UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

ÁREA CIENCIAS DE LA TIERRA

LA FORMACIÓN CANTERA; SU UTILIZACIÓN, DURABILIDAD Y DETERIORO COMO ROCA NATURAL DE CONSTRUCCIÓN. EJEMPLOS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ.

TRABAJO RECEPCIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA:

PAULA SOFÍA GONZÁLEZ SÁMANO

ASESOR:

Dr. Rubén López Doncel

ALUMNO BECADO POR:

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

CLAVE: 18202

SAN LUIS POTOSÍ 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ

18 de octubre de 2012

A LA PASANTE PAULA SOFÍA GONZÁLEZ SÁMANO

En atención a su solicitud de autorización de Temario, presentada por el **Dr. Rubén Alfonso López Doncel,** Asesor del **Trabajo Recepcional** que desarrollará usted, con el objeto de sustentar su Examen Profesional en la Licenciatura de **Ingeniero Geólogo.** Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 18 de octubre del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"LA FORMACIÓN CANTERA, SU UTILIZACIÓN, DURABILIDAD Y DETERIORO COMO ROCA NATURAL DE CONSTRUCCIÓN. EJEMPLOS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ"

INTRODUCCIÓN.
I. GENERALIDADES.
II. PROPIEDADES PETROGRÁFICAS
III. PROPIEDADES PETROFÍSICAS.
IV. DESGASTE Y DETERIORO EN LA ROCA.
V. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE DETERIORO EN LA ROCA DE CONSTRUCCIÓN.
VI. INVENTARIO Y USO DE LA FORMACIÓN CANTERA EN EDIFICIOS HISTÓRICOS DEL CENTRO DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ.
RESULTADOS Y CONCLUSIÓN.
BIBLIOGRAFÍA.

Ruego a Usted tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, debe presentar Constancia de Servicio Social como requisito indispensable para sustentar su Examen Profesional.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR

UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE SAN LUIS POTOSI
FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION

*bcb.

FACULTAD
DE INGENIERÍA
Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

AGRADECIMIENTOS

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo para la elaboración del presente trabajo por medio del proyecto de investigación: CB-2009/130282 a cargo del Doctor Rubén López Doncel, dirigido al becario No. 18202.

Agradezco a mi asesor el Dr. Rubén López Doncel investigador del Instituto de Geología de la U.A.S.L.P. por su asesoramiento, información y por todo el conocimiento que me compartió durante el desarrollo del presente trabajo.

De igual forma le agradezco a mi familia, especialmente a mi papá, José González Galicia, por su apoyo incondicional durante toda mi carrera profesional y durante la elaboración de mi trabajo recepcional.

Un agradecimiento especial a Saúl Morales Reynoso por la paciencia, motivación y todo el apoyo que me brindo durante el proceso de elaboración y culminación del presente trabajo.

Les doy gracias también a todos aquellos profesores que durante mi carrera profesional me brindaron no solo su tiempo, trabajo y asistencia, sino también sus conocimientos, enseñanzas y paciencia para hacer de sus materias una experiencia de enriquecimiento en mi aprendizaje. Pues todo su esfuerzo hoy me motiva para seguir expandiendo mi conocimiento y en un futuro saber transmitirlo y aplicarlo de una manera útil para la sociedad.

CONTENIDO

RESUMEN i

INTRODUCCIÓN 1

Objetivo General 1

Metodología 1
a) Gabinete inicial 2
b) Campo 3
c) Laboratorio 4
d) Gabinete final 6

Localización 8
a) Localización 8
b) Vías de acceso 8

Meteorología 9

Tipos de Deterioro 16
a) Agrietamiento 16
b) Separación 16
c) Pérdida de material 18
d) Decoloración y depósito 18
e) Colonización Biológica 20

I. GENERALIDADES 21

I.I Marco Geológico 21

I.II Marco Teórico 24
Propiedades Petrográficas 24
1) Densidad 24
2) Porosidad 26
3) Transporte de agua y propiedades de retención 30
a) Absorción de agua Capilar 33
b) Adsorción de humedad 36
4) Características de secado 38
5) Propiedades Hígricas/Hídricas 39
6) Propiedades de Fuerza 41
a) Fuerza Compresiva 43
b) Fuerza de tensión 46
c) Dureza y Resistencia a la Abrasión 47
7) Velocidades de onda ultrasónicas 49
a) Velocidad de ultrasonido y litología 53
b) Velocidad de ultrasonido - Efecto de la porosidad y los fluidos 54
c) Velocidad ultrasónica y anisotropía 55

d) Velocidad y Grado de deterioro 55

I.III Marco Histórico 56
1) Catedral Metropolitana de San Luis Potosí 56
2) Templo de Nuestra Señora del Carmen 59
3) Caja del Agua 61

II. PROPIEDADES PETROGRÁFICAS 62

II.I Descripción megascópica de la Ignimbrita Cantera 62

II.II Descripción Microscópica de la Ignimbrita Cantera 64

III. PROPIEDADES PETROFÍSICAS 69

III.I Densidad 69

III.II Porosidad 69

III.III Adsorción de humedad 71

III.IV Propiedades Hígricas/Hídricas 72

III.V Propiedades de Fuerza 73
III.V.I Fuerza Compresiva 73
III.V.II Fuerza de tensión 73
III.V.III Dureza y Resistencia a la Abrasión 74

III.VI Velocidades de onda ultrasónicas y deterioro 75

IV. DESGASTE Y DETERIORO EN LA ROCA 76

IV.I Deterioro por procesos mecánicos 76

IV.II Ciclos térmicos 77

IV.III Hinchamiento Hígrico e Hídrico 79

IV.IV Deterioro por procesos químicos 80
IV.IV.I Reacciones de Disolución mineral 81

IV.V Biodeterioro 83

V. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE DETERIORO EN LA ROCA DE CONSTRUCCIÓN 85

V.I Agrietamiento 86

V.II Separación 88

V.III Pérdida de Material 89

V.IV Decoloración y depósito 91

V.V Colonización Biológica 92

VI. INVENTARIO Y USO DE LA FORMACIÓN CANTERA EN EDIFICIOS HISTÓRICOS DEL CENTRO DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ 93

VI.I Deterioro Catedral Metropolitana 93

VI.II Deterioro Templo de Nuestra Señora del Carmen 100

VI.III Deterioro Caja del Agua 104

RESULTADOS Y CONCLUSIÓN 108

BIBLIOGRAFÍA 112

CONTENIDO 119

LISTA DE FIGURAS 122

LISTA DE TABLAS 124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Canteras existentes en la presa El Potosino dentro del ejido Escalerillas, S.L.P. 4
Figura 2. Pulidora utilizada para desbastar las muestras de roca. 5
Figura 3. Microscopio de barrido electrónico (SEM). 6
Figura 4. Clasificación del deterioro. 7
Figura 5. Localización del sitio de obtención de muestras en el estado de San Luis Potosí 9
Figura 6. Gráfico representando las temperatura máxima de 1971-2000. 11
Figura 7. Gráfico representando las temperaturas máximas de 2011 y 2012. 11
Figura 8. Gráfico representando las temperatura media de 1971-2000 12
Figura 9. Grafico de la temperatura media en 2011 y 2012 13
Figura 10. Gráfico representando las temperatura mínima de 1971-2000. 13
Figura 11. Gráfico de temperatura mínima en San Luis Potosí en 2011 y 2012 14
Figura 12. Gráfico representando las normales de precipitación (mm) del grupo de 1971-2000..... 15
Figura 13. Gráfico representando las normales de precipitación (mm) del año 2011 15
Figura 1.1 Mapa de la extensión litológica de la Ignimbrita Cantera al surponiente de la ciudad. 24
Figura 1.2 Porosímetro de mercurio para pruebas de porosidad. 30
Figura 1.3 Prueba para determinar la expansión hídrica de las muestras de roca. 32
Figura 1.4 a) Cámara climática que modifica la humedad dentro de la misma cámara. 37
Figura 1.5 Maquina servo-hidráulica para prueba de fuerza de compresión. 45
Figura 1.6 Máquina para prueba brasileña de fuerza de tensión directa. 47
Figura 1.7 Prueba de Abrasión de Bôhme 49
Figura 1.8 Método de transmisión de pulsos 51
Figura 1.9 Diagrama esquemático ilustrando la técnica de medición ultrasónica *in situ* 52
Figura 1.10 Catedral Metropolitana, imagen satelital. 56
Figura 1.11 Catedral Metropolitana de la ciudad de San Luis Potosí. 58
Figura 1.12 Templo de Nuestra Señora del Carmen, San Luis Potosí, México. 60
Figura 1.13 Caja del Agua, San Luis Potosí. 61
Figura 2.1 Ignimbrita Cantera en muestra de mano. 63
Figura 2.2 Diagrama QAPF de Streckeisen (1974). 64
Figura 2.3 Fotomicrografía- Ignimbrita Cantera. 65
Figura 2.4 Gráfico del difractograma mostrando la mineralogía primaria de la Ignimbrita Cantera. 66
Figura 2.5 Ignimbrita Cantera en el microscopio de barrido electrónico (SEM) 67
Figura 3.1 Gráfico de la distribución del radio de poro 70
Figura 3.2 Diagrama del comportamiento de la Ignimbrita Cantera al aumentar la humedad relativa de 20% a 95%. 71
Figura 3.3 Diagrama de la expansión bajo saturación (hídrica) de agua de la Ignimbrita Cantera en sus tres direcciones x (largo) en azul, y (ancho) en rojo y z (alto) en verde 72
Figura 4.1 Poste perteneciente a la Caja del Agua con deterioro mecánico presente 76
Figura 4.2 Deterioro de separación presente en el Templo de Nuestra Señora del Carmen..... 78
Figura 4.3 Disolución presente en estructuras de la Catedral Metropolitana 80
Figura 4.4 Caja del Agua, S.L.P. 83
Figura 4.5 Biodeterioro visible en edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí. 84
Figura 5.1 Agrietamiento en edificios históricos compuestos por la Ignimbrita Cantera. 87
Figura 5.2 Deterioro de separación presente en edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí conformados por la Ignimbrita Cantera. 88
Figura 5.3 Deterioro de pérdida de material presente en los edificios históricos de San Luis Potosí conformados por la Ignimbrita Cantera. 90

Figura 5.4 Principales tipos de decoloración presente en edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí construidos por la Ignimbrita Cantera. 91
Figura 5.5 Tipos de colonización biológica presentes en los edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí conformados por la Ignimbrita Cantera. 92
Figura 6.1 Tipos de deterioro presentes en la Catedral Metropolitana de San Luis Potosí. 94
Figura 6.2 Clasificación por colores de los tipos de deterioro presentes en la Catedral Metropolitana .95
Figura 6.3 Deterioro presente en la fachada de la Catedral Metropolitana 97
Figura 6.4 Deterioro en la parte superior de la Catedral Metropolitana. 99
Figura 6.5 Deterioro presente en el Templo de Nuestra Señora del Carmen 100
Figura 6.6 Deterioro en la parte baja de la fachada del Templo de Nuestra Señora del Carmen. 101
Figura 6.7 Deterioro de la zona norte del Templo de Nuestra Señora del Carmen. 102
Figura 6.8 Ejemplos de decoloración en las partes bajas de la fachada del Templo de Nuestra Señora del Carmen. 103
Figura 6.9 Base de la Caja del Agua afectada por el deterioro. 104
Figura 6.10 Deterioro presente en la Caja del Agua. 105
Figura 6.11 Tipos de deterioro en la Caja del Agua. 106

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de Popp (1994) 26
Tabla 1.2 Expansión Hídrica de algunas tobas dimensionales con densidad y porosidad, datos tomados de *Steindlberger (2003)*. 40
Tabla 1.3 Escala diagnostica de dureza (Modificada de Friedrich Mohs, 1812). 48
Tabla 1.4 Clasificación Vp-estructural de deterioro para rocas volcánicas de acuerdo a su velocidad experimental de Arikan *et al.* (2007). 56
Tabla 3.1 Densidades obtenidas de la roca dimensional perteneciente a la Ignimbrita Cantera. 69
Tabla 3.2 Valor de la porosidad (%)y el radio de poro promedio (µm). 69
Tabla 3.3 Medidas de la distribución del radio del poro de la Ignimbrita Cantera en porcentajes. 70
Tabla 3.4 Fuerza compresiva uniaxial en condiciones secas 73
Tabla 3.5 Fuerza de tensión en condiciones de secado y de saturación de agua 74
Tabla 3.6 Superficie del eje y su velocidad obtenidas del método de transmisión de pulsos 75
Tabla 3.7 Clasificación Vp-estructural de deterioro para rocas volcánicas de acuerdo a su velocidad experimental de Arikan *et al.* (2007). 75
Tabla 5.1 Grupos básicos de formas de deterioro (modificado de Fitzner *et al.*, (1995)). 85

RESUMEN

Hoy en día las variaciones en el clima, la acción antropogénica y la preocupación del hombre por conservar el patrimonio cultural de sus ciudades lo han llevado a tener una especial necesidad por la preservación de sus monumentos. Para conseguir esto es indispensable tener conocimiento de la roca de una forma más especializada, saber interpretar su origen, conocer su composición y propiedades físicas, y que de esta forma se pueda distinguir y hasta predecir su reacción ante fenómenos del deterioro y desgaste. La industria extractiva de materiales pétreos y materiales para construcción es una práctica muy antigua en nuestro país, va desde épocas prehispánicas y durante la colonia cuando la explotación de las canteras fue una actividad de gran importancia en los procesos de construcción y hasta la fecha esta actividad ha sido el sostén de economías familiares durante generaciones.

Estos elementos pétreos utilizados como materiales para construir intervienen en cualquier obra de ingeniería, lamentablemente no han tenido la difusión adecuada que permita conocer su importancia en el desarrollo de la industria de la construcción.

Las rocas han sido utilizadas debido a que cuentan con las propiedades adecuadas para poder resistir los fenómenos atmosféricos y agentes climáticos que existen. Actualmente es posible determinar aquellas propiedades que las hacen ser materiales estables y las propiedades específicas que intervienen en su deterioro. Los componentes minerales que conforman las rocas están directamente relacionados con su durabilidad a través del tiempo. Por lo tanto, para poder predecir el comportamiento de una roca como material de construcción es necesario conocer como reaccionan ante

los elementos del deterioro, y es conveniente conocer las evidencias que el deterioro deja para poder clasificarlo y determinar las causas que lo provocan.

La Ignimbrita Cantera ha sido utilizada como roca natural de construcción en la elaboración de muchos edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí. Esta roca de origen piroclástico ha demostrado contar con las características necesarias que le permiten prevalecer en pie.

El presente trabajo muestra por medio de pruebas experimentales realizadas en laboratorio las propiedades petrográficas y petrofísicas individuales con las que cuenta la Ignimbrita Cantera dando ejemplos representativos de edificaciones en las que esta presente. Se caracterizan e identifican los procesos y fenómenos del deterioro mas significativos que se desarrollaron y se desarrollan en esta roca natural de construcción.

INTRODUCCIÓN

La Ignimbrita Cantera es una formación conformada por ignimbritas, la cual es una roca formada por el depósito y consolidación de ceniza, flujos piroclásticos que incluyen materiales compactados, soldados, no soldados y esta compactada por procesos de recristalización. Son producidas por las nubes ardientes producto de una erupción piroclástica. Las ignimbritas al encontrarse soldadas pueden llegar a poseer propiedades muy adecuadas para la construcción que son el resultado de los procesos de soldadura.

La Ignimbrita Cantera definida por Labarthe-Hernández *et al.* (1982) ha sido utilizada para la ornamentación y construcción de monumentos y edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí. La durabilidad de esta roca a lo largo de los años permite ver cuáles son los agentes que intervienen en su deterioro, los factores externos e internos que influyen para que este deterioro se lleve a cabo y las propiedades petrofísicas y petrográficas que hacen a esta roca un material apto para la construcción.

Objetivo General

- Describir la utilización y presencia de la Ignimbrita Cantera en edificios históricos del centro de la ciudad de San Luis Potosí e identificar y caracterizar los factores y los procesos de alteración más significativos que se llevaron y se llevan a cabo en ella.

Metodología

El presente trabajo se lleva a cabo en edificios del centro histórico de la ciudad de San Luis Potosí que tienen a la Ignimbrita Cantera como roca base en su construcción. Se

realizó trabajo de campo y de laboratorio para determinar los siguientes parámetros físicos de la roca estudiada:

- Densidad de la roca
- Porosidad
- Transporte de agua y propiedades de retención
- Características de secado
- Propiedades hígricas e hídricas
- Propiedades de fuerza
- Velocidades de onda ultrasónicas
- Tipos de deterioro
- Petrografía

a) Gabinete inicial

Se seleccionaron tres edificios históricos representativos de la ciudad de San Luis Potosí constituidos con rocas de la Ignimbrita Cantera para ser mostrados como ejemplos directos de la utilización de esta roca para la construcción y observar cómo ha reaccionado ante el deterioro a lo largo del tiempo. Se obtuvo de la red y de folletos turísticos información acerca de la historia de los edificios históricos seleccionados. Los datos representativos del clima de la ciudad se consultaron en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Para la realización de los experimentos de laboratorio fue necesario contar con un ejemplar de la Ignimbrita Cantera, no es posible tomarlo de los edificios históricos ya que es ilegal, por lo que se obtuvieron las muestras en las canteras que aún están en

funcionamiento dentro del ejido de Escalerillas en estado de San Luis Potosí. Se investigó de donde provenía el material de construcción y se planeó una salida al lugar de extracción. Se hizo una recopilación de artículos y publicaciones sobre rocas de construcción, exposición al deterioro de las rocas en edificaciones, pruebas petrofísicas realizadas en materiales naturales de construcción, etc. con el propósito de que sirvieran como apoyo y respaldo de este trabajo.

b) Campo

Salidas de reconocimiento al centro histórico de San Luis Potosí para tomar fotografías, estudiar detenidamente los diferentes tipos de deterioro en cada edificio para determinar las causas del deterioro existente. Para las muestras de roca, se acudió a los tajos de extracción o *canteras* en donde la extracción de la roca la realizan los cortadores en forma de bloques, estos son hechos por barrenaciones y explosiones controladas colocadas estratégicamente para el desprendimiento, luego los pedazos obtenidos se trozan en bloques menores con cinceles y marros. Una vez formados estos bloques son enviados a cortadoras en donde los hacen lajas de diferentes tamaños, las pueden pulir o les pueden dar forma de *blocks*, ladrillos o adoquines para ser utilizadas en la construcción (México desconocido, 2012). Los usos de la roca van de acuerdo a sus características físicas, las blandas y no soldadas son adecuadas para la ornamentación y las duras y soldadas son adecuadas para la construcción. Las muestras de roca utilizadas para la elaboración de este trabajo se extrajeron en los afloramientos que se encuentran en las *canteras* de pie de cerro del ejido de Escalerillas, S.L.P. (Figura 1)

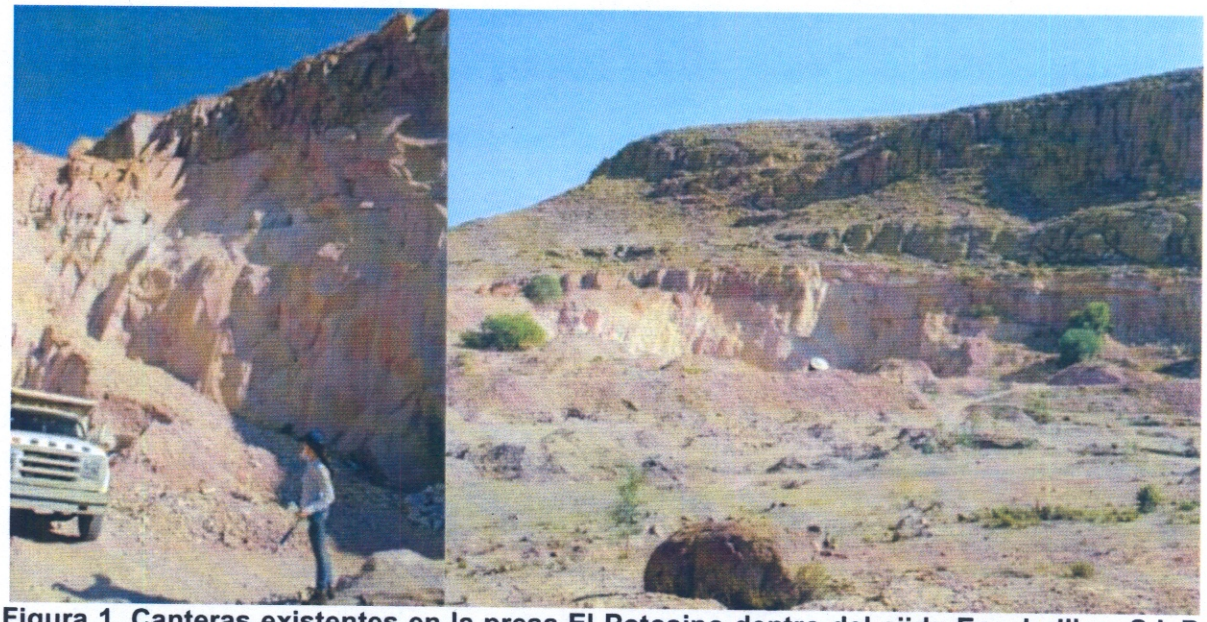


Figura 1. Canteras existentes en la presa El Potosino dentro del ejido Escalerillas, S.L.P. a) Muestra de los tajos de roca extraídos colocados en un vehículo para su transporte. b) Tajos de la ignimbrita a pie del cerro.

c) Laboratorio

La preparación de las láminas delgadas se realizo en el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, consistió en cortar las muestras de mano con una cortadora de disco de diamante de 8" (Buehler) que se pegan a un porta objetos utilizando resinas epóxicas y que posteriormente se desbastan en seco con una pulidora (Hillquist) (Figura 2) y con lijas (150, 320 y 600) hasta alcanzar un grosor de ±0.3 mm, finalmente son pulidas con abrasivos (600 y 800). Ya terminadas las láminas delgadas son utilizadas para realizar una descripción petrográfica con un microscopio de polarización (Nikon Optiphot2-pol).

Figura 2. Pulidora utilizada para desbastar las muestras de roca.

Las pruebas del microscopio de barrido electrónico (Figura 3) se realizaron en el Instituto Federal para Geociencias y Recursos Naturales (BGR) en Hannover, Alemania. Para estas pruebas se utilizan muestras de mano de la roca para distinguir sus componentes tanto en imágenes como en los resultados de computadora. Por medio de este microscopio se pueden estudiar las particularidades en escala de micras de la morfología de partículas pequeñas (en formas y tamaños reales) de minerales, y en particular,. la estructura de los agregados minerales finamente dispersos, criptocristalinos y amorfos (minerales arcillosos, hidróxidos de hierro, etc.).

Figura 3. Microscopio de barrido electrónico (SEM).

Las pruebas y métodos para determinar la difracción de rayos X y las propiedades petrofísicas de la roca fueron realizados en el departamento de Geología Estructural y Geodinámica, en el Centro de Geociencia de la Universidad de Göttingen, Alemania, conforme a lo descrito en el Marco Teórico del presente trabajo.

d) Gabinete final

Con los datos obtenidos se realiza el trabajo escrito en el cual se plasman los procedimientos y resultados obtenidos en la etapa de laboratorio.

