Bogotá: ICANH.
- Andersen, R. (2005). Algal culturing techniques. Elsevier Academic Press.
- Bateman, Catalina. (2008). Monitoreo del deterioro de la Fuente de Lavapatas. Bogotá: ICANH.
- Bateman, Catalina. (2009). Análisis de las condiciones climáticas de la Fuente de Lavapatas. Parque Arqueológico de San Agustín. Bogotá: ICANH.
- Bautista Q., Enrique. (1994). La conservación de la Fuente de Lavapatas, San Agustín, Huila. Observatorio de Arte Rupestre Indígena. Bogotá.
- Bicudo, C. y Menezes, M. (2006). Géneros de Algas de Águas Continentais do Brasil. Segunda Edição. Brasil: RiMa editora.
- Bliefert & al. (1997): Bliefert, Domhardt, Venzmer: Analysen zur Auswahl geeigneter Hydrophobierungsmittel für salzbelastete Sandsteine. Bautenschutz + Bausanierung. Tomo 1, 1997, p. 12-21.
- Caneva, G., Nugari, M. & Salvadori. O. (1994). La biología en la restauración. Andalucía: NEREA.. IAPH.
- Castro D., Antonio. (1988) Petrografía básica: Texturas, clasificación y nomenclatura de rocas. Madrid: Ed. Paraninfo.
- 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.

- Duque Gómez, Luis & Cubillos, Julio César. (1988). *Arqueología de San Agustín: Alto de Lavapatas*. Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales. Bogotá: Banco de la República.
- Enciso R., Braida Elena. (1988). *Conservación de monumentos arqueológicos: Parque arqueológico San Agustín: pruebas con biocidas sobre piedras afectadas por hongos, líquenes y musgo*. Bogotá: ICANH
- Fitzner B., Heinrichs, K. & Kownatzki. R. (1995). *Weathering forms – classification and mapping*. En: *Denkmalpflege und Naturwissenschaft – Natursteinkonservierung I*. Berlin.
- Gómez M., Francisca. (2001). *Del conocimiento a la conservación de los Bienes Culturales: de los materiales que conforman un bien cultural, alteración y análisis*. Quito: Ministerio de Relaciones Exteriores del Ecuador.
- Grimm, Schwarz (1984) Wolf Dieter Grimm, Ulrich Schwarz: *Naturwerksteine und ihre Verwitterung an Münchner Bauten und Denkmälern*. In: *Natursteinkonservierung – Internationales Kolloquium, München, 21./22. Mai 1984*. Arbeitsheft 31. München 1985. p. 28-118.
- Hammer, Ivo. (1988): *Perkussionsanalyse, Sondierungen und Lösemittel-Versuche zur Befundssicherung an Wandoberflächen- und malereien*. Quelle: *Restauratorenblätter*
- Hernández de Alba, Gregorio & Hernández de Alba. Gonzalo. (1979). *La cultura arqueológica de San Agustín*. Bogotá: Carlos Valencia Editores.
- ICOMOS (2008): *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*. Paris 2008.
- Instituto Colombiano de Antropología. (1994). *Nominación a la lista de patrimonio mundial del Parque Arqueológico de San Agustín*. ICANH.
- Jacobsen (2006): *Marmorkonservierung. Vergleich ausgewählter Festigungsmittel zur Konservierung von Großkuzendorfer Marmor*. Unveröffentlichte Diplomarbeit an der Fachhochschule Potsdam. Potsdam 2006.
- Karsten. R. (1983). *Bauchemie für Studium und Praxis*. 7th edition. Lúdicke Verlagsgesellschaft, Haslach.
- Klopfer (1985): *Feuchte*. In: *Lehrbuch der Bauphysik*. Ed. Lutz & al. Stuttgart 1985, p. 265- 434.
- Kozub (2008): *To the determination of the young's modulus from the biaxial flexural strength*. In: *11th congress on deterioration and conservation, Torun, Poland*. Ed.: J.W. Lukaszewicz, P. Niemcewicz, Torun, 2008, p.407-414.
- 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.
- Martinez, M.M. (2002). *Participación de agentes microbianos en biodeterioro*. Laboratorio de Microbiología ambiental. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