Para la elaboración del mapa de localización del sitio de obtención de muestras se tomó como apoyo *google maps* (*Google*) y se utilizó *AutoCAD (Autodesk)* para digitalizarlo. Para digitalizar el mapa de la extensión litológica de la Ignimbrita Cantera en la parte

surponiente de la ciudad de San Luis Potosí se utilizó la Carta Geológica-Minera TEPETATE F14-A83 obtenida de la página del Servicio Geológico Mexicano (SGM) y fue digitalizada con el programa *AutoCAD*.

El registro histórico de la meteorología de la ciudad de San Luis Potosí fue obtenido de la página web del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2012), se acomodaron los datos en *Microsoft Excel (Microsoft Office)* para poder realizar gráficas que representaran los datos de interés. Los valores obtenidos de los experimentos para determinar las propiedades petrofísicas también fueron trabajados en *Microsoft Excel* para graficar los resultados y sacar conclusiones.

Como ayuda en la identificación cualitativa de los minerales presentes en las muestras de roca, además de utilizar los microscopios petrográfico y de barrido electrónico, se utilizó un difractómetro de rayos X y los datos obtenidos en los difractogramas se trabajaron con el programa *X'Pert HighScore Plus (PANalytical)*.

Para clasificar el deterioro existente en los edificios históricos, se digitalizaron fotografías en *AutoCAD* y se les asignó una clasificación por medio de colores e intensidad de colores para su fácil identificación (Figura 4).

Deterioro	Color
Agrietamiento	azul
Separación	amarillo
Perdida de material	rojo
Decoloración, depositación	morado
Colonización	verde
*Resanado o remodelación	gris

Grado de Deterioro	
100%	
75%	
50%	
25%	
5%	

Figura 4. Clasificación del deterioro. a) Tipo de deterioro de acuerdo al color. b) Grado de deterioro de acuerdo a la intensidad de color.

La elaboración del texto se hizo con *Microsoft Word (Microsoft Office)*, la elaboración de gráficas con *Microsoft Excel* y la digitalización de figuras e imágenes con *AutoCAD*.

Localización

a) Localización

El área de estudio donde se encuentran los edificios históricos que contienen a la Ignimbrita Cantera, abarca el centro histórico de la ciudad de San Luis Potosí, capital del estado del mismo nombre en México. Las muestras de roca pertenecientes a la Ignimbrita Cantera que fueron utilizadas para las pruebas y estudios mencionados en este trabajo, fueron obtenidas en el estado de San Luis Potosí dentro del ejido de Escalerillas, frente a la presa El Potosino (Figura 5).

b) Vías de acceso

Para llegar al lugar de obtención de muestras, partiendo de la ciudad de San Luis Potosí, se dirige al sur poniente de la ciudad y se toma la Carretera Federal número 80 que va de San Luis Potosí a Guadalajara, entre los kilómetros 7 y 15, tomando la desviación hacia la presa El Potosino se sigue por la terracería que rodea la presa hasta llegar a las canteras.

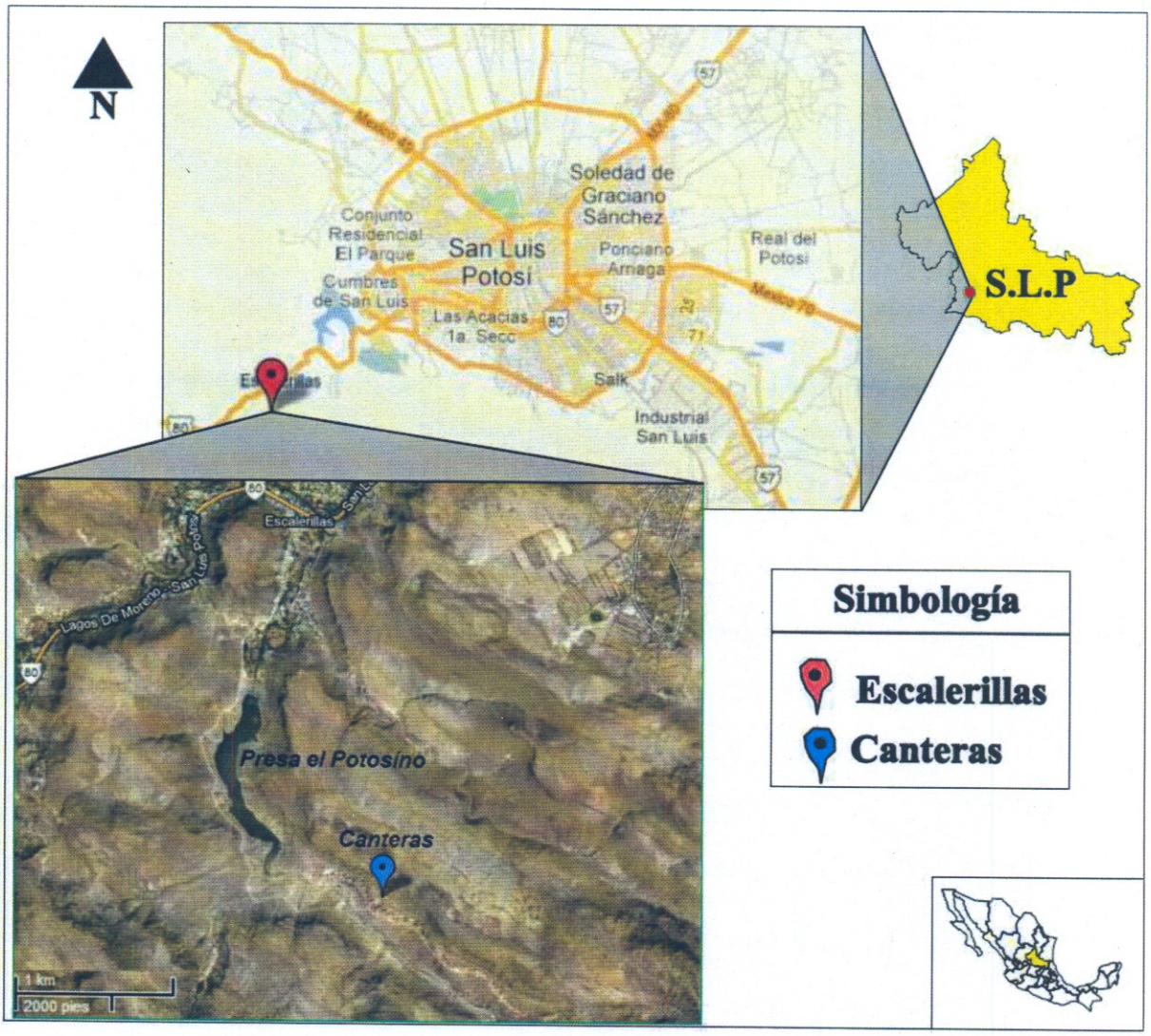


Figura 5. Localización del sitio de obtención de muestras en el estado de San Luis Potosí, México (modificado de Google Maps, INEGI 2012).

Meteorología

Los climas del estado por obra de la diversidad topográfica de la entidad son muy variados, van desde el desértico hasta el tropical.

La ciudad de San Luis Potosí pertenece a la zona centro del estado de San Luis Potosí. La zona centro se extiende en la altiplanicie y comprende los sistemas montañosos del

oriente y centro, entre los que se desarrollan valles alargados y amplios. Su clima es semiseco a templado, seco hacia el norte y más húmedo hacia el sur. La temperatura media anual es de 23ºC, alcanzando hasta 0ºC en enero. Llegan a presentarse lluvias durante todo el año.

Por medio de la página del Servicio Meteorológico Nacional se obtuvieron los datos de temperatura máxima, media, y mínima al igual que la precipitación (en milímetros) del grupo de años de 1971 - 2000 para ser comparado con los datos del año 2011 y parte del 2012 (enero-octubre) en la ciudad de San Luis Potosí. Con estos datos se tiene una idea del clima al que se han expuesto los edificios históricos de la ciudad y por lo tanto las rocas de construcción de la Ignimbrita Cantera.

En el grupo de años de 1971 al año 2000, las temperaturas máximas presentadas en la ciudad de San Luis Potosí fueron en el mes de Mayo de 1998 con 32°C, Junio de 1998 con 31.1°C y Abril del 2000 con 31°C (Figura 6).

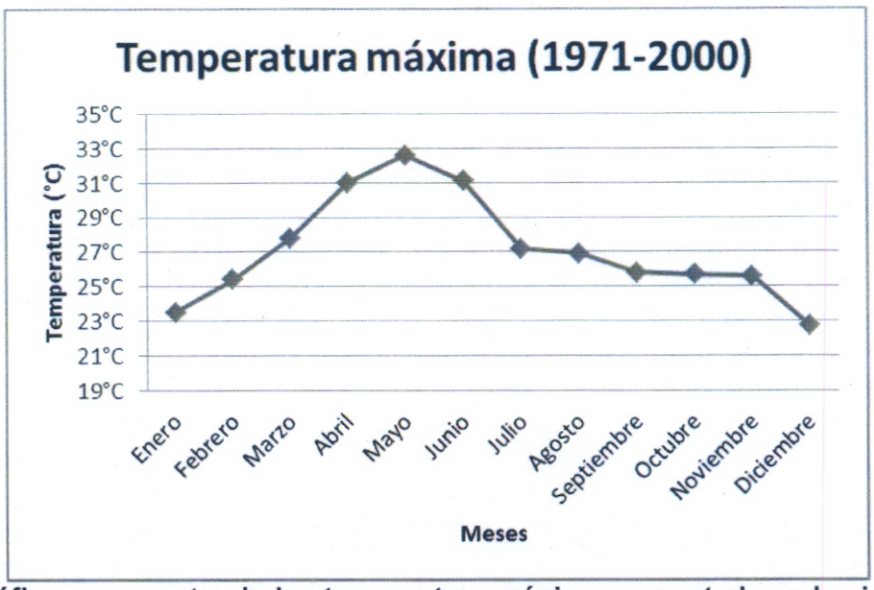


Figura 6. Gráfico representando las temperatura máxima presentada en la ciudad de San Luis Potosí en el grupo de años de 1971-2000 (Servicio Meteorológico Nacional, 2012).

En los años 2011 y 2012 las máximas temperaturas también se registran en el mes de mayo; en 2011 la temperatura máxima fue de 36.5°C y en 2012 fue de 34°C (Figura 7).

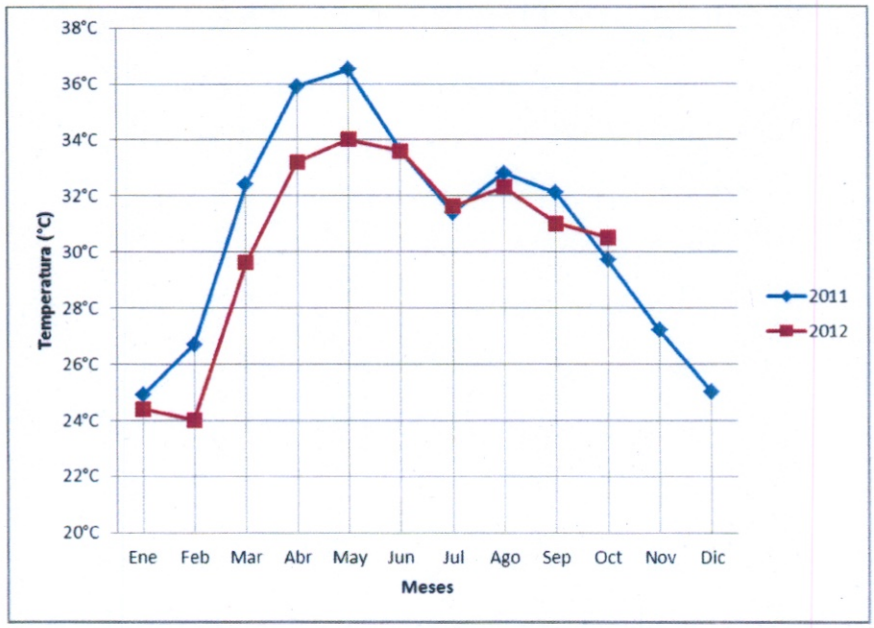


Figura 7. Gráfico representando las temperaturas máximas en la ciudad de San Luis Potosí en los años de 2011 y 2012 (Servicio Meteorológico Nacional, 2012).

De los dos grupos de años se puede ver que la temperatura va ascendiendo desde el mes de marzo y decrece en septiembre. De 1971 al año 2000 la temperatura máxima alcanzada fue 32.6°C, mientras que en 2011-2012 la máxima temperatura alcanzada fue de 36.5°C lo que nos da una idea de lo que ha aumentado la temperatura en la ciudad de San Luis Potosí.

La temperatura media en la ciudad de San Luis Potosí de 1971 al año 2000 fue de 13.4°C en los meses más fríos (diciembre y enero) y de 21.1°C en mayo (mes más caluroso). La temperatura media anual de este grupo de años fue 17.4°C (Figura 8).

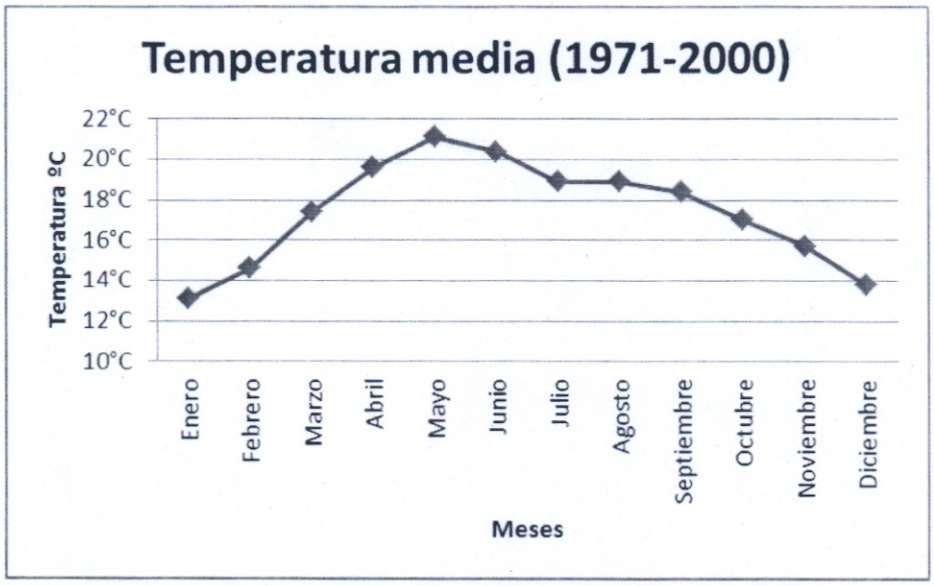


Figura 8. Gráfico representando las temperatura media presentada en la ciudad de San Luis Potosí en el grupo de años de 1971-2000 (Servicio Meteorológico Nacional, 2012).

La temperatura media de la ciudad va desde 17°C en los meses más fríos (diciembre y enero) y hasta de 26.5°C-28°C en el mes más caluroso (mayo). La temperatura media anual en la ciudad de San Luis Potosí es de 23°C (Figura 9).

UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE SAN LUIS POTOSI
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
CICTD

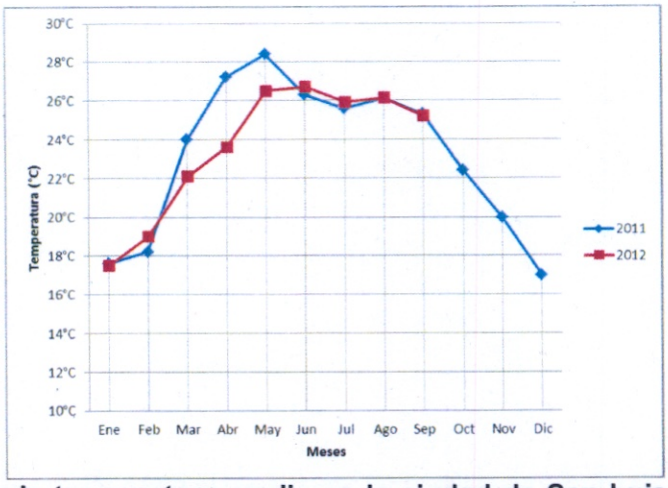


Figura 9. Grafico de la temperatura media en la ciudad de San Luis Potosí en los años 2011 y 2012 (Servicio Meteorológico Nacional, 2012).

La temperatura media anual de la cuidad de San Luis Potosí de 1971 al año 2000 fue de 17.4°C y de 2011 al año 2012 fue de 23°C por lo cual hay un aumento en la temperatura media anual.

Las temperaturas mínimas registradas en la ciudad de San Luis Potosí del grupo de años de 1971 al año 2000 fueron de 3.3°C en enero de 1973, 3.8°C en febrero de 1976 y 4.5°C en diciembre de 1975 (Figura 10).

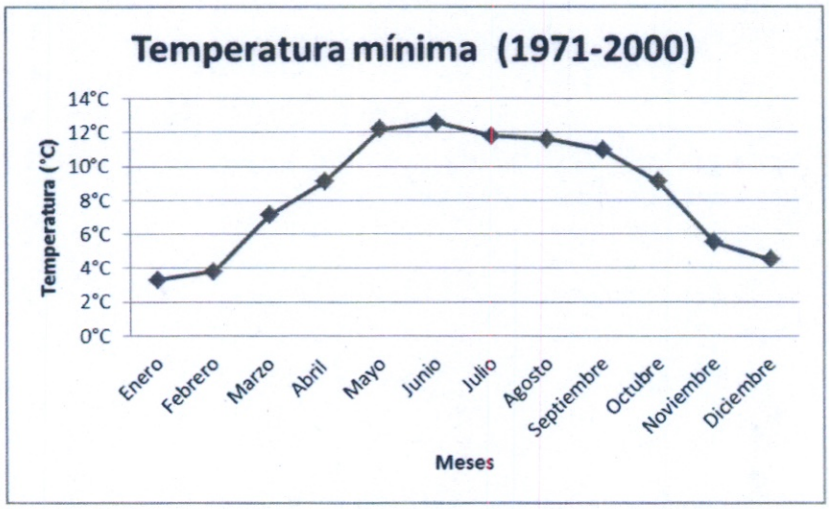


Figura 10. Gráfico representando las temperatura mínima presentada en la ciudad de San Luis Potosí en el grupo de años de 1971-2000 (Servicio Meteorológico Nacional, 2012).

Las temperaturas mínimas de 2011 a 2012 se presentan en los meses de diciembre a febrero. En el año 2011 la mínima se presentó en el mes de diciembre y fue de 8.8°C, y en el año 2012 (enero a octubre) la temperatura mínima registrada fue en el mes de enero con 10.8°C (Figura 11).

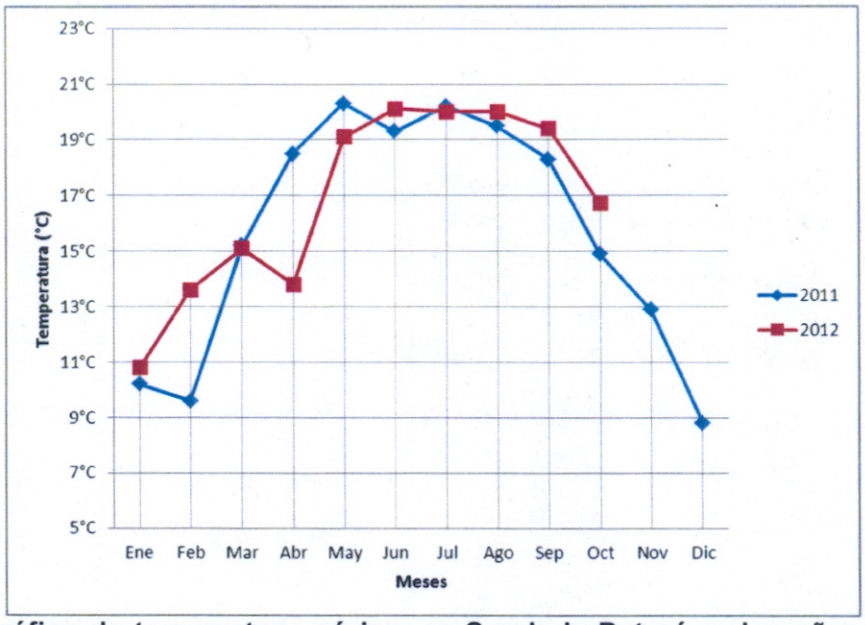


Figura 11. Gráfico de temperatura mínima en San Luis Potosí en los años 2011 y 2012 (Servicio Meteorológico Nacional, 2012).

Se puede ver que la temperatura mínima en la cuidad de san Luis Potosí ha ido en aumento conforme al pasar del tiempo ya que la temperatura mínima registrada del grupo de años de 1971 a 2000 fue de 3.3°C y del año 2011 a 2012 fue de 8.8°C.

En cuanto a la precipitación, en el grupo de años de 1971 a 2000, la precipitación mínima en la ciudad de San Luis Potosí fue en el mes de Febrero de 1997 con 20.5 mm y los meses que más precipitación tuvieron fueron Julio de 1976 con 236.4 mm y Agosto de 1995 con 175.2 mm (Figura 12).

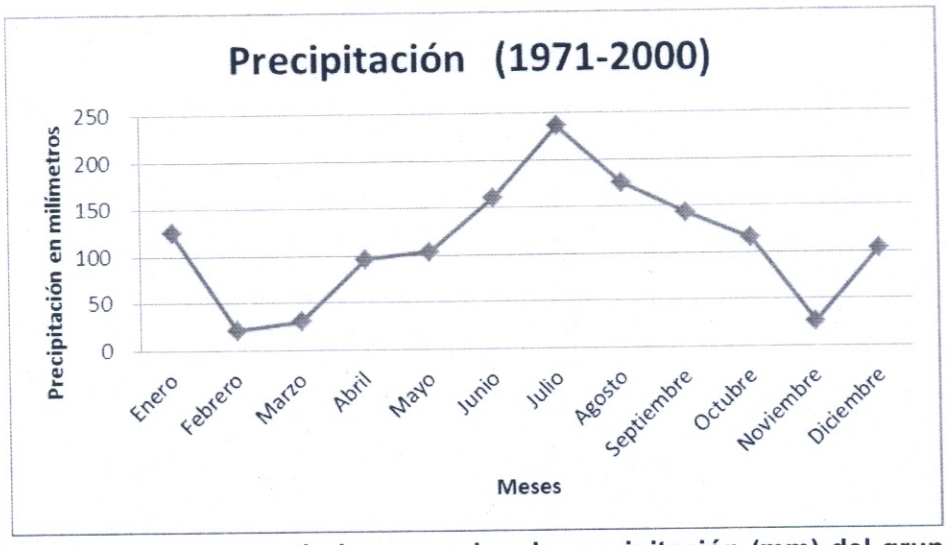


Figura 12. Gráfico representando las normales de precipitación (mm) del grupo de años de 1971-2000 en la ciudad de San Luis Potosí (Servicio Meteorológico Nacional, 2012).

Durante el año 2011 el mes con menor precipitación fue febrero con 2.8 mm y los meses que más reportaron precipitación durante el año fueron junio con 276.7 mm y julio con 372 mm. La tasa de precipitación acumulada durante todo el año fue de 922.4 mm (Figura 13).

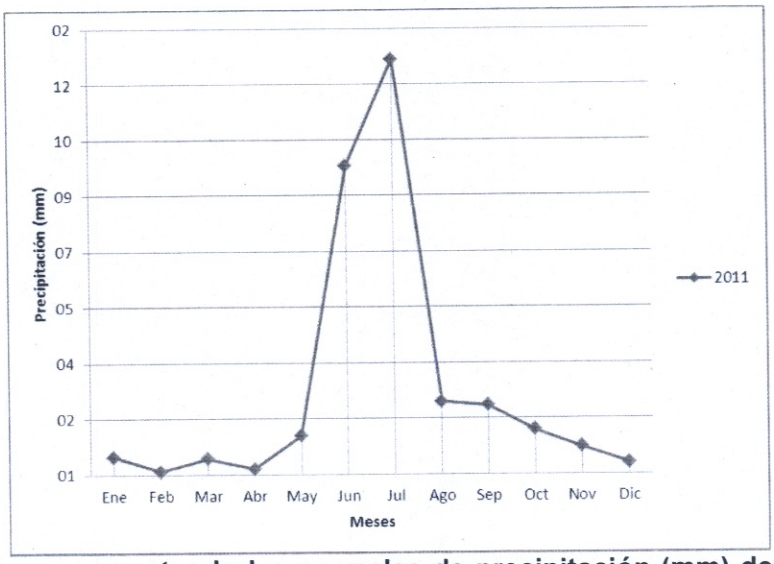


Figura 13. Gráfico representando las normales de precipitación (mm) del año 2011 en la ciudad de San Luis Potosí (Servicio Meteorológico Nacional, 2012).

La precipitación máxima se presenta durante el mes del Julio. En el grupo de años de 1971 al 2000 fue de 236.4 mm y en el año 2011 fue de 372mm, se puede ver un incremento de milímetros durante el mes de más precipitación.

El grupo de datos del Servicio Meteorológico Nacional son representativos, ya que los procesos que influyen en el deterioro de rocas están cambiando a una tasa muy rápida como resultado de los cambios en el clima (Smith *et al.,* 2010).

Tipos de Deterioro

Para describir algunos de los términos anteriores lo haremos según el glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción (Ordaz y Esbert, 1985).

a) Agrietamiento

Las grietas se definen como fisuras individuales, claramente visibles por el ojo, resultando de la separación de dos partes. Pueden causar patrones de despegado, como relleno o fragmentación. Esta categoría se subdivide en características, grietas de estrella, grietas de cabello, *craquelé* (agrietado) y divisiones, mientras que la 'deformación' se refiere a los cambios en la forma sin la perdida de integridad, llevando a la flexión, pandeo o torsión de la roca (Siegesmund *et al.,* 2008).

b) Separación

Incluye todas las formas de desgaste que muestren desintegración de las estructuras de la roca en escala macroscópica y microscópica tales como:

- Abrasión: proceso mecánico que desgasta la roca debido a la acción del viento, agua o hielo.
- Delaminación (exfoliación): fisuración de la roca, usualmente se presenta en rocas metamórficas debido a su esquistosidad o foliación; consiste en una separación milimétrica, favorecida por la naturaleza de la roca.
- Desintegración: desmoronado, desintegración granular. Se trata de procesos superficiales debidos a la perdida de componentes minerales, por lo cual los demás componentes ocupan ese espacio y se desmoronan.
- Fragmentación (astillado): pueden ser longitudinales o transversales, se deben a la presencia de fracturas no visibles y a la acción de cargas estructurales.
- Descamación y desincrustación: hojuelamiento, desincrustación de contornos. Se trata de una separación en placas, es un fenómeno de exfoliación normalmente paralela a la superficie de exposición, se puede deber a una meteorización diferencial por lo que la parte externa se altera más rápidamente y llega a separarse físicamente del resto de la roca.

En lo que se refiere a desintegración granular, se pueden distinguir tres formas de desgaste individuales: pulverizado (tiza), arena y azucarado (principalmente en feldespatos), que están relacionados al tamaño de grano de la roca. La desintegración granular en arena o en detritos muestra formas transicionales en hojuelas y en desmoronado (Fitzner *et al.,* 1995).

c) *Pérdida de material*

Incluye todas las formas que describen perdida de material de roca. Se subdividen en:

- Alveolización: aparición de una red continúa de cavidades alveolares, pueden originarse por disolución o hidrólisis seguida de disolución, de determinados minerales de calcio, o por la acción del viento (abrasión), o por la acción de raíces de plantas.
- Erosión: erosión diferencial y pérdida de componentes, perdida de matriz, redondeo y rugosidad, perdida de material que se centra principalmente en la superficie expuesta, suelen ocurrir sobre rocas de carácter masivo.
- Daño mecánico: daño por impacto, corte, rasguño, abrasión, etc. Este daño es debido a cualquier deterioro por procesos mecánicos sobre la roca.
- Micro *Karst*: Se origina principalmente sobre rocas de tipo carbonatadas (calizas) debido a la reacción del agua sobre el carbonato de calcio causando huecos.
- Partes pérdidas: Pueden ser generalizadas debido a la pérdida de piezas arquitectónicas completas.
- Perforación y picaduras: erosión o corrosión puntiforme caracterizada por la aparición de huecos o cavidades individualizados en el material pétreo.

d) *Decoloración y depósito*

Se incluyen todas las formas que caracterizan una modificación en el color de la roca y el depósito en la superficie de la roca o cerca de esta; Esto incluye:

- Corteza: costras negras y de sal. Son láminas de material endurecido que se producen por la transformación superficial del sustrato pétreo; estas costras se pueden desarrollar en capas.
- Deposito: son acumulaciones superficiales de un material ajeno a la roca sobre su superficie. Pueden ser excrementos, polvo, tierra, etc.
- Decoloración: coloración, blanqueo, área de humedad, tinción.
- Efloresencia: son manchas de color blanco producidas por la precipitación de sales solubles al migrar y evaporarse el agua en la superficie de las rocas porosas.
- Incrustaciones: deposito lenticular o estratiforme, compacto y adherente al substrato pétreo. Generalmente está formada por compuestos carbonatados. En calizas las incrustaciones pueden deberse a la recristalización del carbonato de calcio de la roca disuelto y reprecipitado a partir de agua conteniendo dióxido de carbono.
- Película: se trata de una capa delgada sobre la roca, esta es de un material de composición distinta al de la roca de construcción.
- Aspecto brilloso: Ciertos materiales pueden darle una apariencia brillosa o lustre a la roca, esta puede ser de influencia externa (algún tipo de esmalte para conservación) o por los minerales presentes en la roca al ser erosionados o tallados.
- *Graffiti*: aerosol puesto en la superficie debido al vandalismo.
- Patina: rica en fierro, oxalato, etc. Son superficiales y delgadas, pueden deberse al envejecimiento (debido a la intemperie), a la suciedad (ennegrecimiento

debido a la contaminación ambiental), al lavado (escorrentía diferencial del agua), a factores biológicos (biogénicas debido a organismos).

- Ensuciamiento: se trata de cualquier agente externo producto de la contaminación del lugar, polvo, *smog,* etc.

Subfloresencia: agregado cristalino de carácter salino, situado por debajo de la superficie de una roca, muy cerca de ella.

e) Colonización Biológica

Se refiere a la colonización de la planta por plantas y microorganismos tales como bacterias, cianobacterias, algas, hongos, y líquenes. También se incluye como colonización biológica las influencias de otros organismos tales como el anido de animales sobre y dentro de la roca.

FMIT 5186

I. GENERALIDADES

I.I Marco Geológico

La Ignimbrita Cantera fue estudiada por Labarthe-Hernández *et al.* (1982), quienes ubicaron su localidad tipo en el Arroyo de la Cantera, a 2.5 km al noreste del poblado Los Arroyos, S.L.P. y su sección tipo en la barranca del Cerro Alto, al norte del poblado de Calderón, S.L.P. La unidad se encuentra en el Campo Volcánico San Luis Potosí dentro del Complejo Volcánico Sierra San Miguelito (CVSSM) que se localiza en las inmediaciones sur occidente de la ciudad de San Luis Potosí y es parte de la Provincia Volcánica Sierra Madre Occidental estudiada por Tristán-González *et al.*, 2009. Esta Formación es correlacionable con la denominada ignimbrita Cuatralba que se encuentra en las mesetas de la sierra del estado de Guanajuato, México.

Este paquete grueso de depósitos de flujos piroclásticos se encuentra intercalado entre domos riolíticos, cuenta con una edad de 29 ± 1.5 Ma perteneciente al Oligoceno y se extiende en la mayor parte de la Sierra de San Miguelito (Tristán-González *et al.,* 2003).

En cuanto a su litología y espesor, la Ignimbrita Cantera forma parte de un paquete de rocas que Labarthe-Hernández *et al.* (1982) agruparon en 4 miembros:

- Miembro 1: Base que consiste en un vitrófido lenticular con espesor de 2 m a 20 m, brechoso hacía la cima. Cuando no aparece este vitrófido la base es constituida por una matriz fina de cenizas no soldadas a semisoldadas de tono blanco- crema a rosa y gris claro. En algunas zonas su base consiste de un flujo piroclástico depositado por caída piroclástica, bien estratificado y gradado. En algunos de sus horizontes los tamaños de los fragmentos van de 5 mm a 2 cm y en otros de 2-20 cm que hacia su base puede presentar capas vítreas con

espesor de 30-50 m. Sobre esa base se encuentra una ignimbrita de color rosa a café claro, con textura porfirítica y eutaxítica de mero a holocristalina, contiene sanidino y cuarzo euhedral a subhedral en una matriz parcial a totalmente desvitrificada. Su soldamiento va de parcial en la parte inferior y bien soldada en su parte media superior. Tiene líticos rojizos angulares y unos verdosos aislados y el contenido aumenta hacia su base.

- Miembro 2: Se trata de un horizonte índice, de flujo piroclástico sin soldar, color gris claro en el cual se encuentran fenocristales de cuarzo y sanidino, líticos y pómez sin colapsar.
- Miembro 3: Consiste en una ignimbrita color gris rosáceo a café grisáceo, con 30-40% de fenocristales euhdrales a subhedrales de cuarzo y feldespato potásico que se que se encuentran rotos, también contiene biotita y óxidos de fierro en menor proporción. Su matriz es merocristalina y parcialmente desvitrificada que contiene líticos, esquirlas de vidrio y pómez colapsada. Se trata de un flujo piroclástico bien soldado en su parte superior y cuenta con cristalización en fase de vapor en cavidades y fracturas.
- Miembro 4: Se trata de un flujo pircolástico depositado por caída piroclástica, cartografiado como toba El Peaje por Tristán-González y Labarthe-Hernández (1979) en la Hoja Tepetate. Este flujo piroclástico es de color blanco crema a café claro, bien gradada y estratificada con capas de 5-40 cm con estratificación de horizontes de ceniza fina que pueden encontrarse alterados a arcillas, con otros del tamaño de arena; algunos tienen abundante lapilli y otros líticos de 1 a 5 cm.

Según métodos radiométricos en muestras de la localidad tipo (Labarthe-Hernández *et al.,* 1982), se le determinó a esta ignimbrita una edad de 29.0 ± 1.5 Ma correspondiente al Oligoceno medio.

La Ignimbrita Cantera en la Sierra de San Miguelito de San Luis Potosí abarca una extensión muy amplia, las muestras fueron obtenidas en el sitio con las coordenadas UTM 293655.3411, 2443897.73 zona14N, al surponiente de la ciudad de San Luis Potosí (Figura 1.1) y pertenece al Miembro 3 de la Ignimbrita Cantera de acuerdo a la descripción de Labarthe-Hernández *et al.* (1982), siendo este un miembro soldado y apto para la construcción.

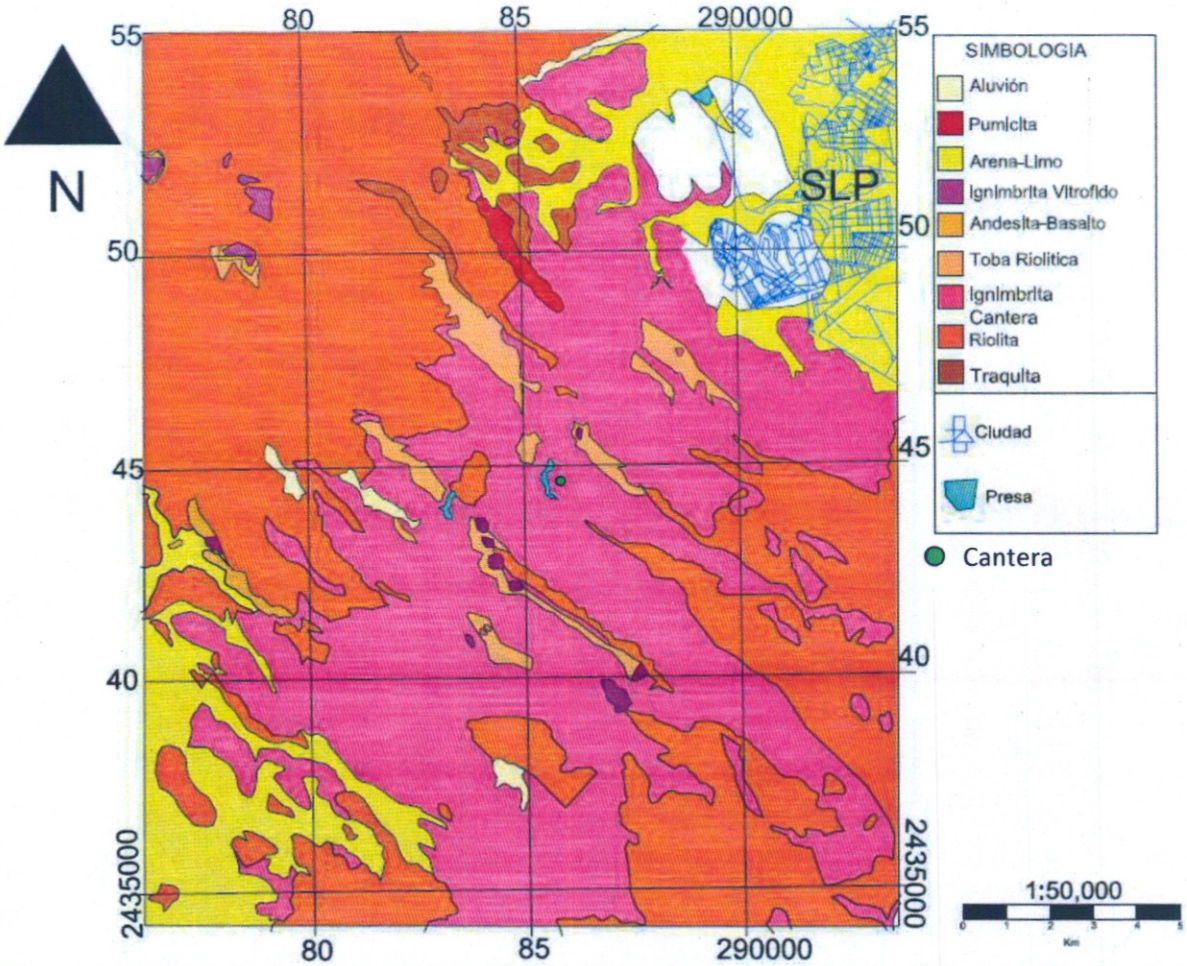


Figura 1.1 Mapa de la extensión litológica de la Ignimbrita Cantera al surponiente de la ciudad de San Luis Potosí (Modificado de la carta geológico-minera Tepetate F14A83).

I.II Marco Teórico

Propiedades Petrográficas

1) Densidad

La densidad (ρ) del material se divide en dos:

- densidad de matriz (ρ_{Matrix}).
- densidad aparente (ρ_{Bulk}).

El valor de la densidad aparente esta fijo con respecto a la porosidad de un material, la densidad de matriz depende de los componentes y no toma en cuenta la porosidad. Por lo tanto la porosidad de matriz ofrece evidencia de la composición del material (Siegesmund y Dürrast, 2011).

El método para determinar la densidad de matriz y la densidad aparente de la muestra de roca fue el método de Arquímedes (Monicard, 1980), es un método simple que mide el empuje que actúa en una muestra inmersa en agua. Para este método fueron utilizadas muestras de 60 x 60 mm. Aquí los parámetros para determinar la densidad son:

- El peso de la muestra bajo condiciones de secado (m_{dry}).
- El peso de la muestra bajo condiciones completamente saturadas (m_{sat}).
- El peso de la muestra con la muestra completamente sumergida en el agua (m_{sub}).

Para los dos últimos valores se utiliza agua destilada para saturar el espacio de poro. Las condiciones de completa saturación se logran por medio de la extracción del aire en los poros. Es necesario saber o determinar la densidad del agua. La densidad de matriz puede ser determinada con la siguiente ecuación:

$$\rho_{Matrix} = \rho_{Water} \cdot (m_{dry}/m_{dry} - m_{sub})$$

Ecuación 1.

La densidad aparente puede ser determinada de la siguiente manera:

$$\rho_{Bulk} = \rho_{Water} \cdot (m_{dry}/m_{sat} - m_{sub})$$

Ecuación 2.

Este método no considera el espacio de poro cerrado al cual no puede ser accedido durante el proceso de saturación. Los valores de peso para los estados saturados y completamente sumergidos tienden a ser menores, y por lo tanto los valores de la densidad de matriz también tienden a ser menores. Se puede observar valores similares en las densidades, estas dependen de la mineralogía de la roca entre otros factores importantes.

Popp (1994) después de estudiar la densidad y composición química de las rocas separo tres grupos de rocas principales (Tabla 1.1).

Grupo	Densidad	Contenido de SiO_2
félsicas	<2.8 g/cm^3	>70%,
intermedias	2.8 g/cm^3<ρ<2.9 g/cm^3	55%< SiO_2<70%
máficas	ρ>2.9 g/cm^3	<55%

Tabla 1.1 Clasificación de Popp (1994) de los grupos de rocas principales según su densidad de matriz.

2) Porosidad

Siegesmund y Snethlage (2011) definen la porosidad por la relación del volumen de poro (poros, fracturas abiertas, etc.) con el volumen de la roca completa. Puede ser calculada aplicando las mismas variables usadas para determinar la densidad de matriz y la densidad aparente. Se pueden distinguir dos diferentes tipos de porosidad, la porosidad efectiva (porosidad accesible) y la porosidad total. La primera comprende todos los espacios de poro en una roca, en los cuales los fluidos y los gases pueden acceder, mientras que la porosidad total incluye todos los poros, incluso los aislados, que no están interconectados. Para los procesos de intemperismo y desgaste, la porosidad efectiva es de interés primario (Weiss, 1992). Para rocas con valores de espacio de poro relativamente grandes, se asume que la porosidad efectiva es el tipo

dominante (Fitzner y Basten, 1994). Basándonos en la definición de los dos tipos de porosidad, la porosidad efectiva es menor o igual que la porosidad total (la diferencia sería pequeña).

La porosidad tiene un efecto directo e indirecto en muchas de las propiedades físicas de las rocas, y por lo tanto se considera como uno de los parámetros más importantes para las rocas de construcción. Una porosidad en aumento debido al deterioro tiene una influencia desfavorable en las características de deterioro (Hirschwald 1912, Fitzner 1970, Poschold 1990, Fitzner & Snethlage 1983, Viles *et al.*, 1997, Ruedrich *et al.*, 2005, Ruedrich *et al.*, 2010). Todos los huecos, espacios o cavidades en una roca pueden ser clasificados bajo el termino de 'poros'. Existen diferentes clasificaciones para la descripción de los espacios de poro, dependiendo de su aplicación (Fitzner y Basten, 1994):

- La clasificación del espacio de poro bajo aspectos petrogénicos, distingue entre la porosidad primaria como resultado de procesos sedimentarios y la porosidad secundaria como el resultado de procesos post-sedimentarios o diagenéticos incluyendo todos los procesos después de la sedimentación primaria. La conocida como porosidad de erosión en las rocas dimensionales es entonces un caso especial de la porosidad secundaria.
- Otra esquema de clasificación se basa en la separación de tipos ideales de poros individuales aplicando la geometría del poro y la génesis del poro, por ejemplo, poros esféricos, poros laminares, poros cilíndricos, poros intersticiales, poros de grieta, poros de disolución y poros de contracción.

- Otra clasificación es por medio de la localización del poro en relación con las partículas solidas (granos, minerales, etc.). Los poros entre las partículas solidas son llamados 'interparticula', mientras que los poros dentro de una partícula de roca solida son llamados 'intraparticula' en una escala de red cristalina.
- Otra clasificación aplica al criterio de cómo fluidos o gases pueden penetrar a través de los sistemas de poros de una roca. Una buena transmisión es prevista a través de un sistema de poros interconectados por poros de canal, poros de cuello de botella, cilíndricos, poros planos y poros cónicos que es una clasificación de acuerdo a su comportamiento. La no transmisión ocurre con poros aislados.
- Más común clasificar según los tamaños de poro.

Von Moos y Quervain (1948) utilizando el valor de la porosidad efectiva desarrollaron un esquema de clasificación para rocas, con <1% compactas, 1-2.5% poco porosa, 2.5-5% ligeramente porosa, 5-10% significativamente porosa, 10-20% muy porosa, y más del 20% significa que tiene muchos espacios de poro (micro poros, meso poros, macro poros y poros largos), en el cual nos basaremos para su clasificación.

El tamaño de un poro está dado por el radio de poro, el cual se determina del radio de un cilindro representando la forma ideal de un poro (los poros naturales usualmente exhiben una forma más geométricamente compleja que un cilindro). Por lo tanto, la determinación del tamaño del poro solo refleja el pequeño diámetro o radio de un poro, que es usualmente la entrada de un poro o fractura, y por lo tanto define el radio de la entrada del poro (Siegesmund y Snethlage, 2011).

El método para determinar la distribución del radio de un poro (entrada) (Brakel y Modry, 1981) se basa en la ecuación de Washburn (Washburn, 1921), que se deriva de la combinación de la ley de Poiseuille para el flujo viscoso y la ecuación de Young Laplace para la capilaridad:

$$r_p = -2y \cos\theta/P$$

Ecuación 3.

Donde r_p es el radio de entrada del poro de un poro capilar, ***y*** la tensión superficial en la interface liquida, **θ** el ángulo de contacto liquido-solido, y **P** la presión aplicada.

La ecuación se basa en el principio de que cada radio de poro capilar se caracteríza por un cierto valor de presión que es necesario para empujar un fluido dentro del poro (Doveton, 1987). Esta relación es válida solo para fluidos no-húmedos con un ángulo de contacto de θ>90°.

Entre 0.001 μm y 0.1 μm la distribución de radio del poro y el volumen se determinan por el método de absorción de nitrógeno basado en la teoría Braunauer-Emmet-Teller (BET) de Braunauer *et al.* (1938). La distribución de radio de poro de entre 0.1 μm y 4.0 μm se determinan con el porosímetro de mercurio (Figura 1.2), mientras que para poros con un radio mayor a 4.0 μm (clase de los macroporos) se realiza una combinación del porosímetro de mercurio y un análisis de imagen basado en una sección delgada. Para la determinación de la porosidad total se utiliza el método de empuje (buoyancy) basado en el principio de Arquímedes.