- Matteini, Moles (1990): Mauro Matteini, Arcangelo Moles: Naturwissenschaftliche Untersuchungsmethoden in der Restaurierung. München 1990.
- Menzl B. (2002): Der Rochlitzer Porphyrtuff – Möglichkeiten der Festigung. Unpublished diploma thesis at the university of applied sciences Potsdam. Potsdam 2002.
- Menzl, Schmeikal (2002): Die lineare thermische Dehnung. Unveröffentlichte Semesterarbeit an der Fachhochschule Potsdam. Potsdam 2002.
- Morales Demarco M., Jahns E., Rüdrieh J., Oyhantcabal P. & Siegesmund, S.: The impact of partial water saturation on rock strength: an experimental study on sandstone. In: Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. Band 158, 2007. heft 4, S.869-882. Stuttgart 2007.
- Padilla, Luz Angela de. (1983) .La fuente ceremonial de Lavapatas: San Agustín estado de conservación, propuestas de tratamiento. Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología.
- Paul Getty Trust e Instituto Hondureño de Antropología e Historia (2006). La escalinata jeroglífica de Copán. Tegucigalpa.
- Pérez de Barradas, José. (1943). Arqueología agustiniana. Bogotá: Biblioteca de cultura colombiana, Imprenta Nacional.
- Pérez, Eliseo y Castillo, Enrique. (1996). Resumen cronológico de trabaos realizados en el Parque Arqueológico de San Agustín Huila. Bogotá: COLCULTURA.
- Perez & al (1995): J.L.Perez, M.A.Bello, R.Villegas, J.F.Vale, M.Alcalde: comparison between several spanish treated stones submitted to salt crystallization and freeze/thaw accelerated weathering tests. In: Preprints of the International Colloquium in Rome, 19-21 June 1995: Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments. Rome, 1995, S.443-449.
- Price, C.A, Reardon. E.M & Gillard, R.R.L. (1978). Collection of dinoflagellates and other marine microalgae by centrifugation in density gradients of a modified silica sol. American Society of Limnology and Oceanography, Inc.
- Rüdrieh J.M. (2003). Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. Dissertation an der Georg. Göttingen: UNiversität Göttingen.
- Sasse, H.R. & Snethlage, R. (1996) .Methods for the evaluation of stone conservation treatments. En: Report of the Dahlem Workshop on Saving Our Architectural Heritage: The Conservation of Historic Stone Structures Held. Berlin: N.S. Baer
- Sattler, L. (1992). Sandsteinfestigungen mit Kieselsäureester. Dissertation an der LMU München. In: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor.
- Schmid, Andrea. (2004). Detektion und Charakterisierung von Hohlstellen an Wandmalerei und Putzen, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, , Nr. 1. Forschungsbericht 9. München

- Siedel H., D.J. Honsinger, M.Breitbach (1995): Laborversuche zur Substanzverfestigung und Horizontalabdichtung. In: Die Tulpenkanzel im Dom zu Freiberg. Ed.: A.Kiesewetter, H.Siedel, M.Stuhr. Dresden 1995, pp. 119-128.
- Simon. St. (2001). Zur Verwitterung und Konservierung kristallinen Marmors. Dissertation an der Ludwig Maximilians Universität München. München
- Snethlage (1984): Steinkonservierung. Forschungsprogramm des Zentrallabors für Denkmalpflege 1979-1983. München 1984.
- Snethlage, Rolf. (1997). Leitfaden Steinkonservierung. Fraunhofer: Ed. Stuttgart
- Snethlage, Wendler. (1995) .Methoden der Steinkonservierung. Anforderungen und Bewertungskriterien. In: Denkmalpflege und Naturwissenschaft – Natursteinkonservierung I. Berlin
- Sotomayor C., María Lucía & Uribe A., María Victoria. (1987). Estatuaria del macizo colombiano. Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología.
- Stanley- Price Nicholas y Jokilehto Jukka. 2001. The decisión to shelter archaeological sites. Three case-studies from Sicily. En: Conservation and Management of Archaeological Sites. Nicholas Stanley-Price London: James and James (Science Publishers) Ltd.
- Steindlberger, Auras (1999): Hessische Tuffsteine und ihr Verwitterungsverhalten am Bauwerk. In. Werkstoffeigenschaften und Bauinstandsetzen V. Band 2. Aedification publishers, Freiburg 1999, pp. 1481 – 1494.
- Stück H. , L.Z.Forgó, J.Rüdrich, S.Siegesmund, Á Török (2008): The behaviour of consolidated volcanic tuffs: weathing mechanisms under simulated laboratory conditions. In: Environmental geology. No.56. 2008, pp. 699-713.
- Useche de Padilla, Luz Ángela. (1983). La fuente ceremonial de Lavapatas San Agustín, Estado de Conservación, Propuesta de Tratamiento. Bogotá.
- Valencia, M. & Aguirre J. (2002). Líquenes Morfología Anatómica Sistemática. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Videla, H., Guiamet, S. & Gómez S. (2003). Biodeterioro de materiales estructurales de sitios arqueológicos de la civilización Maya. La Plata: Revista del museo de la plata.
- Videla, H.A & Herrera. (2002). Memorias Prevención y Protección del Patrimonio cultural Iberoamericano de los efectos del biodeterioro ambiental. CYTED.
- Videla, H.A & Herrera. (2002). Memorias Prevención y Protección del Patrimonio cultural Iberoamericano de los efectos del biodeterioro ambiental. CYTED.
- Villalba, L.S. (2008). Identificación de algas, flora liquénica y muscícola de la Fuente de Lavapatas- parque Arqueológico de San Agustín. Contrato 134-2008. Bogotá: ICANH