Figura 1.2 Porosímetro de mercurio para pruebas de porosidad.

Fitzner y Kownatzki (1991), Fitzner y Basten (1994), Meng (1993) y Heinrichs (2005), demostraron que con la combinación de diferentes métodos se puede lograr una imagen más realista del sistema de poros.

La distribución del tamaño de poro controla la porosidad, la permeabilidad y la saturación, está relacionada con la fábrica de la roca (Lucia, 1983, 1995, 1999).

3) Transporte de agua y propiedades de retención

Las propiedades de retención y transporte del agua tienen un gran impacto a largo plazo en la estabilidad y deterioro de las rocas dimensionales y su presencia tiene un efecto significativo en las propiedades petrofísicas y mecánicas de la roca. Esto está principalmente influenciado por el contenido de humedad, que es controlado por el espacio de poros de la roca. El espacio de poros y el sistema de poros están

relacionados con la cantidad de adsorción de agua, la habilidad del transporte de agua, y el tamaño del área de superficie disponible para las interacciones químicas. Las llamadas propiedades hígricas fueron clasificadas (Siegesmund y Snethlage, 2011) como:

- Adsorción
- permeabilidad de vapor de agua
- absorción de agua capilar
- características de secado.

Klopfer (1985) correlacionó los tamaños de poro con el transporte de agua y otros mecanismos. Se pueden distinguir tres regiones dependiendo del mecanismo involucrado: para microporos (poros de diámetro <0.1 μm) el agua se condensara a valores de humedad relativa (HR) por debajo del 99%. La succión capilar es prácticamente relevante para materiales con diámetro de poro entre 1 μm y 1 mm, llamados poros capilares. Para macroporos (poros con un diámetro mayor a 1 mm) surgen características de flujo fluido.

Los principales mecanismos de transporte de humedad son la difusión de vapor de agua y la absorción de agua capilar liquida. La fuerza manejada para la difusión de vapor de agua es la tendencia de equilibrio entre una mayor concentración de vapor de agua a una menor concentración (Stockhousen, 1981, Klopfer 1985, Künzel 1994, Krus 1995).

La absorción de agua por inmersión total se mide bajo presión atmosférica o bajo condiciones de vacío, este método nos da también los valores de expansión hídrica que

presenta la muestra (Figura 1.3). Desde estos valores específicos se puede obtener el grado de saturación de una muestra de roca. También es importante la absorción de agua capilar, que depende de la capilaridad de la muestra, cuando solo una superficie está en contacto con el agua líquida. Así se entiende que la absorción de agua total y la absorción de agua capilar son mecanismos de secado de una roca porosa, que se relacionan al movimiento del agua fluida y al vapor fuera del sistema de poros. La determinación de la sorción de vapor de agua es una de las medidas estándar para la caracterización de los materiales de construcción, incluyendo las rocas dimensionales. Para la especificación y la comprensión de las propiedades hígricas (relacionadas al transporte de vapor de agua), existen dos aspectos importantes, primero las propiedades del espacio de los poros con respecto a la figura, sección, área de superficie, y las conectividades dimensionales de los poros; y el segundo, la interacción entre las diferentes fases (aire, vapor de agua, agua líquida) en el espacio de poro (Siegesmund y Snethlage, 2011).

Figura 1.3 Prueba para determinar la expansión hídrica de las muestras de roca.

a) Absorción de agua Capilar

Una roca dimensional porosa experimenta la absorción de agua mientras se encuentra expuesta a la lluvia y también al contacto con el agua del suelo. En general, un medio poroso en contacto con el agua líquida la absorberá a ésta por su capilaridad. Este es un proceso espontaneo relacionado con la fuerza de absorción capilar originada por los poros en el material con diámetros de entre 10 µm y 1 mm y es el resultado de un equilibrio entre la superficie de tensión del agua líquida y las fuerzas de absorción de la pared de poro. El agua en estas superficies exhibe un ángulo de humedad característico que finalmente resulta en la tendencia del agua para entrar al sistema de poros, llamada acción capilar o succión capilar. El mecanismo de la absorción de agua capilar depende principalmente del tamaño de poro y la geometría del sistema de poro.

El agua se puede mover hacia arriba en contra de la gravedad (ascensión) en la capilaridad a través de superficies hidrofílicas, así como en una superficie mineral, mientras que en el caso de una superficie hidrofóbica el agua desciende en la capilaridad (depresión), este es el caso en el que una roca dimensional ha sido tratada con un agente hidrofobizador, o cuando una muestra está en contacto con mercurio durante la prueba del porosímetro de mercurio, para determinar su distribución de tamaño de poro (Siegesmund y Snethlage, 2011).

La succión capilar y el índice de succión capilar dependen del diámetro de poro, con capilares menores tienen un mayor poder de succión pero un bajo índice de succión capilar (Kettenacker 1930, Cammerer 1954, Klopfer 1985). Capilaridades mayores, por otro lado, tienen mayores velocidades de succión pero un más bajo poder de succión. Para un sistema de poro natural con capilares de diferentes tamaños, esto resultaría en

una rápida absorción de agua capilar general por los poros más largos y una absorción más lenta por los poros menores. Si el transporte de agua se encuentra interrumpido en un punto ocurre un rearreglo del proceso involucrado. Los poros más pequeños entonces incrementaran la absorción de agua de los poros capilares largos debido a su alto poder de succión.

La absorción de agua capilar de los materiales porosos se describe a través del coeficiente de absorción de agua (valor-w) que representa la cantidad de agua absorbida dependiente del área y el tiempo (kg/$m^2\sqrt{h}$). Se determina en el laboratorio usando un espécimen de roca cúbico puesto solo con su lado inferior en un recipiente llenado con agua a 5 mm. La muestra para esta prueba tiene cada uno de sus lados de 5 cm. El incremento de peso se mide digitalmente cada 20 segundos. Se debe tener cuidado de que la absorción de agua ocurra solo y constantemente a través del lado inferior. Para este propósito, el recipiente de agua es suficientemente largo para que no ocurra un cambio significante en el nivel de agua durante el experimento de absorción. La relación de la absorción de agua capilar contra el tiempo se determina por mediciones periódicas que cambian en peso. El valor-w se es determinado por:

Valor-w [kg/($m^2h^{0.5}$)]: w = m_w /$\sqrt{t}$

Ecuación 4.

En donde $\boldsymbol{m_w}$ es la absorción de agua relacionada a la superficie (kg/m^2) y $\boldsymbol{t}$ es el tiempo de absorción (h).

La absorción de agua por unidad de área contra la raíz cuadrada del tiempo inicialmente muestra un comportamiento linear. La pendiente de esta línea corresponde al valor-w, la cantidad de agua por unidad de área y la raíz cuadrada del tiempo

encontrada por la absorción capilar en una muestra. Esta relación se mantiene hasta que se complete la penetración (Klopfer 1974, Kraus 1985). De acuerdo con Meng (1993), se tienen que cumplir tres condiciones para que la relación sea válida:

1. La evaporación tiene que ser baja en comparación a la cantidad de agua absorbida durante el proceso de absorción.
2. El material no debe tener poros tan grandes (más de 1µm de diámetro).
3. La relación solo se mantiene para la absorción de agua verticalmente siempre y cuando está este debajo de la altura máxima teórica.

El coeficiente de permeabilidad (valor-b) se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Valor-b } [m/h^{0.5}]: b = z/\sqrt{t}$$

Ecuación 5.

Donde ***z*** es el incremento en la altura y ***t*** es el tiempo de absorción (h).

El coeficiente de permeabilidad (valor-b) describe la velocidad de penetración de agua a través de un material durante el proceso de absorción. Adicionalmente, dividiendo w/b se puede determinar la capacidad del agua que generalmente es definida como el contenido de agua por unidad de volumen que la roca es capaz de absorber, por la acción capilar (Niesel y Schimmelwitz, 1982, Weiss, 1992).

Usando el valor-w (Snethlage, 2005) las rocas pueden ser clasificadas como ligeramente absorbentes (w<0.5 kg/m^3h), medianamente abosrbentes (w< 0.5-3.05 kg/m^3h), y altamente absorbentes (w>3.05 kg/m^3h).

b) Adsorción de humedad

Los medios porosos con su específica área de superficie están en constante interacción con la humedad de la atmosfera que los rodea, por la sorción de las moléculas de agua en su superficie (Krus 1995). En el nivel higroscópico la adsorción de agua de una roca está regulada por el contenido de humedad del aire o la humedad y es separado en sorción (adsorción de humedad) y desorción (liberación de humedad). Las moléculas de agua se juntan o se separan a sí mismas para formar la superficie de las paredes de poros a lo largo de las débiles interacciones de los enlaces de hidrogeno y las fuerzas de *van der Waals* (Siegesmund y Snethlage, 2011).

En una humedad de aire existente, un balance dinámico está establecido entre la sorción y desorción de las moléculas de agua, ese es el equilibrio de sorción, que termodinámicamente es una función de la presión parcial del vapor de agua, o la humedad relativa del aire a una temperatura constante. La humedad de sorción o el rango higroscópico se extiende a los valores del contenido de humedad de equilibrio de 95% de humedad relativa (HR).

La determinación del contenido de humedad de equilibrio en una humedad relativa dada (HR), es dependiente de la temperatura, la base para determinar las isotermas de adsorción (Kiessl, 1983), que son características específicas para cada tipo de roca. Desde la isoterma de sorción determinada sobre todo el rango de humedad, se pueden sacar conclusiones esenciales de las propiedades materiales de una roca. La isoterma de sorción describe la cantidad de agua adsorbida en relación a la humedad relativa del aire a su alrededor, mientras que la isoterma de desorción describe el agua liberada como decrecimientos HR (Garrecht, 1992).

Las isotermas de sorción se determinan en la cámara climática (Figura 1.4). Las muestras son puestas en un cuarto con temperatura constante bajo diferentes niveles de humedad de aire establecidos usando diferentes soluciones saturadas de sal. Las muestras necesitan de tiempo para alcanzar un equilibrio entre los niveles de humedad relativa del aire dentro de los poros y el aire circundante en el disecador. Para algunas rocas puede tomar algunas semanas o meses alcanzar este equilibrio, especialmente para la determinación de la isoterma de desorción (Meng, 1993). En general es algo complicado determinar las isotermas de sorción del vapor de agua para rocas, debido a su composición heterogénea y su usual y algo compleja geometría de espacio de poro.

Figura 1.4 a) Cámara climática que modifica la humedad dentro de la misma cámara. b) Acercamiento de la cámara climática donde se colocan las muestras de roca.

4) *Características de secado*

Las características de secado en las rocas dimensionales son un factor muy importante que controla la resistencia al desgaste. El secado de las rocas de construcción húmedas es un proceso multifacético que esta principalmente gobernado por la humedad y movimiento del aire. Entre más rápido y más a fondo se seque una roca dimensional menor es la posibilidad de que la roca experimente un deterioro. La teoría de secado de los materiales de construcción porosos es descrita por Vos (1978), Snethlage (1984), Klopfer (1985), Kraus (1985) y Snethlage *et al.,* (1986). Se pueden distinguir dos fases:

- La primera fase se caracteriza por un rápido decremento en el contenido de humedad, el cual muestra una tendencia casi linear. Esta trayectoria de secado se define como el transporte de humedad capilar del interior de la muestra hacia la superficie de la muestra. Después de alcanzar el 'contenido de humedad crítico' (Vos, 1978), la superficie de agua se retira dentro de la muestra de roca.
- Durante la segunda fase del proceso de secado, el transporte de humedad capilar es completamente remplazado y controlado por el proceso conductivo de vapor de agua, que está relacionado al mecanismo de evaporación en la superficie interior de los poros. El proceso de secado se detiene cuando el contenido de humedad en la muestra de roca y el aire adyacente están en equilibrio.

Snethlage (1984) y Tournier *et al.* (2000) han definido tres etapas de secado, donde la etapa 2 y 3 corresponden a un nivel donde el rango primero decrece y luego se nivela

en una pequeño rango de evaporación. Franzen y Mirwald (2004) han subdividido la etapa 1 en etapa 1a y etapa 1b:

- 1a corresponde a una fuerte disminución en la tasa de secado.
- 1b muestra un pequeño cambio y eventualmente muestra una tendencia a incrementar. Este coincide con el decremento casi linear en el contenido de agua (Snethlage 1984, Weiss 1992, Tournier *et al.*, 2000).

Las características de secado también son controladas por la temperatura.

5) Propiedades Hígricas/Hídricas

La deformación de materiales pétreos de construcción puede estar relacionada con diferentes procesos. Es importante la presencia de humedad en el caso de los cambios de volumen y longitud de las rocas, este fenómeno de deformación es bien conocido como hígrico (en el rango de 0% - 95% de humedad relativa) e hídrico (en contacto con el agua) y da como resultado de los cambios de humedad la expansión y contracción (Siegesmund y Snethlage, 2011).

Un importante proceso de deterioro físico relacionado con esto es la dilatación hígrica periódica o estacional de una roca debido a los factores climáticos del ambiente.

El proceso de dilatación hígrica está relacionado a los cambios en la humedad relativa del aire y valores relativamente altos de dilatación hídrica que pueden ser comparados con mojar directamente la superficie con el agua líquida, aunque los valores son mucho más bajos (Steindlberger 2003, Ruedrich *et al.,* 2005, Ruedrich *et al.,* 2010).

La intensidad de la dilatación hígrica como función de la humedad relativa (HR) muestra variaciones dependiendo del material.

En muchas ocasiones, la expansión hígrica es la responsable por los daños vistos en las rocas. La combinación de una hinchazón hígrica o hídrica y los procesos de dilatación termal es un factor importante en el comportamiento de desgaste de rocas dimensionales. El resultado de estos procesos en rocas dimensionales puede ser visto como deterioro de separación en forma de descamación y desincrustación en forma de hojuelas (hojuelamiento) y cambios en la coloración de la roca.

Se sabe que el impacto del agua en las rocas dimensionales puede resultar en un cambio de volumen en la roca.

La dilatación hídrica es particularmente marcada en areniscas arcillosas y tobas volcánicas. Para las tobas volcánicas, Steindlberger (2003) observó valores máximos de expansión hídrica de hasta 3.3 mm/m (Tabla 1.2), mientras que muchos de ellos exhibían valores alrededor de 0.5 mm/m y de 1mm/m, de acuerdo a las observaciones hechas por Wendler *et al.* (1996), Ruedrick *et al.* (2005), y Stuck *et al.* (2008).

Tobas	Densidad (g/cm^3)	Porosidad (%)	Expansión hídrica (mm/m)
Toba riolítica Rochlitz	2.01	23.70	0.96
Toba Weibern	1.51	38.50	0.87-1.00
Toba Laubacher	2.71	16.31	3.29

Tabla 1.2 Expansión Hídrica de algunas tobas dimensionales con densidad y porosidad, datos tomados de *Steindlberger (2003).*

Esta propiedad se puede medir en la cámara climática durante a un incremento paso a paso de humedad relativa de entre 20-95%. Siguiendo la humedad relativa, un

decremento paso a paso fue realizado hasta que la humedad del aire alcanzara el estado inicial de 15%. Cada etapa de humedad se mantiene durante 24 horas. Después de que se equilibrara la muestra fue pesada. La sorción caracteriza la absorción de agua higroscópica y es un grado para la adsorción de agua en las superficies internas de la roca.

Otro fenómeno de dilatación hídrica es la gran dependencia del tiempo de expansión para diferentes rocas. El control depende principalmente de las propiedades de espacio de poro en las rocas, de esta forma las rocas con una red de poros conectados y porosidades superiores mostraran expansión hídrica más rápida que las rocas con menos poros conectados y menor valor de porosidad (Wendler *et al.,* 1996).

Investigaciones de laboratorio han demostrado que la dilatación hídrica de rocas dimensionales después de unos cuantos ciclos de exposición puede ser como un proceso reversible, en donde no puede medirse ninguna expansión residual después de que la muestra de roca regrese a su nivel de humedad original (Siegesmund y Snethlage, 2011).

Existe una relación entre el tamaño de poros existentes, el grado de saturación, la intensidad de expansión hídrica y la reducción de fuerza.

6) Propiedades de Fuerza

Siegesmund y Snethlage (2011) consideran la fuerza de un material como uno de los métodos más importantes y seguros para clasificar a las rocas y su aplicación para propósitos de construcción. Esto es porque los esfuerzos inducidos por los procesos de deterioro mecánico deben exceder la resistencia de un material antes de que ocurra

una falla. La fuerza mecánica muchas veces es controlada principalmente por la heterogeneidad de la roca y su fábrica en lugar de las propiedades individuales de los minerales formadores de roca. Los valores de fuerza se refieren a la habilidad de los materiales para resistir sin ruptura un esfuerzo aplicado. La Fuerza Cedida en ingeniería se refiere al punto en la curva de tensión-deformación fuera del cual el material empieza su deformación y no puede ser reversible después de retirar la carga. Fuerza Máxima en ingeniería se refiere al punto de la curva de tensión-deformación correspondiente al máximo estrés. El esfuerzo aplicado puede ser de tensión, de compresión o de cizalla. Si se llega a rebasar el límite de esfuerzo el material tiende a la ruptura.

La fuerza de un material depende de la fábrica de roca y es influenciada por su composición, el tamaño y forma de la muestra de material y el envejecimiento del material y sus condiciones de almacenamiento (Dürrast *et al.*, 2001). Los procesos ingenieriles a los cuales el material está sujeto, pueden alterar sus microestructuras. La variedad de mecanismos de fortalecimiento que alteran la fuerza de un material incluyen trabajo de endurecimiento, fortalecimiento sólido-solución, precipitación de endurecimiento y fortalecimiento de límite de grano y puede ser cuantificado y explicado cualitativamente. Sin embargo, los mecanismos de refuerzo están acompañados por la contradicción de que algunas propiedades mecánicas del material pueden degenerarse en un intento para hacer al material más fuerte.

Sin embargo, el termino fuerza de materiales suele referirse más a los varios métodos de calcular esfuerzos en partes estructurales, tal como vigas, columnas y ejes. Los métodos pueden usarse para predecir la respuesta de una estructura bajo carga y su

susceptibilidad a varios modelos de falla, y pueden tomar en cuenta varias propiedades de los materiales diferentes a la fuerza del material (cedida o máxima).

a) Fuerza Compresiva

Los requerimientos sobre la fuerza compresiva se hacen cuando a través de un material se tiene que asegurar una carga plana al suelo subsuperficial. Durante un experimento de presión uniaxial confinada, el espécimen de prueba que experimenta esfuerzo longitudinal será acortado hasta que falle y tenga una ruptura final (Thuro *et al.,* 2001). La fuerza confinada compresiva (USC) de un espécimen seco expresa el valor donde la muestra experimenta una pérdida total de cohesión a lo largo de la superficie de fractura. Al principio del experimento se puede observar usualmente una consolidación del espécimen.

Durante esta fase micro fracturas abiertas preexistentes son cerradas, y son preferiblemente aquellas que están orientadas perpendicularmente al aje de carga. Por medio de esto el espécimen de prueba experimenta un acortamiento irreversible pero con valores relativamente pequeños. Alrededor del 30% al 70% del valor de la fuerza compresiva. La muestra de roca tiene un comportamiento casi linealmente elástico. Más allá de que ocurra un incremento en la formación de micro fracturas que al final conduce al fallamiento total del material. El grado de consolidación depende fuertemente de la densidad de las microfractruras abiertas, mientras que el comportamiento linear elástico es principalmente determinado por la composición mineral y sus propiedades elásticas (Segall y Follard, 1980).

Las microfracturas nuevas formadas en el espécimen durante la prueba dependen por un lado, de la geometría y la densidad de las microfracturas preexistentes, y por otro lado, por la estabilidad mecánica de los minerales y la interacción dependiente de la fabrica entre la debilidad mecánica y los minerales duros (Segall y Follard 1980, Durrast *et al* 2001).

Los espécimenes para determinar la fuerza compresiva consisten en muestras cilíndricas con diámetro y altura de 50 x 50 mm, la dimensión de la muestra y la calidad de los extremos, debe ser cooplanar con una precisión de 0.1% en estado de secado o de saturación de agua. La fuerza compresiva determinada con estas muestras cilíndricas particularmente depende de la proporción longitud-diámetro. Según Wesche (1981) en una relación longitud-diámetro mayor de 2.5-3 mm la influencia de la geometría del espécimen es despreciable.

Para la prueba experimental de fuerza compresiva, la fuerza compresiva se mide colocando una muestra cilíndrica en una maquina compresora de prueba servo-hidráulica (Figura 1.5) con una marco de pruebas muy rígido y un intervalo de carga de 1,000 N/s. La carga es aplicada a los extremos del espécimen hasta el rompimiento.

La carga máxima es definida como la fuerza compresiva uniaxial. Los extremos con una menor calidad causan esfuerzos locales y pueden resultar en una pérdida de fuerza y datos de baja calidad. Una clasificación de rocas duras en relación con su esfuerzo compresivo, indica y separa a las rocas dimensionales de 5 (De Quervain, 1967) a 8 clases (Peschel 1974). En general, se hacen las siguientes discriminaciones: roca dura

con más de 110 MPa, rocas medianamente duras entre 70 MPa y 110 MPa y rocas débiles de entre 55 MPa y 70 MPa.

Las rocas volcánicas muestran una heterogeneidad distinta en lo que respecta a las fuerzas compresivas. Oscilan entre 50 MPa y 300 MPa pero las traquitas y especialmente las tobas muestran valores menores. En este caso la Ignimbrita Cantera de acuerdo a la primera clasificación entra en la clasificación de roca medianamente dura (70-110 MPa).

Otro factor que influencia la fuerza compresiva es el llamado "envejecimiento" de la muestra de prueba. Peschel (1974) descubrió que la fuerza compresiva incrementa con el tiempo. Las rocas recién extraídas primero alcanzan sus valores máximos en aproximadamente 1.5-2 años y permanecen relativamente constantes después de eso.

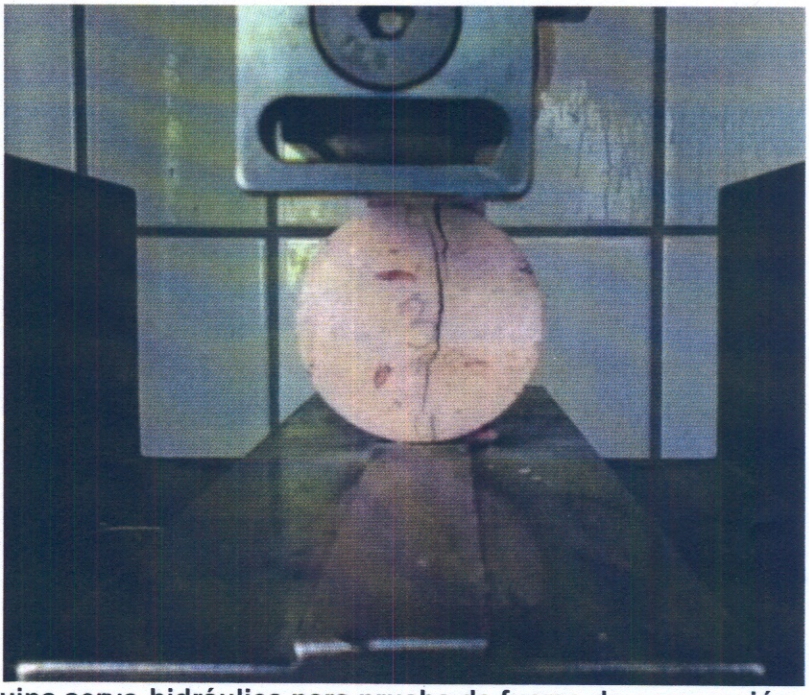


Figura 1.5 Maquina servo-hidráulica para prueba de fuerza de compresión.

b) Fuerza de tensión

La fuerza de tensión de un material es la cantidad máxima de esfuerzo tenso que puede ser sometido antes del rompimiento (Siegesmund y Snethlage, 2011).

Las pruebas de fuerza de tensión de rocas ser realizan mediante pruebas de tensión directa (uniaxial o triaxial), los extremos paralelos del cilindro de muestra, con un área definida de sección transversal, generalmente se pegan en los pistones de la máquina de pruebas (Figura 1.6). Así se va sacado con una fuerza controlada y gradual que va incrementando hasta que la muestra se rompa, o se le apliquen pruebas indirectas.

El procedimiento utilizado para la determinación de la fuerza de falla de tensión (σz) es la prueba brasileña. Un espécimen de roca es sujeto a una carga compresional en una configuración de prueba uniaxial, la cual resulta en un grande y homogéneo campo de esfuerzo de tensión. Cargando el disco en superficies paralelas, se induce una fuerza de tensión en la muestra, perpendicular a la presión aplicada. Esta es una prueba simple, relativamente barata, y completamente estandarizada.

El espécimen de prueba cilíndrico (40 x 20 mm) es cargado diametralmente a lo largo de la sección circular, donde la deformación de tensión resulta perpendicular a la dirección de carga. La falla de tensión ocurre cuando la fuerza de tensión del experimento alcanza el valor de la fuerza de tensión de la roca, $\boldsymbol{\sigma z}$. Desde la carga vertical $\boldsymbol{F}$ y las dimensiones del espécimen, la fuerza de tensión puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$\sigma z = (2 \times F) / (d \times l \times \pi)$$

Ecuación 6.

con **σz** el esfuerzo de tensión en la falla (MPa), ***F*** la fuerza de carga (N), ***l*** la longitud del espécimen (mm), and ***d*** el diámetro del espécimen (mm).

El valor de fuerza de tensión de una roca resulta por el promedio de al menos cuatro pruebas usando especímenes preparados cerca uno del otro (Thuro *et al.,* 2001).

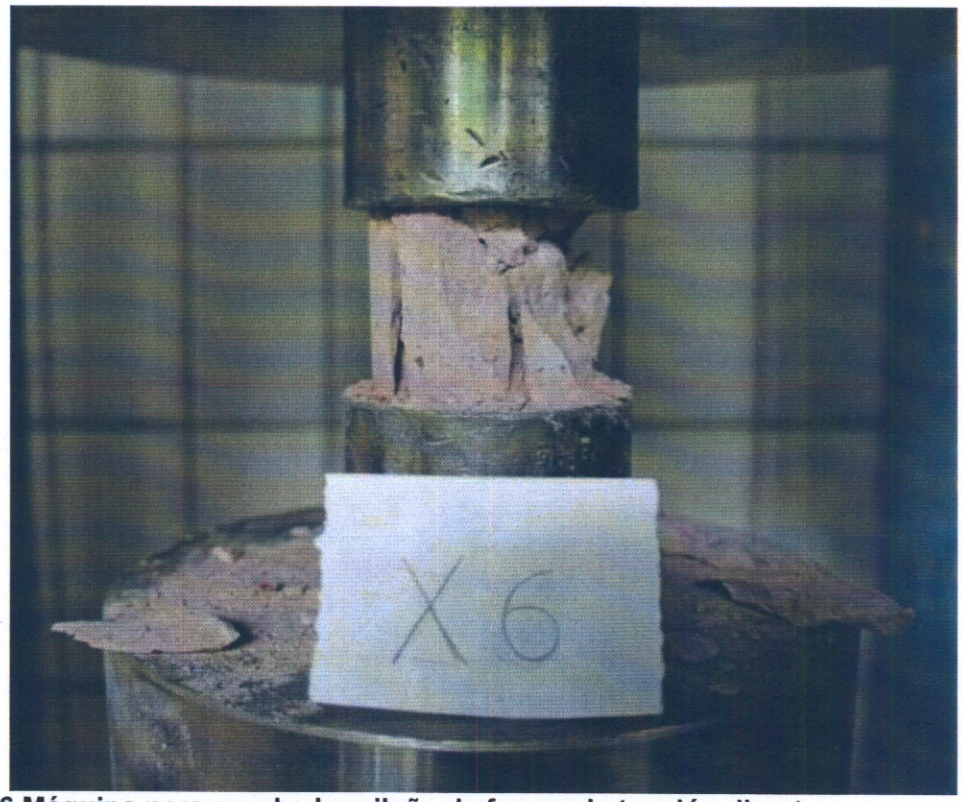


Figura 1.6 Máquina para prueba brasileña de fuerza de tensión directa.

c) Dureza y Resistencia a la Abrasión

En la industria del trabajo de las rocas y de las rocas dimensionales una escala para la dureza usualmente refleja y describe las dificultades en la preparación de una roca. Una escala de dureza más extensamente usada, especialmente en investigaciones mineralógicas y geológicas, es la resistencia de raya de Mohs, desarrollada en 1812 por Friedrich Mohs (Tabla 1.3).

Escala	Valores de Dureza	Objeto índice	Minerales índice
1	10		Talco
2	20	Uña de la mano	Yeso
3	30	Moneda de cobre	Calcita
4	40	Clavo	Fluorita
5	50	Hoja de navaja	Apatito
6	60	Vidrio	Ortosa
7	70	Placa	Cuarzo
8	80		Topacio
9	90	Topacio	Corindón
10	100	Diamante	Diamante

Tabla 1.3 Escala diagnostica de dureza (Modificada de Friedrich Mohs, 1812).

Una medida para la dureza de la roca también puede ser el grado de abrasión, la cual es la resistencia de la roca contra la fuerza de molienda. La resistencia de abrasión de una roca principalmente depende de su composición mineralógica y su fábrica de roca. De mayor importancia es el contenido de humedad en la roca (Hirschwald, 1912). La determinación de la resistencia de abrasión básicamente significa que tanto una roca puede resistir fuerzas relacionadas a pisadas al caminar. Esto también depende de la frecuencia de los pasos y el caminado así como el material que golpea la roca en el suelo.

Para la determinación de la resistencia de abrasión se aplican diferentes métodos, por ejemplo, Las máquinas de prueba de abrasión de Amsler o Böhme (Figura 1.7), que básicamente trabajan con una rueda. Aunque otros métodos disponibles aplican los mismos principios, la estandarización puede ser algo diferente. Por lo tanto, una conversión de datos de diferentes métodos no es posible. Para la prueba de Böhme, el espécimen de roca es empujado con un peso definido en una rueda de molienda, y luego molida usando un medio de molienda definido o abrasivo. Todos los minerales y

elementos de fábrica de una roca contribuyen a la resistencia de abrasión (Strohmeyer 2003).

La dimensión de los especímenes es de 71 x 71 x 25 mm (longitud, espesor, altura) porque la superficie de contacto entre la roca y la rueda de molienda tiene que ser de al menos 50 cm^2. El valor de prueba *Böhme* indica la pérdida material de un espécimen después de un cierto número de rondas en la rueda de molienda. Por lo tanto, valores mayores representan muestras con una resistencia de abrasión menor y valores menores equiparan a muestras con una mayor resistencia de abrasión.

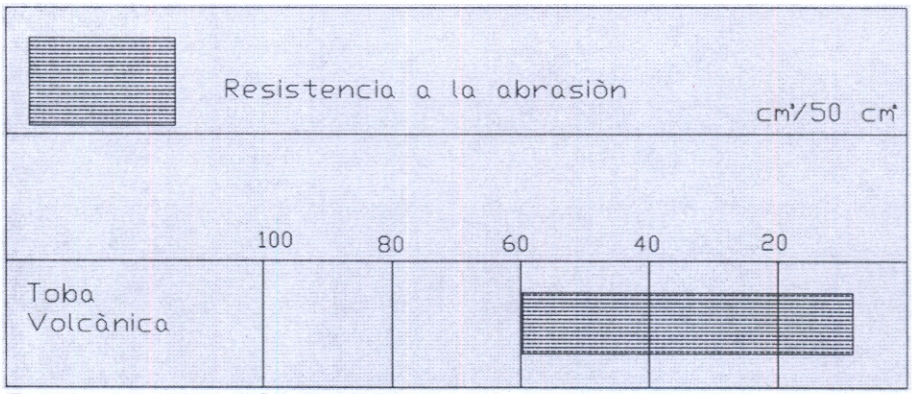


Figura 1.7 Prueba de Abrasión de Bôhme, el valor medio abajo de la toba volcánica ($cm^3/50cm^2$) indica una media a alta resistencia a la abrasión. Prueba aplicada a diferentes tipos de rocas incluyendo su rango de dispersión (modificado de Muller 2001).

Los valores medios de la resistencia de abrasión están fuertemente relacionados a las propiedades mecánicas de los minerales formadores de roca, especialmente la abrasión media.

7) Velocidades de onda ultrasónicas

Las medidas ultrasónicas son herramientas no destructivas para evaluar el daño estructural en edificios históricos. En estos métodos, las medidas de velocidad de onda-P (Vp) están correlacionadas con el incremento de porosidad debido a los daños de

fábrica en las rocas. Estas correlaciones proveen un método para medir el grado de daño estructural debido a la intemperie y deterioro usando medidas indirectas. La prevención de daños y planes de reparación pueden ser hechos en base a una clasificación de daños (Siegesmund y Snethlage, 2011).

Las propiedades elásticas de un material solido y también las velocidades sísmicas o acústicas son completamente determinadas por las constantes elásticas (rigidez). Estas constantes combinan el esfuerzo $\boldsymbol{\sigma}$ que actúa en una dirección específica en la tensión $\boldsymbol{\epsilon}$ en una dirección específica, donde las dos direcciones no son necesariamente las mismas. La rigidez se describe por un tensor de cuatro rangos y escrito en una matriz de 6 x 6. En caso de que un esfuerzo dimensional $\boldsymbol{\epsilon}$ fuera proporcional a $\boldsymbol{\sigma}$ a través del modulo de elasticidad o el Modulo de Young **E**, descrito por la Ley de Hooke como:

$$\sigma = E\epsilon$$

Ecuación 7.

Esta relación linear es solo válida por pequeñas y reversibles deformaciones y mientras el material corresponda a una tensión específica (Crosson y Lin, 1971, Siegesmund, 1996).

Los datos de velocidad experimental son medidos en el laboratorio por el método de "transmisión de pulsos" (Figura 1.8), en este caso con las muestras de roca de 60 x 60 mm. Es básicamente una aplicación que fue introducida por Birch (1960) en donde un pulso eléctrico es aplicado con un transductor a un extremo del espécimen. La deformación resultante es transmitida a través del espécimen a un transductor de recepción donde la señal mecánica es convertida en una señal eléctrica. La velocidad

es obtenida por el tiempo de recorrido y la longitud del espécimen después de la corrección del retardo del sistema.

Figura 1.8 Método de transmisión de pulsos para medir velocidades de onda ultrasónicas y determinar el deterioro presente en muestras de roca.

Este medio puede ser usado también como medida ultrasónica *in situ* (adentro o en el exterior) (Figura 1.9) cuando el equipo portable está disponible. Los transductores de transmisión y los de recepción son colocados en las superficies opuestas de la muestra para ser medidos.

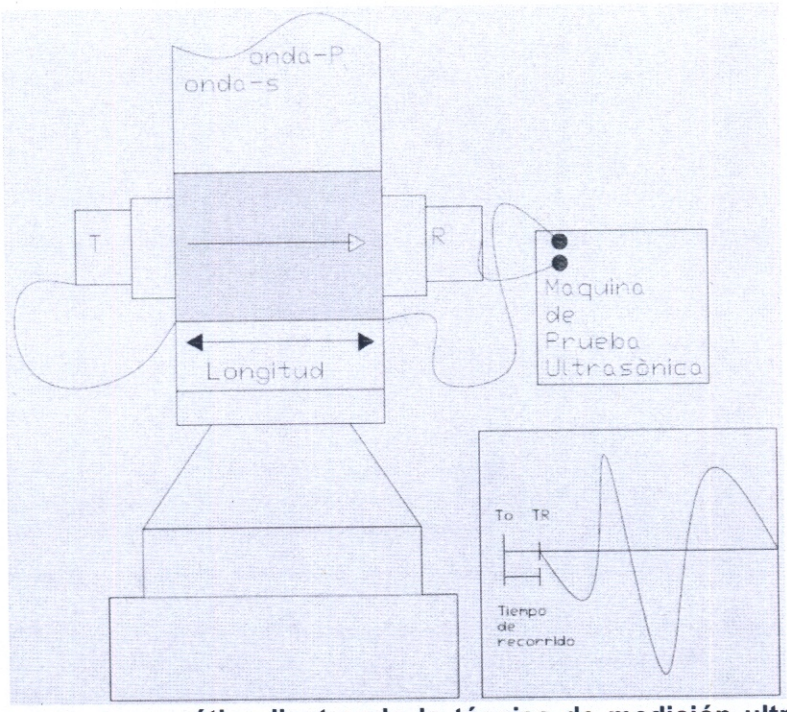


Figura 1.9 Diagrama esquemático ilustrando la técnica de medición ultrasónica *in situ,* con el transductor (T) y el receptor (R) en contacto directo con la muestra de longitud conocida. Las ondas P y S recorren una distancia en un breve tiempo (t en μs) medidas con una maquina de prueba ultrasónica. De los dos datos la velocidad ultrasónica puede ser calculada con V=l/t (V en km/s).

Con el fin de obtener señales ultrasónicas reproducibles y datos de velocidad seguros, es importante tener una unión sólida y fluida entre la muestra de roca y los transductores de transmisión y de recepción que permita una transmisión sin perturbaciones de la señal acústica. Las muestras de este estudio fueron medidas en el laboratorio donde las velocidades son generadas y recibidas por transductores piezocerámicos con frecuencias de resonancia en un rango usualmente de 0.5 MHz a 2.0 MHz. Aunque también otras frecuencias transductoras pueden ser utilizadas.

Las ondas que se generan se propagan como distintos tipos de onda, sin embargo, en usos prácticos las ondas de compresión (ondas-P) y las ondas transversales (ondas-S) son los tipos más importantes de ondas. Las velocidades de ondas ultrasónicas son

determinadas por la longitud del camino recorrido y el tiempo de recorrido. La velocidad de la onda-P siempre es mayor que las de la onda-S. Mientras viajan por la muestra de roca los diferentes tipos de ondas también experimentan diferente atenuación. Durante las medidas experimentales las ondas-S son más difíciles de manejar, por eso para la mayoría de las aplicaciones se utilizan las ondas-P (Siegesmund y Snethlage, 2011). Sin embargo, la determinación de la onda-S es necesaria para el cálculo de la elasticidad del modulo de Young (E) como se muestra en las siguientes ecuaciones, ya sea directamente o a través de la ecuación de Poisson:

$$E = \rho \frac{(3\,Vp^2 - 2Vs^2)}{(Vp^2 - \frac{1}{3}Vs^2)} Vs^2 \;\; o \;\; E = \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} Vp^2$$

Ecuación 8.

Donde **Vp** es la velocidad de la onda-P, **Vs** es la velocidad de la onda-S, **ρ** la densidad, y **μ** la razón de Poisson. Sin embargo, para calcular la razón de Possion se tiene que saber la velocidad de onda transversal. La ecuación de Poisson se puede calcular de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)}$$

Ecuación 9.

Con **Vp** la velocidad de onda compresional (onda-P) y **Vs** la velocidad de onda transversal.

a) Velocidad de ultrasonido y litología

La propagación de onda elástica a través de rocas naturales esta principalmente controlada por la composición mineralógica, fabrica de roca, presión de confinamiento, temperatura, presión de fluido, espacio de poro y su distribución e interconectividad así como los fluidos de poro, su composición y grado de saturación (Birch 1961, Klima y

Lluhanek 1968, Nur y Simmons 1969, Cristensen 1979, Gebrande 1982, Siegesmund 1996). Sin embargo, para aplicaciones prácticas y dicho en términos simples, las velocidades ultrasónicas de una muestra de roca principalmente dependen de su contenido de agua (grado de saturación), su densidad (composición) y su estado de preservación. Por lo tanto, las velocidades de onda-P son usualmente usadas como herramienta de diagnostico para la valoración de calidad de las rocas naturales. Muchas de estas relaciones son empíricas.

b) Velocidad de ultrasonido - Efecto de la porosidad y los fluidos

Las velocidades acústicas de las rocas porosas dependen fuertemente de la porosidad y del fluido contenido dentro. Rocas con rango de porosidad bajo ($\Phi<1.5\%$) muestran una tendencia claramente linear entre la porosidad y la velocidad de onda compresional (Siegesmund y Snethlage, 2011).

La influencia física de los fluidos en las velocidades ultrasónicas de una roca porosa se describe por la suma de los efectos relacionados a las propiedades elásticas de la matriz solida en interacción con la compresibilidad de la fase fluida en el espacio de poro de la roca. En experimentos de laboratorio Simmons y Nur (1969) observaron que un incremento en la saturación de agua corresponde a un incremento en las velocidades de onda-P (compresionales), mientras que las velocidades de onda-S (de cizalla) permanecen constantes o decrecen ligeramente. Este fenómeno está relacionado al hecho de que el modulo de cizalla de una roca es menos susceptible a los cambios en la saturación del agua de los espacios de poro que el modulo efectivo aparente.

El grado de consumo de agua así como el grado de saturación de agua esta principalmente relacionado al espacio de poro, con la porosidad, el tipo de poros, la geometría de poro, y la interconectividad de los poros. Durante la etapa inicial del deterioro solo unos pocos poros planos estan abiertos, lo que no permite la entrada de agua capilar. Con un deterioro en incremento el tamaño individual de poro aumenta, subsecuentemente también la conectividad de poro, y finalmente el total de espacio de poros (Siegesmund y Snethlage, 2011).

c) Velocidad ultrasónica y anisotropía

Para poder entender el comportamiento elástico de una roca, se necesita obtener toda la información posible de la estructura de la roca, desde que hay una compleja interacción entre la fábrica de roca y las propiedades petrofísicas. Los elementos más importantes de fábrica son la orientación cristalográfica preferencial de los minerales formadores de roca, las microfracturas y las formas de fábrica (tamaño de grano, orientación preferente de la forma del grano, etc.) (Siegesmund 1996). Combinados, son responsables por la anisotropía física de las rocas para la dependencia direccional de las velocidades de onda elásticas. Esto significa, que la distribución de la velocidad de la onda-P muestra diferentes valores cuando se mide en diferentes direcciones de la misma muestra de roca; para las ondas-S es similar.

d) Velocidad y Grado de deterioro

El efecto del deterioro en las ondas compresionales de velocidad fue dado para rocas volcánicas por Arikan *et al.* (2007). La observación principal es que como consecuencia

del deterioro, el estado de la porosidad cambia junto con la composición mineralógica y química. La clasificación Vp-estructural de deterioro para rocas volcánicas (Tabla 1.4).

ROCAS VOLCÁNICAS FÉLSICAS	
Grado de deterioro	Vp (km/s)
No deteriorada (fresca)	3.35-5.20
Ligeramente	2.49-4.66
Moderadamente	2.00-3.44
Alta	1.39-2.97

Tabla 1.4 Clasificación Vp-estructural de deterioro para rocas volcánicas de acuerdo a su velocidad experimental de Arikan *et al.* (2007).

I.III Marco Histórico

1) Catedral Metropolitana de San Luis Potosí

Esta edificación se ubica en el centro histórico de la ciudad de San Luis Potosí en el costado oriente de la Plaza de Armas, en la esquina de la calle Francisco I. Madero y la calle Manuel José Othon (Figura 1.10).

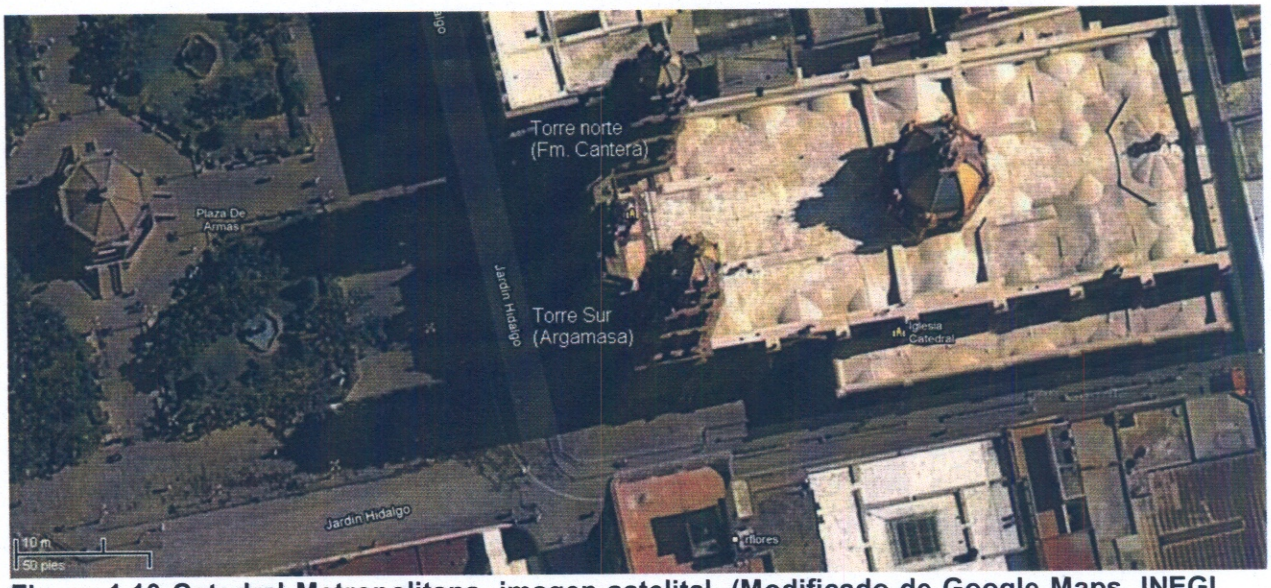


Figura 1.10 Catedral Metropolitana, imagen satelital. (Modificado de Google Maps, INEGI 2012).

La construcción actual se inicio en el año de 1670 dirigida por el maestro en arquitectura Nicolás Sánchez. Se terminó la construcción en el año de 1730.