- Villalba, L.S. (2009). Evaluación y selección de biocidas para controlar el biodeterioro de la FUENTE DE LAVAPATAS-parque Arqueológico de San Agustín. Contrato 27-2009. Bogotá: ICANH
- Warsheid, Th & Braams J. (2000). Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 46: 343-368.
- Weber, J. & Köhler, W. (1997). Zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden an Steindenkmälern, in: 20 Jahre Steinkonservierung 1976-1996, Restauratorenblätter 17. Wien.
- Wendler, Eberhard & Snethlage, Rolf (1989). Der Wassereindringprüfer nach Karsten – Anwendung und Interpretation der Messwerte. En: Bautenschutz und Bausanierung. ICCROM.
- Whitford, L. & Schumacher, G. (1968). A Manual of the Freshwater Algae in North Carolina. USA: The North Carolina Agricultural Experiment Station.

LISTADO DE FIGURAS

1. Luis Alfonso Sánchez. Comisión Arqueológica liderada por José Pérez de Barradas el 10 de Julio de 1937.
2. Plano con la numeración otorgada a las figuras de la Fuente de Lavapatas a través del tiempo.
3. Duque, 1963. Archivo ICANH 95ii 0191 (192). Existen pocas fotografías que muestren cómo era el cobertizo. En ésta, se alcanzan a ver las bases de cemento y las columnas en madera que sostenían el cobertizo; estas columnas dejaron las marcas sobre la Fuente.
4. 1984 hasta hoy. Cobertizo de estructura metálica con domos de acrílico.
5. Puente en guadua construido entre enero y febrero de 2012 por los trabajadores del Parque Arqueológico de San Agustín.
6. Punto de la quebrada del Lavapatas donde el caudal de agua se divide y permite el acceso al sistema de circulación de agua que baña la Fuente.
7. Pozo que recibe el agua de la Fuente y sistema de bombeo del agua.
8. Sectorización base del sistema de registro utilizado en las investigaciones 2008-2011
9. Localización de las muestras para los estudios mineralógicos de la roca
10. Detalle de la muestra A tomada del lecho de la quebrada de Lavapatas, cerca del área con tallas
11. foto microscópica de la sección delgada 1, sector S, zona blanda
12. foto microscópica de la sección delgada 5, sector I, zona de dureza alta
13. foto microscópica de la sección delgada 0, sector R, zona de dureza intermedia
14. foto microscópica de la sección delgada 6, sector R, zona de dureza intermedia
15. Fracturas
16. Dureza inferior a 2.5 en la escala de Mohs. Dureza media comprendida entre 2.5 y 5.5 . Dureza superior a 5.5 en la escala de Mohs
17. Absorción de agua por capilaridad in situ
18. Prueba 7, sector M, una zona en buen estado de conservación durante la medición de la absorción
19. la prueba 7, sector M, después de la medición de la absorción. La mancha de agua que no es mucho más grande que el diámetro del tubo de Karsten muestra que no casi no existe un transporte de agua
20. Zona del lecho de la quebrada donde se tomó la muestra A en 2011
21. Hueco tallado para la construcción de la cubierta en los años 40. En el primer plano se observan residuos de cemento.
22. Deterioros causados por el cobertizo anterior
23. Fisura pequeña que se observa en la superficie rocosa.
24. Varias fisuras presentes en la superficie rocosa.
25. Fisuras
26. Desprendimiento con borde de poca anchura
27. Desprendimiento parcialmente abierto en los bordes