La construcción es de orden dórico, con dos series de pilastras y tres naves, la principal es de ocho bóvedas y las laterales son de siete. La fachada es de estilo Barroco, de tres cuerpos con columnas salomónicas. Fue construida de cal y roca de la Formación Cantera, al igual que doce de las veinticuatro estatuas que posee, las más recientes están elaboradas de mármol. Contiene dos torres, una al norte erguida originalmente con la construcción inicial, elaborada con la Ignimbrita Cantera. La otra del lado sur que fue donada por motivo del aniversario de la Independencia de México hecha de argamasa (cal, arena y agua) (Figura 1.11).

Figura 1.11 Catedral Metropolitana de la ciudad de San Luis Potosí.

2) *Templo de Nuestra Señora del Carmen*

Esta construcción se ubica en el centro histórico de la ciudad de San Luis Potosí hacia el lado oriente de la Plaza de Armas, dentro de la Plaza del Carmen en la esquina de la calle Zaragoza con la calle Constitución.

Fue construido por la magnificencia de D. Nicolás Fernando de Torres. En el año de 1749, se puso la primera piedra por Antonio Rizo. Este templo fue ocupado por los Carmelitas, para después ser expulsados por la revolución de Ayutla. El convento se ocupó unas veces como cuartel y otras como bodega y cárcel. Fue declarado Monumento Nacional el 28 de Junio de 1936.

Su fachada es de un estilo ultrabarroco churrigueresco, construida totalmente de rocas pertenecientes a la Ignimbrita Cantera (Figura 1.12).

Figura 1.12 Templo de Nuestra Señora del Carmen, San Luis Potosí, México.

3) Caja del Agua

Se ubica sobre la calzada de Guadalupe o Avenida Juárez a la altura de la calle de Arteaga. Sin ningún fundamento histórico, se atribuyó a Tres Guerras, más el autor del diseño es el grabador y pintor José Guerra Solachi y el ejecutor Juan N. Sarabia. La Caja del Agua es considerada como el símbolo de la ciudad. Era una de las fuentes intermedias de un acueducto que surtía de agua a San Luis Potosí.

Es de estructura Neoclásica y fue puesta en servicio en Agosto de 1835, los pilares y cadenas que la rodean se colocaron en 1953 (Figura 1.13).

La estructura principal está elaborada con la Ignimbrita Cantera, al igual que su base y detalles labrados. Las columnas que le fueron añadidas posteriormente consisten de la misma roca pero se puede observar que han sido más expuestas a la humedad presente en el suelo y a los esfuerzos ocasionados por la cadena que sostienen.

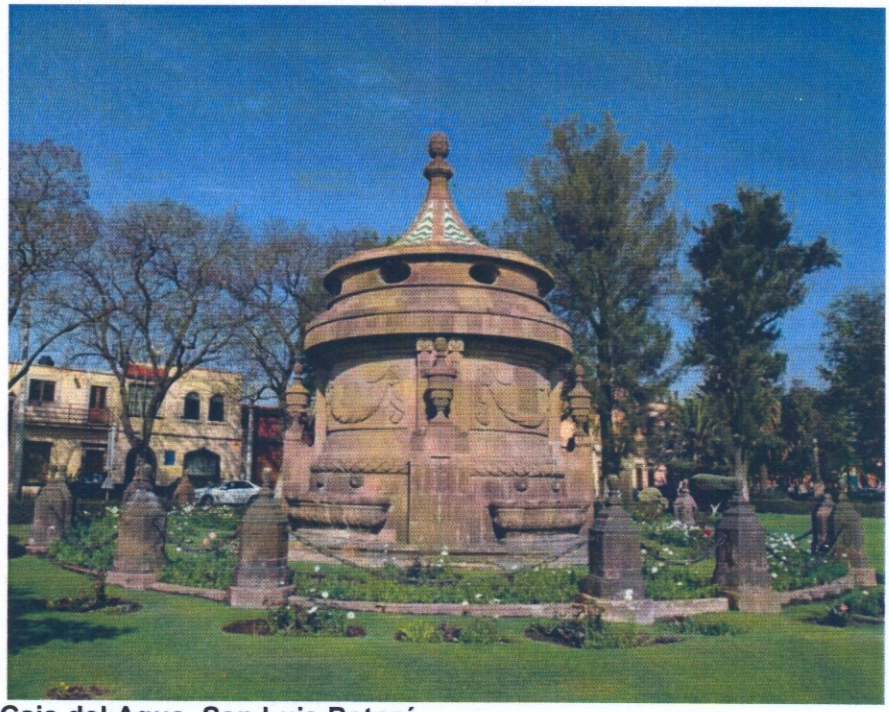


Figura 1.13 Caja del Agua, San Luis Potosí.

II. PROPIEDADES PETROGRÁFICAS

Una ignimbrita se puede definir como una roca piroclástica compuesta predominantemente por material juvenil vesiculado tal como pómez y líticos (Sparks y Walker , 1973). El termino ignimbrita se reserva para el cuerpo de roca resultante si es que este se encuentra soldado o no, así como para el conjunto de unidades de flujo producidas durante una erupción piroclástica (Smith, 1960). En ocasiones el término es utilizado en un sentido litológico, para referirse a flujos piroclásticos soldados por calor o cementados.

II.I Descripción megascópica de la Ignimbrita Cantera

Roca ígnea extrusiva piroclástica de tono leucocrático a mesocrático con colores que van de crema, rosa a café claro, es una roca de composición félsica, estructura xenolítica (fragmentos de composición variada) con poca gradación y en algunas zonas, su textura es porfirítica, con fenocristales de cuarzo, feldespato y biotita de grano mediano (3-2 mm), finos a muy finos de hipidiomorfos a alotriomorfos (Figura 2.1) sobre una matriz desvitrificada y con fragmentos de pómez.

El feldespato ocupa aproximadamente el 40% del volumen total de la roca. Sus cristales son hipidiomorfos y su tamaño es ±2 mm. Se presenta distribuido irregularmente en la muestra.

El contenido de cuarzo es de alrededor del 40% del volumen total de la roca. Se presenta en cristales hipidiomorfos a alotriomorfos, algunos como relleno en amígdalas pertenecientes a la roca. Su tamaño va de 0.5 mm a 2 mm y se encuentra disperso en toda la roca.

La biotita se encuentra en un 3%, en forma tabular euhedral color marrón, su tamaño es de alrededor 1 mm o menos.

Los óxidos de fierro y fragmentos de pómez se encuentran en 0.5-1% en la muestra, los óxidos presentan cierta alteración observable debido a su coloración rojiza. Su tamaño es menor a 1mm y están dispersos solo en algunas partes de la muestra.

La matriz ocupa aproximadamente el 17% del volumen de la roca. Es una matriz merocristalina desvitrificada con textura eutaxítica.

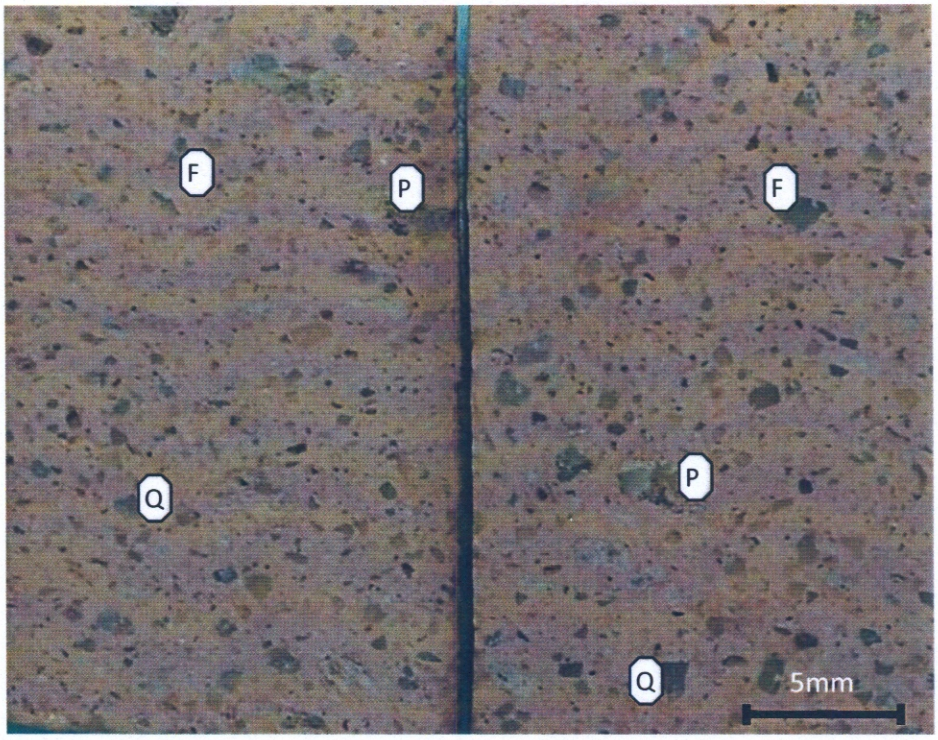


Figura 2.1 Ignimbrita Cantera en muestra de mano. Se ven los fenocristales de cuarzo (Q), feldespato (F) sobre la matriz desvitrificada con algunos fragmentos de pómez (P).

De acuerdo al diagrama QAPF (cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasa y feldespatoides) de Streckeisen (1978) para rocas ígneas de acuerdo a su composición mineral, podemos clasificar a la Ignimbrita Cantera como una roca de composición riolítica (Figura 2.2).

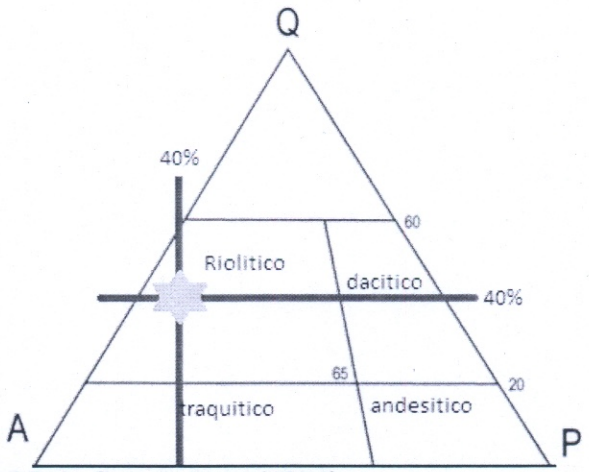


Figura 2.2 Diagrama QAPF de Streckeisen (1974).

II.II Descripción Microscópica de la Ignimbrita Cantera

Se realizaron análisis petrográficos en secciones delgadas de las muestras de roca y se estudiaron bajo microscopio de polarización, del cual se determinó lo siguiente:

Roca formada por feldespato (40%), cuarzo (40%), biotita (2%) óxidos de fierro (1%) y matriz (17%).

El feldespato potásico (sanidino) se encuentra en fenocristales subhedrales a anhedrales soportados por la matriz que están dispersos irregularmente en la roca y se puede apreciar el maclado de *Carlsbald* en ellos (Figura 2.3a). También se tienen presentes feldespatos intermedios (oligoclasa) en poca cantidad y en cristales anhedrales, presentando su macla Albita-*Carlsbald*.

El cuarzo se presenta como fenocristales anhedrales soportados en la matriz. Se encuentra de forma irregular en la roca y se puede apreciar su típica extinción ondulante (Figura 2.3b).

La biotita se observa en secciones delgadas con color en luz natural de café a marrón, se encuentra alargada y distribuida a lo largo de toda la roca emplazada en la matriz, la

biotita varía su tamaño desde microgranular a ejemplares de 0.1 5mm (Figura 2.3c,d). Los óxidos de hierro se encuentran como fenocristales tamaño 0.25 mm en poca proporción y solo en algunas partes de la muestra (Figura 2.3d).

El resto de la roca se conforma por la matriz desvitrificada en un agregado criptocristalino de minerales resultado del proceso de transformación del vidrio volcánico en donde se encuentran soportados los cristales. Los agregados criptocristalinos de la matriz están compuestos por vidrio y los cristales de feldespato, cuarzo y biotita. La porosidad se observa intercristalina en forma desordenada.

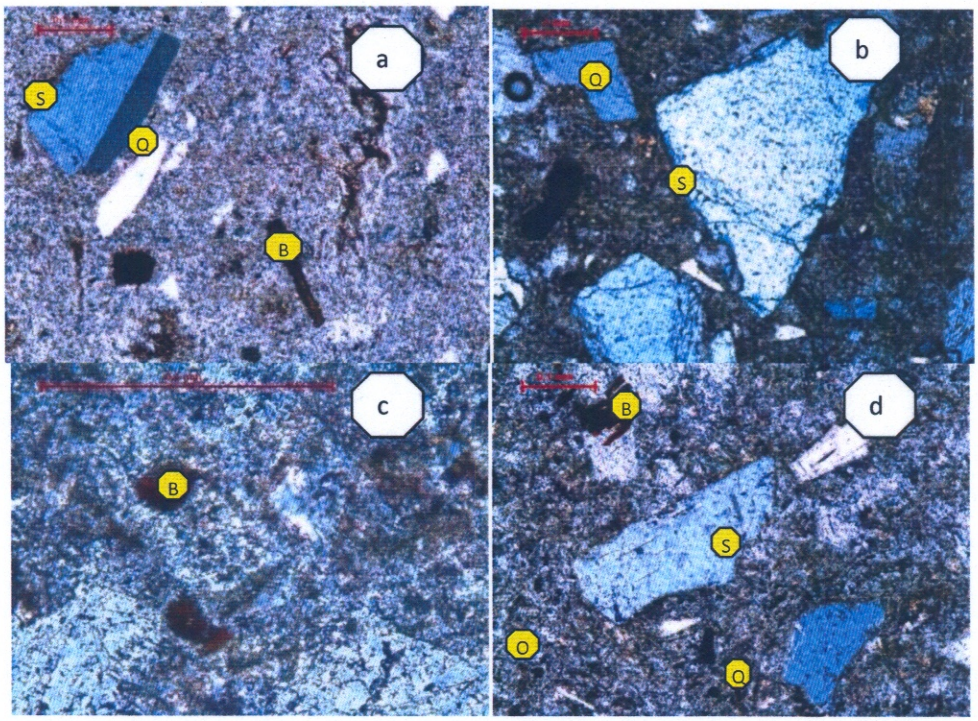


Figura 2.3 Fotomicrografía- Ignimbrita Cantera. a) Soportado sobre la matriz sanidino (S) con la macla de *Carlsbald*, biotita laminar (B), y cuarzo (Q). 10 X, L.P. b) Se observan fenocristales de sanidino junto con algunos de cuarzo soportados en la matriz desvitrificada (oscura). 5 X, L.P. c) Se puede ver biotita soportada por la matriz. 40 X, L.P. d) biotita en forma laminar, sanidino subhedral soportados en la matriz desvitrificada junto pequeños fragmentos de cuarzo u óxidos de hierro de menor tamaño(O). 10 X, L.P.

Aparece también la biotita con su forma laminada y como accesorio el óxido de hierro ilmenita del grupo de la hematita (Figura 2.5d).

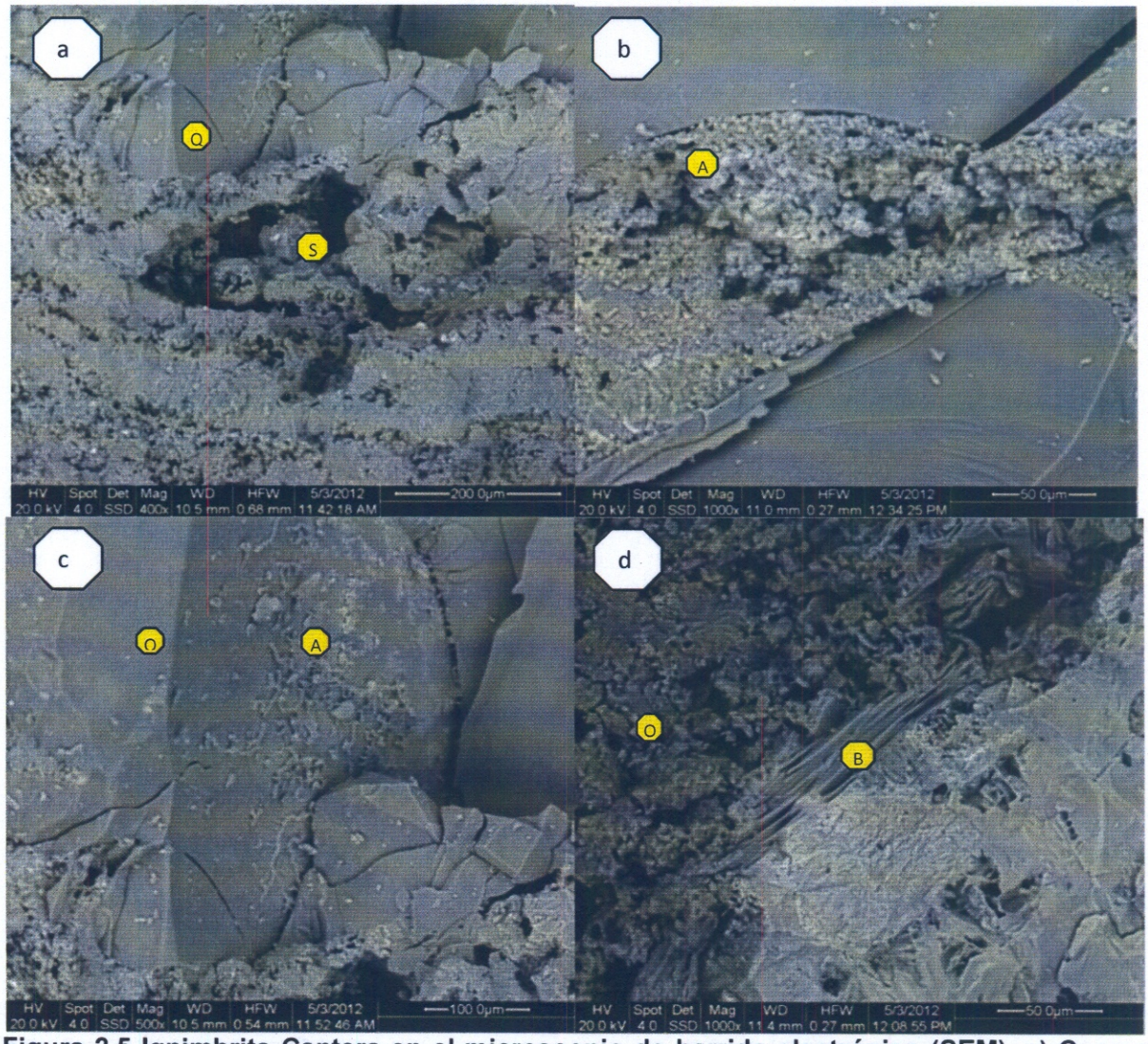


Figura 2.5 Ignimbrita Cantera en el microscopio de barrido electrónico (SEM). a) Cuarzo (Q) y sanidino (S) inmersos en la matriz de grano fino y feldespato potásico de grano fino. b) fractura de un cristal de cuarzo con matriz de relleno de grano fino con halloysita y caolinita (A). c) Cuarzo soportado por la matriz de grano fino y con presencia de halloysita y caolinita en su superficie. d) oxido de fierro (O) junto con la estructura tabular característica de la biotita (B).

PETROGÉNESIS: Roca ígnea extrusiva producto de una erupción piroclástica de composición félsica; El primer componente en cristalizar debió ser el oxido de fierro, este como producto de sublimación por la acción del vapor de agua en el cloruro de fierro, lo cual indica que se trataba de un magma deficiente en oxido ferroso. La biotita dice que el magma de formación era rico en potasio y magnesio al igual que en vapores mineralizadores. También se encontró cuarzo y sanidino como componentes comunes de rocas volcánicas, la matriz vítrea indica que la roca tuvo un rápido enfriamiento después de ser expulsada como producto de un flujo piroclástico. Los fragmentos de la matriz se encuentran consolidados y compactados pues en lámina delgada muestran un estiramiento y aplastamiento, lo que indica el grado de soldamiento. Se le puede clasificar como una toba riolítica soldada de composición ignimbrítica.

III. PROPIEDADES PETROFÍSICAS

III.I Densidad

La densidad aparente de la Ignimbrita Cantera es significativamente afectada por el espacio de poro, el valor para la densidad de matriz refleja la densidad mineral del cuarzo como uno de los principales componentes (Tabla 3.1).

NOMBRE	Densidad aparente (g/cm^3)	Densidad de matriz (g/cm^3)
Ignimbrita Cantera	2.26	2.60

Tabla 3.1 Densidades obtenidas de la roca dimensional perteneciente a la Ignimbrita Cantera.

Basándonos en la clasificación de Popp (1994) en referencia a la densidad se puede definir las rocas pertenecientes a la Ignimbrita Cantera como rocas de composición félsica.

III.II Porosidad

La Formación Cantera de acuerdo al valor de porosidad efectiva von Moos y Quervain (1948) se clasifica como una roca muy porosa y cuenta con un radio de poro promedio de 1.99 µm (Tabla 3.2) y una porosidad efectiva del 12.83%.

NOMBRE	Porosidad (Vol. %)	Radio de poro promedio (µm)
Ignimbrita Cantera	12.83	1.991

Tabla 3.2 Valor de la porosidad (%) obtenida de la Ignimbrita Cantera y el radio de poro promedio (µm).

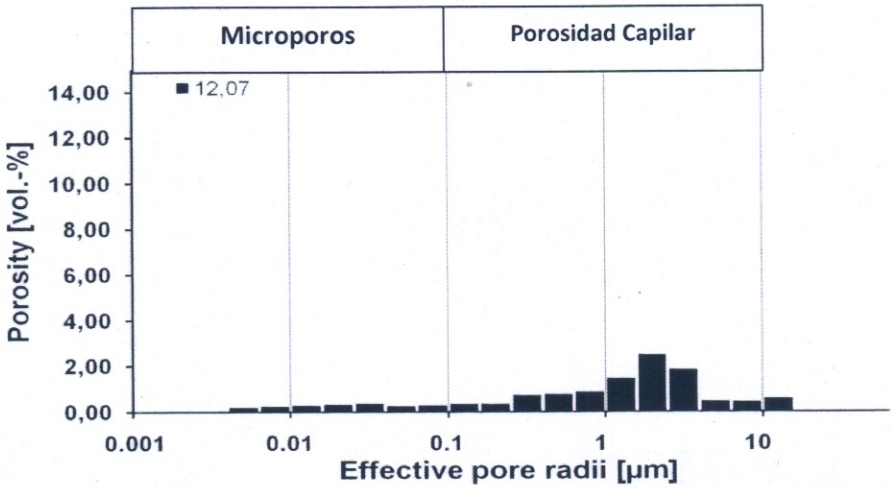


Figura 3.1 Gráfico de la distribución del radio de poro de acuerdo al porcentaje del volumen de porosidad de la roca (12.07%) en la Ignimbrita Cantera.

En cuanto a la distribución de los poros mediante a los datos obtenidos de la Ignimbrita Cantera (Figura 3.1), en las muestras de roca predomina la porosidad capilar en un 81.97% del total de la muestra, de la cual 69.48067% se encuentra en un rango de tamaño de 1-10 µm, 30.51933% en el rango de 0.1-1 µm y 7.8% en un rango de tamaño >10 µm. Sin embargo existe también algo de microporosidad en un 18.02% de total de la muestra en un rango de ±0.005 a 0.1 µm (Tabla 3.3).