28. Desprendimiento con bordes abiertos
29. Desprendimientos
30. Foto histórica de una zona con desprendimiento. Izquierda foto de 1937, Derecha se ve la pérdida de formas por los desprendimientos que dejan bordes muy marcados
31. Zonas limitadas con decohesión, alrededor la piedra se encuentra estable
32. Las zonas decohesas presentan usualmente una coloración más clara pues en estas zonas la capa de biodeterioro se ha perdido y los minerales están a la vista.
33. Decohesión
34. Fotografías de la Decohesión asociada a fisuras de mayor tamaño
35. Localización de las muestras tomadas para los análisis microbiológicos.
36. Liquen blanco, Liquen naranja, Liquen rosado, Liquen verde, Liquen vinotinto
37. Hepáticas y selaginellas
38. Musgo.
39. Plántulas
40. Algas negras que se adhieren, Algas mucilaginosas
41. Muestra 1. Parte vegetativa de liquen
42. Muestra 2. Rizinas del liquen adheridas e incrustadas al soporte, ocasionando deterioro mecánico en la roca. Así mismo crecen en las cavidades y producen microfisuras
43. Muestra 5. Diatomeas en Sector S. Pátina que se adhiere a la roca.
44. Muestra 10. Pátina negra sector M. Se observa claramente el biofilms constituido de microalgas de la división Bacillariophyta y Cyanophyta, incrustadas en la matriz mineral.
45. Localización detallada de los puntos de medición de la temperatura superficial de la roca.
46. Mediciones de temperatura superficial de la roca en la misma zona durante un lapso de tiempo prolongado. Se tomó datos en un area con condiciones secas y húmedas
47. Aplicación del producto biocida
48. Efectividad de los productos evaluados
49. Vista general de la zona de donde fue tomada de la muestra A para el estudio consolidante. Foto der. : Detalle de la zona de donde fue tomada de la muestra A para el estudio consolidante.
50. La muestra B que se encontraba suelta en el lecho de la Fuente
51. Núcleos que se extrajeron de la muestra Algunos de estos núcleos se seccionaron debido a las discontinuidades características de la roca.
52. La impregnación de núcleos. Los núcleos están puestos sobre palitos. La impregnación sucede en un flujo continuo. En la foto se documenta la impregnación con el producto que debería disminuir la dilatación hídrica.
53. Registro fotográfico de los puntos a monitorear.
54. Detección de desprendimientos por medio del estudio de percusión con la herramienta donada por el Prof. Wendler

LISTADO DE TABLAS

1. Resultados del estudio de difracción de rayos X de muestras de la zona blanda y de la zona de alta dureza
2. Metodología para la evaluación de las características físicas de la roca
3. Descripción de las zonas estudiadas y los resultados obtenidos
4. Principales propiedades relacionadas con la porosidad de varias probetas de la muestra A
5. Principales propiedades relacionadas con características de transporte de humedad de varias probetas de la muestra A.
6. Otras características físico-mecánicas de un bloque (A) de piedra de Lavapatás
7. Metodología para el registro de la temperatura y humedad relativa del medio ambiente
8. Meses con datos comparativos: bajo el domo y bajo el puente
9. Método 1. Variaciones de temperatura superficial de la temperatura superficial de la roca a la misma hora en diferentes puntos
10. Método 2 de Medición de la temperatura superficial de la roca
11. Detalle de los deterioros a evaluar en cada una de las 3 zonas
12. HERRAMIENTA PARA EL MONITOREO DE LOS DETERIOROS
13. Códigos de referencia para análisis cuantitativo de composición elemental
14. Concentración de minerales antes y después del tratamiento biocida
15. Ensayos *in situ* de los productos seleccionados
16. Resumen de las series de consolidantes
17. Los estudios reglamentarios para la evaluación de las propiedades de la roca (Snethlage 1997; Snethlage, Wendler 1995)
18. Condiciones para la evaluación de la consolidación (Snethlage 1997, p. 81.)
19. Monitoreo de deterioros de la roca en cada una de las 3 zonas
20. Monitoreo del biodeterioro