NOMBRE	Distribución radio del poro (%)				
Mm	0.001-0.01	0.01-0.1	0.1-1	1-10	>10
Ignimbrita Cantera	3.18%	14.849%	25.017%	56.954%	-

Tabla 3.3 Medidas de la distribución del radio del poro de la Ignimbrita Cantera en porcentajes.

Las rocas volcánicas piroclásticas, muestran una larga variabilidad para los valores de porosidad, del 1% al 50% (12.8% para la Ignimbrita Cantera). Este gran rango en el volumen de espacio de poro es el resultado de su origen geológico y del ambiente al momento de su depósito. Siegesmund y Snethlage (2011) afirman que una posible razón es que la desgasificación de un magma de flujo rápido combinado con un rápido enfriamiento pudo resultar en una estructura pronunciada en forma de 'burbuja'. La

ignimbrita se compone principalmente por pómez fragmentada, partículas de ceniza, y fragmentos de roca, que son depositados durante una erupción explosiva y subsecuentemente son compactados y soldados entre sí. Como resultado la roca muestra una gran variedad de valores de porosidad, del 1% a cerca del 50%.

III.III Adsorción de humedad

Los valores de sorción obtenidos de la Ignimbrita Cantera a una humedad relativa del 95% fueron de 0.0061 g/cm^3. Comparando este valor con los de las tobas estudiadas por Wanja *et al.* (2012) es un valor de sorción muy bajo, esto explica la pequeña cantidad de humedad que adsorbe esta roca del ambiente.

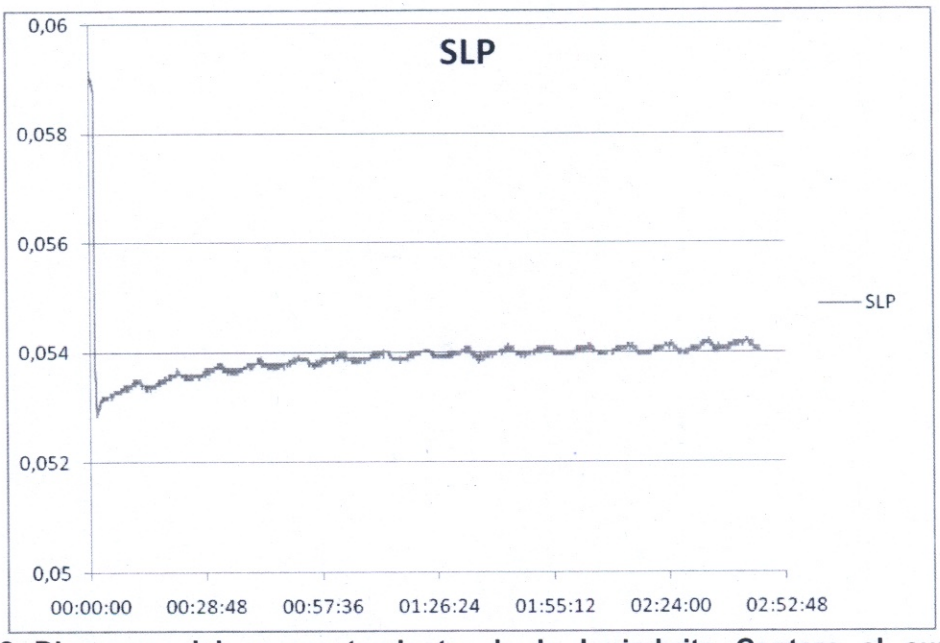


Figura 3.2 Diagrama del comportamiento de la Ignimbrita Cantera al aumentar la humedad relativa de 20% a 95%. En el eje de las abscisas tenemos el tiempo y en el eje de las ordenadas la expansión hígrica (mm/m).

Al agregar el 95% de humedad relativa la Ignimbrita Cantera se establece en ±0.053 mm/m y comienza a expandirse hasta establecerse en el rango de 0.0542 mm/m a lo

largo del tiempo de prueba, por lo que la muestra presenta una expansión hígrica de ±0.01 mm/m (Figura 3.2).

III.IV Propiedades Hígricas/Hídricas

Las muestras pertenecientes a la Ignimbrita Cantera muestran una dilatación hígrica función de la humedad relativa (HR) de 0.01 mm/m.

Los efectos de las propiedades hídricas e hígricas en la Ignimbrita Cantera se observan en laboratorio con las pruebas de transporte de agua y las propiedades de retención con los datos obtenidos de los métodos bajo presión atmosférica y condiciones de vacío (propiedades hídricas), la adsorción de humedad (propiedades hígricas).

A diferencia de las tobas estudiadas por Steindlberger (2003), la Ignimbrita Cantera cuenta con una expansión hídrica de ±0.015mm/m y su porcentaje de porosidad es mucho menor ya que se trata de una toba soldada, en cuanto a la densidad se encuentra en el rango de las tobas estudiadas.

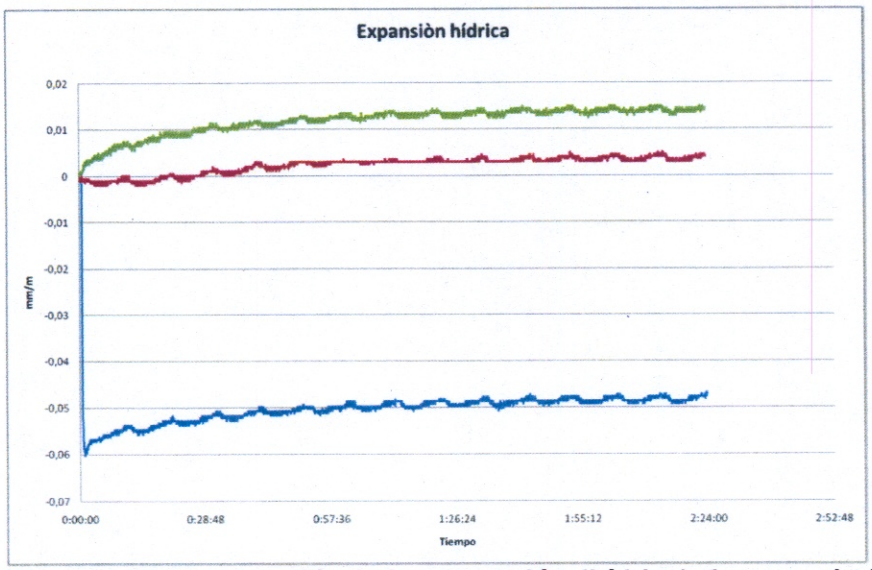


Figura 3.3 Diagrama de la expansión bajo saturación (hídrica) de agua de la Ignimbrita Cantera en sus tres direcciones x (largo) en azul, y (ancho) en rojo y z (alto) en verde. En las abscisas se muestra el tiempo y en las ordenadas la expansión en mm/m.

La expansión hídrica muestra valores de expansión no mayores a 0.02 mm/m, la base (x) a pesar de dar valores negativos en un principio, comenzó su expansión progresiva al igual que los otros dos ejes. Se observa que la expansión bajo saturación hídrica de la Ignimbrita Cantera es no mayor a ±0.015 mm/m (Figura 3.3).

III.V Propiedades de Fuerza

III.V.I Fuerza Compresiva

La fuerza compresiva en la Ignimbrita Cantera vario de 94.30 a 98.04 N/mm^2 con un porcentaje de anisotropia del 4% lo que nos indica que se trata de una roca estable y muy resistente a la compresión (Tabla 3.4).

Dirección	Ignimbrita Cantera
X	95.60
Y	94.30
Z	98.04
Anisotropía (%)	4

Tabla 3.4 Fuerza compresiva uniaxial en condiciones secas (N/mm^2= MPa) en la Ignimbrita Cantera.

Oscilan entre 50 MPa y 300 MPa pero las traquitas y especialmente las tobas muestran valores menores. La Ignimbrita Cantera de acuerdo a la clasificación de Quervain (1976) se designa como una roca medianamente dura (70-110 MPa).

III.V.II Fuerza de tensión

La fuerza de tensión para la muestra en seco de la Ignimbrita Cantera va de 9.89-10.56 MPa con un porcentaje de anisotropía del 7% y los valores para la muestra saturada en agua van de 8.23-8.71 MPa con un porcentaje de anisotropía del 5.5%, la anisotropía en la muestra de roca es baja al igual que en la fuerza compresiva, por lo que indica que la roca es estable y resistente a la fuerza de tensión. La reducción de la fuerza de

tensión repartida es del 18% (23% en X y 12% en Z) lo que nos indica la ductilidad del cuerpo de roca (Tabla 3.5), cabe recalcar que esta es propia de una roca sin orientación mineral preferente.

Tipo	Dirección	Ignimbrita Cantera
Fuerza de tensión repartida, en seco βσz (MPa)	X	10.56
	Z	9.89
	Anisotropía (%)	7
Fuerza de tensión repartida, saturada en agua βσz (MPa)	X	8.23
	Z	8.71
	Anisotropía (%)	5.5
Reducciòn de la fuerza de tensión repartida	Ø	18
Reducción (%)	X	23
Reducción (%)	Z	12

Tabla 3.5 Fuerza de tensión en condiciones de secado y de saturación de agua y la reducción de fuerza respectiva.

III.V.III Dureza y Resistencia a la Abrasión

Basándonos en la escala diagnóstica de Dureza de Friedrich Mohs (1812) la matriz de la Formación Cantera quedaría en el numero 2.5-3, ya que puede ser rayada por la uña, por otro lado existen partes de la roca en las que hay cuarzo soportado por lo tanto su dureza se clasifica del grado 7 pues no es posible rayarla más que con una placa o material más duro.

La Ignimbrita Cantera es una roca de baja resistencia a la abrasión, esto pudo ser observado desde el laboratorio en la elaboración de láminas delgadas, al estar cortando y puliendo las muestras de roca esta se disgregaba con facilidad y al intentar pulirla, se tuvo que hacer en seco ya que con el agua la matriz se desmoronaba y los minerales soportados en ella (cuarzos y feldespatos) contribuían en la abrasión de la muestra haciendo imposible pulirla.

III.VI Velocidades de onda ultrasónicas y deterioro

Las velocidades experimentales obtenidas en el laboratorio por el método de transmisión de pulsos para la Ignimbrita Cantera se muestran en la Tabla 3.6, en donde se muestra la superficie del eje recorrida (cm) y la velocidad (km/s) a la que recorrió la onda (Vp) de superficie.

Superficie del eje		Velocidad
X	6.95 cm	3.861 km/s
Y	6.70 cm	3.84 km/s
Z	6.69 cm	3.823 km/s

Tabla 3.6 Superficie del eje y su velocidad obtenidas del método de transmisión de pulsos en la Ignimbrita Cantera.

El efecto del deterioro en las ondas compresionales de velocidad fue dado para rocas volcánicas por Arikan *et al.* (2007) (Tabla 3.7), así que las velocidades experimentales de la Ignimbrita Cantera obtenidas mediante el método de transmisión de pulsos nos muestran que las muestras se encuentran frescas a ligeramente deterioradas, lo cual tiene sentido ya que son muestras frescas obtenidas de su lugar de origen y no de los edificios históricos en donde la roca ya presenta deterioro.

ROCAS VOLCÁNICAS FÉLSICAS	
Grado de deterioro	Vp (km/s)
No deteriorada (fresca)	3.35-5.20
Ligeramente	2.49-4.66
Moderadamente	2.00-3.44
Alta	1.39-2.97

Tabla 3.7 Clasificación Vp-estructural de deterioro para rocas volcánicas de acuerdo a su velocidad experimental de Arikan *et al.* (2007).

IV. DESGASTE Y DETERIORO EN LA ROCA

La Ignimbrita Cantera a pesar de ser una roca de construcción duradera, presenta deterioro debido a diferentes factores y procesos que la afectan. Un mismo patrón de desgaste puede resultar por distintos mecanismos de deterioro mientras que cualquier mecanismo específico puede resultar en diferentes tipos de patrones, dependiendo del sustrato en cuestión.

IV.I Deterioro por procesos mecánicos

El daño mecánico ocurre cuando la roca está sujeta a una carga o esfuerzo que esta por encima de su resistencia mecánica. Esto ocurre por factores externos tales como crecimiento de vegetación, gravedad, etc. Hay muchos procesos envueltos en el deterioro de la roca por medio de esfuerzos mecánicos, pero el daño observable es el resultado de la interacción de estos.

Figura 4.1 Poste perteneciente a la Caja del Agua con deterioro mecánico presente debido a la acción de las cadenas que le fueron sujetas.

La matriz en muestra de mano de la Ignimbrita Cantera es inestable en contacto con el agua, esto se debe a la estructura de su matriz desvitrificada que soporta a cristales de

cuarzo, feldespatos, etc. Ya que al entrar en contacto con el agua más un esfuerzo aplicado (al hacer un desbastmiento o corte) la matriz desvitrificada que actúa de soporte tiende a colapsar y volverse inestable. La presencia de los cristales junto con la matriz disgregada hace que se presente un fenómeno de micro licuefacción en la roca que es lo que hace que se desmorone.

Un claro ejemplo de un deterioro mecánico observado en edificios históricos es por placas que les fueron insertadas, clavos que sostienen redes de protección, cadenas para delimitar perímetros como las observadas en la caja del agua, estas han llegado a dañar significativamente la roca que conforma los postes debido al peso que ejercen sobre el soporte, es muy evidente el agrietamiento presente (Figura 4.1).

IV.II Ciclos térmicos

Una fuente de daño mecánico es el cambio dimensional al que las rocas y edificios se someten inducido por ciclos térmicos.

Los cambios de temperatura (el calentamiento y enfriamiento constante de la roca) eventualmente la llevaran a su deterioro a través del tiempo. Puede generarse una expansión por el calentamiento y un esfuerzo residual derivado de esto, este último puede permanecer en la roca una vez que esta regresa a su temperatura normal, lo que provoca la formación de un deterioro a largo plazo.

El coeficiente de expansión de las rocas resulta de los minerales presentes en ellas. Se puede decir que el ciclo térmico de entre 20°C y 90°C induce más o menos deterioro en la mayoría de las rocas (Siegesmund y Snethlage, 2011).

El deterioro comienza por una etapa inicial de insolación que conduce a la pérdida progresiva de cohesión a lo largo de los límites de los granos (Siegesmund *et al.,* 1999, 2000) causada por los diferentes coeficientes de expansión térmica de los minerales formadores de roca durante el calentamiento o enfriamiento (Fredrich y Wong 1986). La tensión inducida resultante, esfuerzos compresivos o de cizalla a lo largo de los limites de grano pueden ser lo suficientemente largos para causar fallamiento a lo largo de los precursores microestructurales, tales como fracturas y planos de clivaje (Sage, 1988) que en este caso se observan como deterioros de separación como descamación, desincrustación, fragmentación y en un caso avanzado de estos una pérdida de material (Figura 4.2).

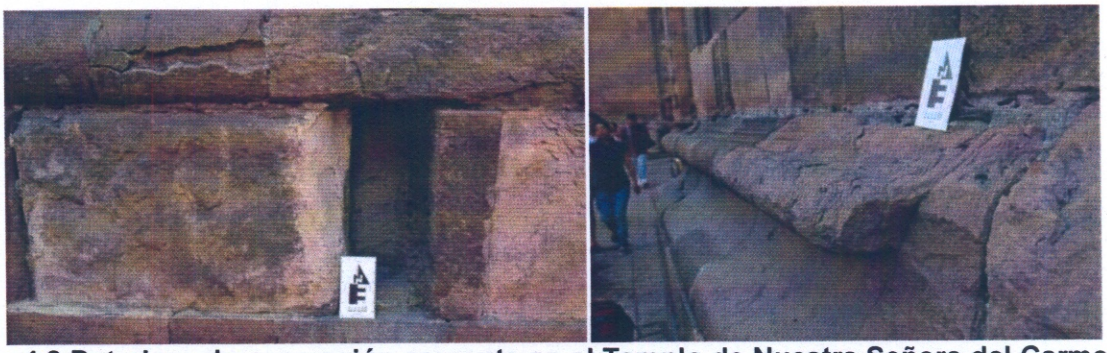


Figura 4.2 Deterioro de separación presente en el Templo de Nuestra Señora del Carmen. En la base del edificio es donde mayor deterioro se presenta, el desgaste es evidente sobre todo del tipo de desintegración, descamación y desincrustación.

También se puede atribuir a la deformación como patrón de deterioro de los ciclos térmicos. Las rocas que contienen minerales hidratados también son susceptibles a los ciclos térmicos por la pérdida de hidratación en estos minerales, en la Ignimbrita Cantera se tiene a las micas como estos minerales hidratados.

IV.III Hinchamiento Hígrico e Hídrico

Todos los materiales porosos absorberán vapor de agua de la atmosfera y tenderán a expandirse. Aunque esta expansión hídrica en la roca no es muy notable como en otros materiales, aun así esta será afectada por el ciclo inevitable al que está sujeto por los cambios normales en la humedad relativa del aire.

Siegesmund y Snethlage (2011) explican que el vapor de agua se difundirá en un material poroso y será adsorbido en la superficie de poro. Inicialmente, una capa monomolecular de agua desarrollará, debido a que su afinidad a la superficie del mineral no se comporta como agua 'normal', generalmente referida como agua 'aparente'. Si mas vapor de agua está disponible, una segunda capa se formará y después una tercera. Si los poros son muy pequeños, deberán estar totalmente llenos con agua por la condensación capilar; la expansión será de preocupación práctica sólo cuando el agua se comporte como agua normal (aparente, no adsorbida).

Los poros en la roca tienen muchas formas y estas influirán en el comportamiento del agua en ella. La Ignimbrita Cantera cuenta con poros capilares y microporos.

Para materiales que no contienen arcillas u otros filosilicatos, la expansión hígrica ha sido atribuida a la presión disociada y corresponde a las diferencias en presión dentro de una película de agua entre dos superficies y la presión de la fase aparente (Weimann, 2001).

El hinchamiento hígrico incrementa al disminuir el radio de poro promedio y con una microporosidad creciente.

El constante cambio de volumen provocado por la expansión hídrica e hígrica, provoca que la roca se vuelva inestable y genere un deterioro de separación a largo plazo. La Formación Ignimbrita a pesar de su poca expansión hídrica (±0.015 mm/m) e hígrica (±0.91 mm/m) ha presentado daños relevantes en su superficie a lo largo del tiempo, tales como decoloración, separación de partes, perdida de partes, colonización biológica, etc.

IV.IV Deterioro por procesos químicos

Los procesos químicos dañinos se refieren a la disolución o alteración de los constituyentes minerales de los materiales de roca por reacciones químicas. Disolución mineral en rocas de construcción está muy relacionada a la polución atmosférica y la deposición ácida.

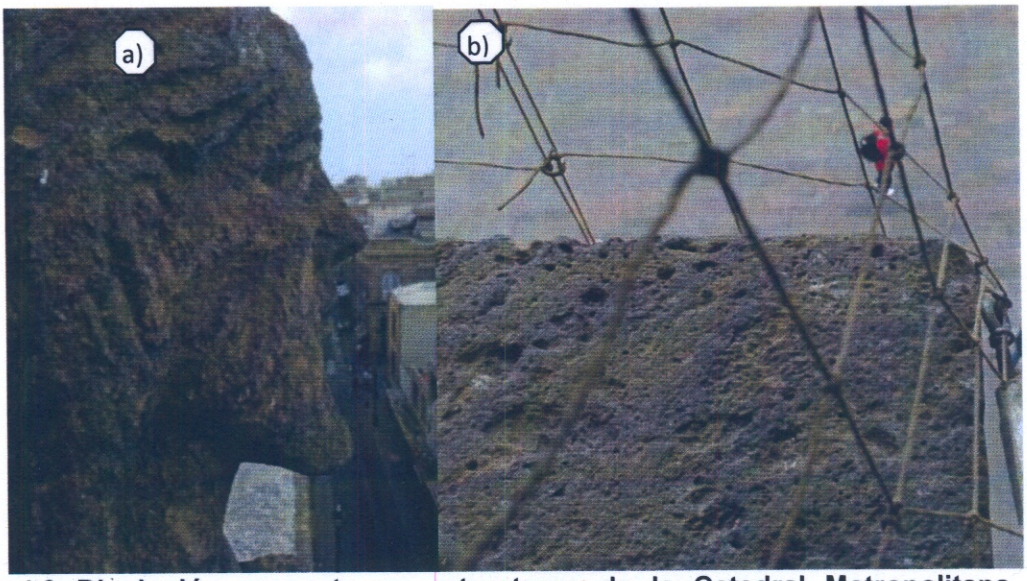


Figura 4.3 Disolución presente en estructuras de la Catedral Metropolitana. a) las estatuas labradas con la Ignimbrita Cantera presentan erosión en forma de picaduras, derivada de la acción química del agua y material fecal de las aves en ellas. C) Partes de la torre norte presentan un deterioro de desintegración puntiforme debido a su exposición a fenómenos meteóricos y a organismos biológicos.

La contaminación atmosférica y las precipitaciones meteóricas ácidas vienen en contacto directo con la roca y sus componentes inicialmente desde la parte externa para penetrar hacia la parte interna. Otra forma de que una solución ácida entre en contacto directo con la roca es por medio del material fecal de animales (generalmente aves) que se encuentran sobre la roca, en algunos de los monumentos incluso llegan a vivir en partes de la fachada y el techo (Figura 4.3) Este tipo de daño ocasiona un deterioro de separación en forma de desintegración o como perdida de material en forma de picaduras.

IV.IV.I Reacciones de Disolución mineral

Muchos de los minerales presentes en las rocas de construcción son termodinámicamente inestables a las condiciones superficiales de la tierra. Las reacciones de disolución mineral en rocas de construcción envuelven el ataque de agua y su acidez asociada. El ataque del ion H^+ en los componentes minerales causa su disolución y la formación de productos de deterioro.

De acuerdo con Siegesmund y Snethlage (2011) la tasa de reacciones de disolución mineral depende de:

1) La cantidad y tiempo de contacto del agua líquida disponible en las superficies minerales.
2) La solubilidad del mineral en cuestión.
3) La disponibilidad de acidez (el PH de la solución acuosa en contacto con la superficie mineral).

La mayor fuente de agua líquida en rocas de construcción es la precipitación y el daño causado por las reacciones de disolución mineral a menudo muestran un patrón distinto siguiendo la exposición a las precipitaciones directas, lluvias torrenciales y aguas superficiales de escorrentía. Muchos de los minerales formadores de roca muestran una muy baja pero finita solubilidad en el agua. En los edificios históricos la cantidad de infiltración de agua de lluvia y las veces de contacto a lo largo de los siglos son suficientemente largos que las reacciones de disolución mineral pueden causar un daño significativo que se observa como deterioro.

El dióxido de carbono (CO_2) es una fuente mayor de acidez en las aguas naturales y ésta la acidez la mayor responsable del deterioro natural de la roca en una escala de tiempo geológico, esta acidez se encuentra presente en tasas más altas de las normales por las aportaciones de la contaminación derivada de actividades humanas.

La deposición acida es la mayor fuente de H^+ en los materiales de construcción y aumenta significativamente las tasas naturales de reacciones de disolución mineral. Aquí, la deposición acida se refiere a ambas deposiciones húmedas, la precipitación acida, y la deposición seca de contaminantes gaseosos y de partículas dentro de las películas de agua o las superficies minerales. En la lluvia ácida los valores de Ph son significativamente bajos y pueden alcanzar valores de 4 durante la primera precipitación. En neblina acida incluso pueden ocurrir valores menores de Ph de 2-4, porque habiendo menos agua disponible la solución se encuentra más concentrada.

Sin embargo, en años recientes un continuo incremento del Ph en el agua de lluvia ha sido observado en Norte América y Europa.

La razón de que la Ignimbrita Cantera sea utilizada y aplicada efectivamente como material de construcción a pesar de presentar este fenómeno, es que gracias a su grado de soldamiento los fragmentos de vidrio que componen su matriz se encuentran muy bien consolidados, compactados y por lo tanto presenta propiedades muy adecuadas para ser utilizada incluso para almacenar agua. (Figura 4.4).

Figura 4.4 Caja del Agua, S.L.P. es visible la separación, perdida de partes y disolución del material debido a la disolución ocasionada por el contacto con el agua.

IV.V Biodeterioro

Las rocas están pobladas por microorganismos en todas las regiones climáticas del planeta (Warscheid y Braams 2000). Los organismos pueden ser epilíticos (viven en la superficie de la roca) o endolíticos (viven en los poros y fisuras de la roca).

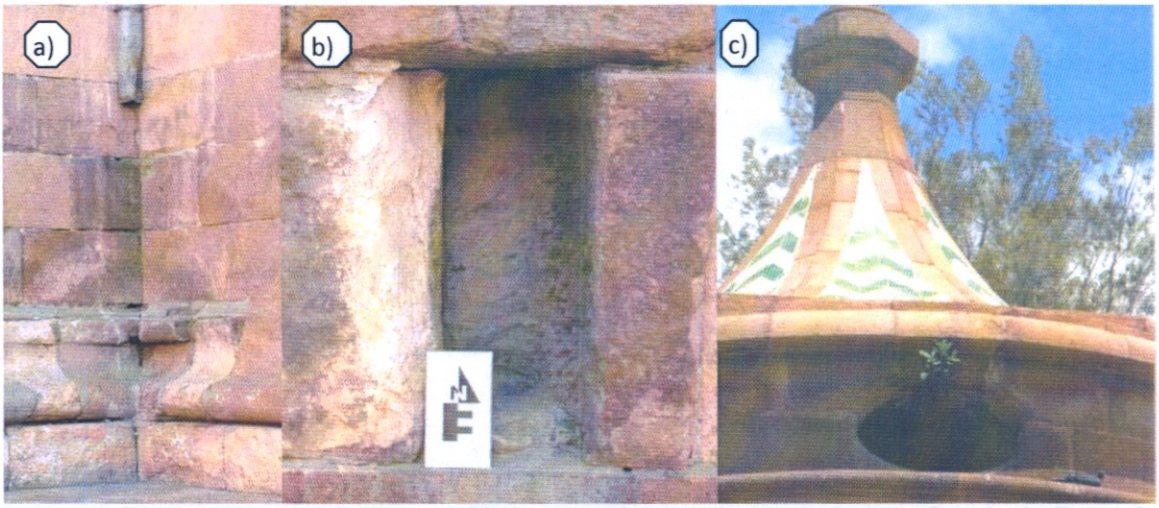


Figura 4.5 Biodeterioro visible en edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí. a) biopatina provocada por la presencia de tuberías del Templo de Nuestra Señora del Carmen. b) colonización biológica presente en la base donde desagua la tubería, Templo de Nuestra Señora del Carmen. c) Presencia de plantas dentro de la Caja del Agua y de aves en su parte exterior.

Una biopatina se refiere a las modificaciones cromáticas estéticas del material causadas por el crecimiento de algunos organismos pero sin un deterioro superficial visible (Figura 4.5a). Por otro lado, la tinción que pueda prevalecer en la roca después de que los organismos biológicos hayan desaparecido se le llama decoloración biogenética (Figura 4.5b). El factor decisivo para el crecimiento microbiano es la disponibilidad de agua. Los organismos involucrados en el biodeterioro son:

- Bacterias
- Hongos
- Líquenes
- Plantas (Figura 4.5c)

Raramente los procesos envueltos en el deterioro de la roca actúan solos en la naturaleza y solo observamos el daño que es el resultado de su interacción.

V. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE DETERIORO EN LA ROCA DE CONSTRUCCIÓN

Fitzner *et al.* (1995) crearon una caracterización clara del tipo de alteración en materiales pétreos propuestos para describir el fenómeno de los cambios en la superficie de la roca producidos por procesos de deterioro. Desarrollaron un sistema de cuatro grupos básicos de formas de deterioro que se puede ver en la tabla 5.1.

Agrietamiento y deformación	Separación	Características de pérdida de material	Decoloración y depósito	Colonización biológica
Agrietamiento	Abrasión	Alveolización	Costra (costra negra, costra de sal)	Liquen
	Relleno	Erosión (erosión diferencial: perdida de los componentes de la matriz; redondeo, rugosidad)	Depósito	Musgo
	Desintegración (Desmoronado: granular. Desintegración como: en pulverizado, arenado, azucarado)	Daño mecánico (daño por impacto, corte, rasguño, abrasión)	Decoloración (coloración, blanqueo, área de humedad, tinción)	Moho
	Fragmentación (astillado)	Micro Karst	Eflorescencia	Plantas
	Descamación	Perdida de partes (huecos)	incrustación	
	Desincrustación (hojuelamiento, desincrustación de contornos, separación en placas)	Perforación	Película	
		Picaduras	Aspecto brilloso	
			Graffiti	
			Patina	
			Ensuciamiento	
			subfloresencia	

Tabla 5.1 Grupos básicos de formas de deterioro (modificado de Fitzner *et al.*, (1995)).

De acuerdo a la anterior clasificación se describen los ejemplos representativos de los tipos de deterioro que sean mas evidentes en los edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí.

V.I Agrietamiento

Ejemplos de este deterioro los podemos observar la pared de la fachada de la Catedral Metropolitana de S.L.P. donde se puede apreciar el previo deterioro de separación que dio origen al agrietamiento (Figura 5.1a). También un claro ejemplo se encuentra en la base del Templo de Nuestra Señora del Carmen con agrietamiento derivado de la separación de la superficie de la roca (Figura 5.1b). En los postes pertenecientes a la Caja del Agua, S.L.P. se pueden ver claramente las grietas formadas por la carga de las cadenas que fueron incrustadas (Figura 5.1c).

Figura 5.1 Agrietamiento en edificios históricos compuestos por la Ignimbrita Cantera. a) Catedral Metropolitana. b) Templo de Nuestra Señora del Carmen. c) Caja del Agua.

V.II Separación

Ejemplos de separación pueden observarse en la base de la torre sur de la Catedral Metropolitana que presenta una desincrustación en forma de hojuelamiento (Figura 5.2a). También en los postes de la caja del agua debido a la humedad se presenta una desintegración en forma de desmoronado (Figura 5.2b). En la base de la Caja del Agua es común encontrar desprendimiento en forma de descamación producto de la humedad del suelo (Figura 5.2c).

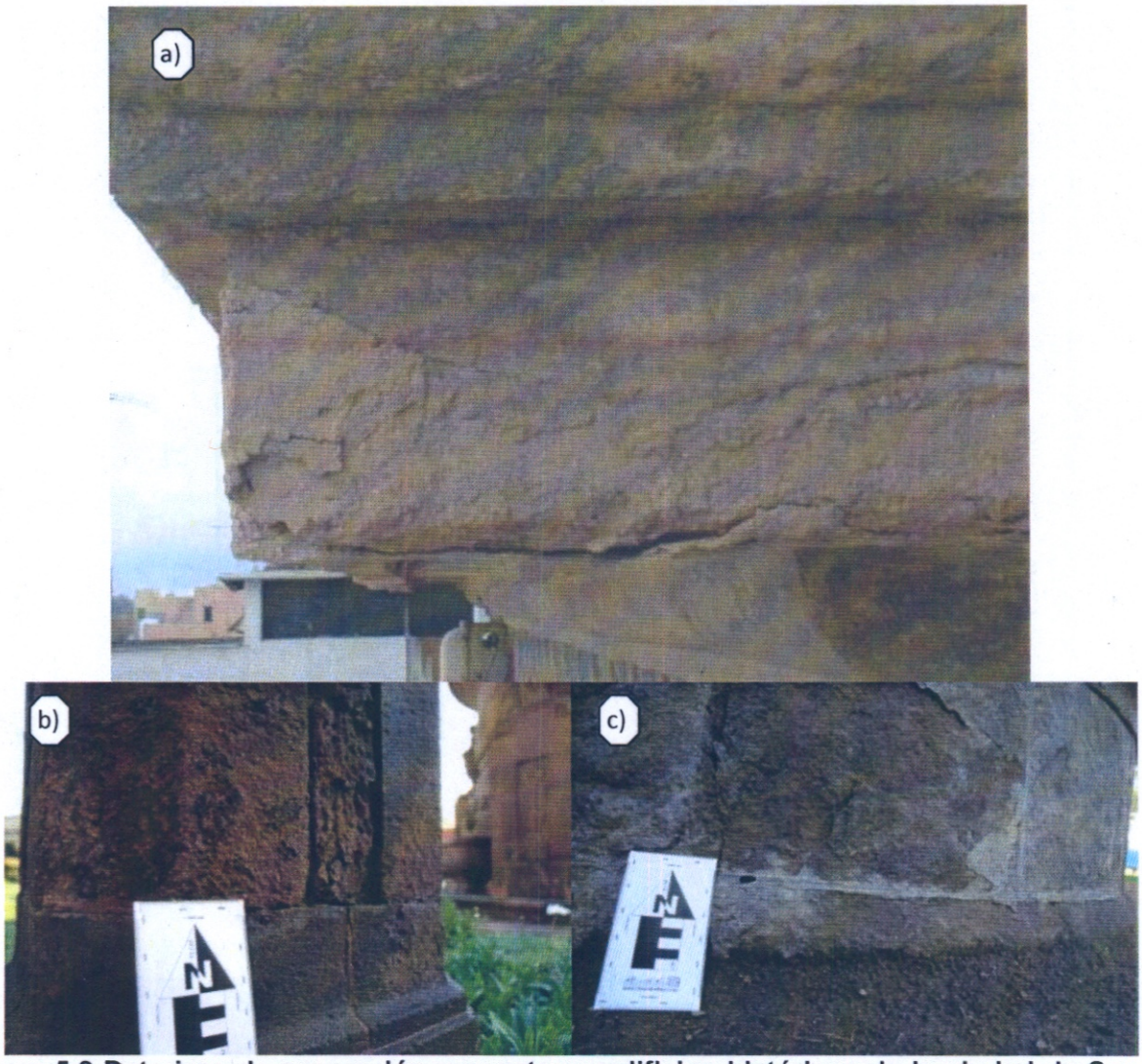


Figura 5.2 Deterioro de separación presente en edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí conformados por la Ignimbrita Cantera. a) Base de la torre sur de la Catedral Metropolitana b) Poste de la Caja del Agua c) Base de la Caja del Agua.

V.III Pérdida de Material

La perdida de material se puede observar en los pilares de la torre norte de la Catedral Metropolitana que presenta daño mecánico posiblemente debido a una pieza de soporte que le fue retirada recientemente también cuenta con picaduras en la superficie de la roca (Figura 5.3a). También en las figuras que conforman los acabados de la Catedral Metropolitana se presenta erosión que ha causado el redondeo de sus rasgos, se puede apreciar también que se han desarrollado picaduras (Figura 5.3b). En la caja del agua debido al contacto directo con el agua, actualmente se observa la pérdida de partes por la acción en las tinajas (Figura 5.3c). En los postes de la Caja del Agua se tiene una evidente perdida de partes que posiblemente se deba a la acción antropogénica en conjunto de los agentes del deterioro.

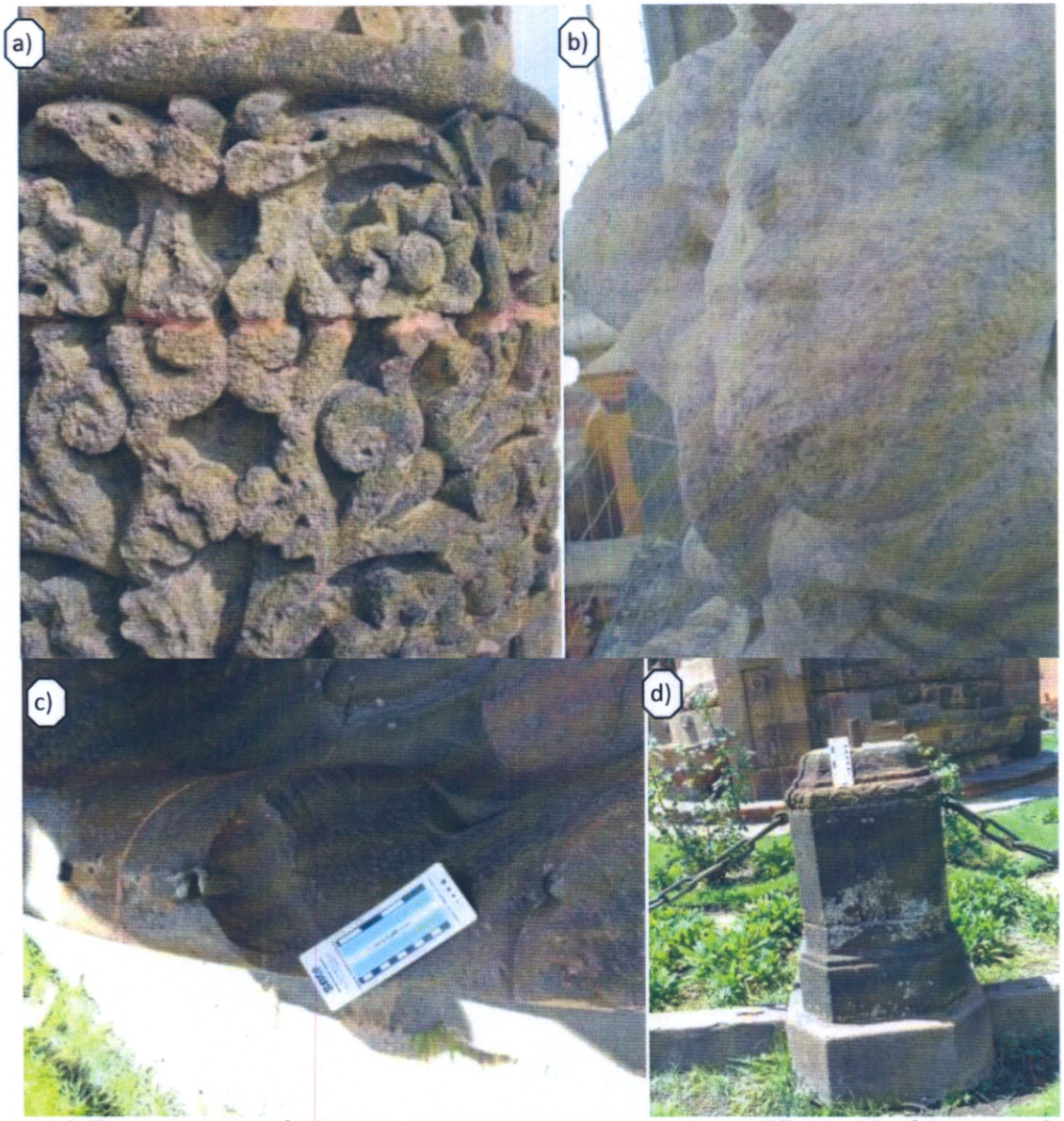


Figura 5.3 Deterioro de pérdida de material presente en los edificios históricos de San Luis Potosí conformados por la Ignimbrita Cantera. a) Pilar de la torre norte de la Catedral Metropolitana. b) Acabado de ángel de la Catedral Metropolitana. c) Tinajas de la Caja del Agua. d) Postes de la Caja del Agua.

V.IV Decoloración y depósito

La decoloración presente en la Catedral Metropolitana en la base se debe a la acción antropogénica en conjunto con la humedad del suelo (Figura 5.4a). En las partes altas, sobre todo en las columnas pertenecientes a la torre norte es claro el depósito oscuro en la superficie (Figura 5.4b). En la base del Templo de Nuestra Señora del Carmen tenemos diferentes tonos en las decoloraciones de la roca como parte de la contaminación en partícula que se presenta en esa zona, humedad y la interacción del ser humano cerca del templo (Figura 5.4c). Los postes de la Caja del Agua que tienen un evidente depósito de partículas oscuras las cuales al rellenar los poros superficiales hacen que la roca luzca más oscura, la diferencia de color en la parte de en medio es clara debido al deterioro ahí presente que exhibe roca fresca (Figura 5.4d).

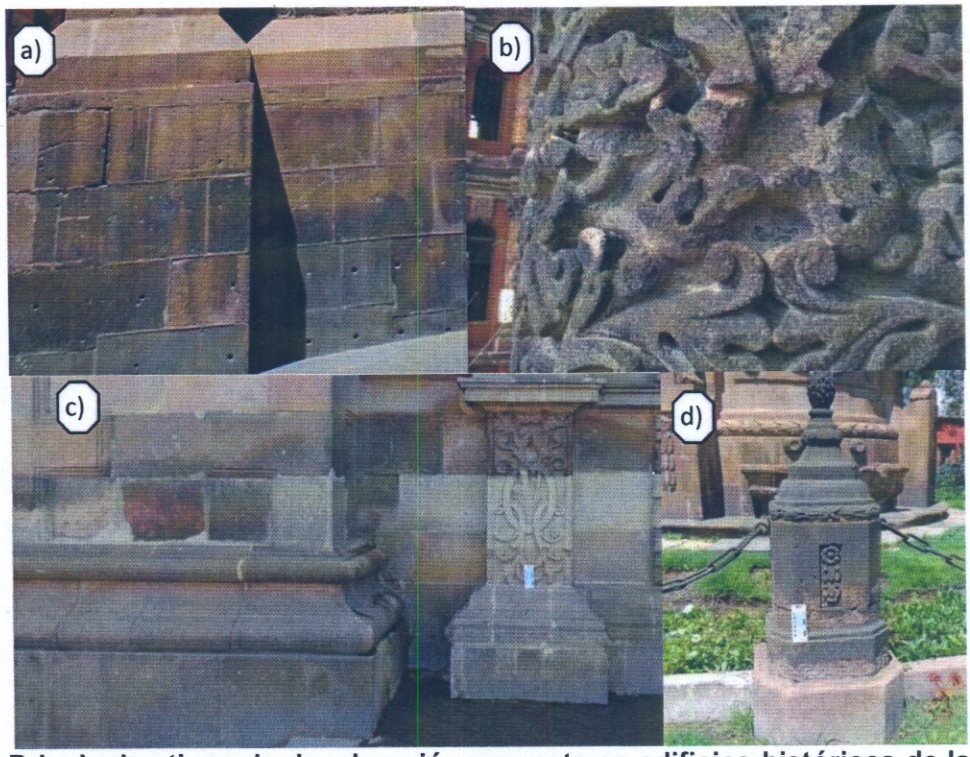


Figura 5.4 Principales tipos de decoloración presente en edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí construidos por la Ignimbrita Cantera. a) Columna de la Catedral Metropolitana b) Base de la Catedral Metropolitana. c) Base de la fachada del Templo de Nuestra Señora del Carmen. d) Poste de la Caja del Agua.

V.V Colonización Biológica

Se puede observar como dentro de la Caja del Agua se encuentran plantas que se han adaptado para crecer dentro y también se puede apreciar la presencia de aves sobre la estructura. Las plantas que se han desarrollado en el interior son el resultado de la humedad que hay dentro del monumento (Figura 5.5a). Los postes de la Caja del Agua al estar en contacto con el suelo y la humedad llegan a presentar hongos que se incrustan sobre el deterioro existente ya que en muchas ocasiones la porosidad y humedad hacen las condiciones adecuadas para que estos se desarrollen (Figura 5.5b). En la fachada del Templo de Nuestra Señora del Carmen no se cuenta con una malla de protección como en la Catedral Metropolitana por lo que es común ver muchas aves anidando sobre ella (Figura 5.5c).

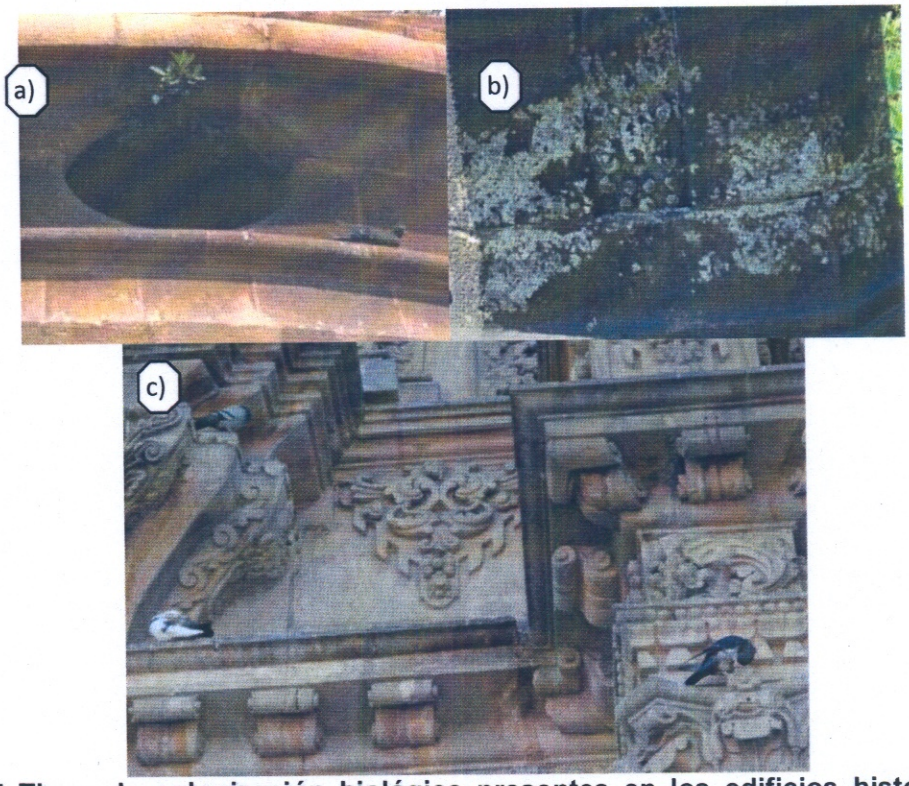


Figura 5.5 Tipos de colonización biológica presentes en los edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí conformados por la Ignimbrita Cantera. a) Caja del Agua. b) Postes de la Caja del Agua. c) Fachada del Templo de Nuestra Señora del Carmen.

VI. INVENTARIO Y USO DE LA FORMACIÓN CANTERA EN EDIFICIOS HISTÓRICOS DEL CENTRO DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ

Para poder identificar en las fotografías los distintos tipos de deterioro presente en los edificios históricos se utilizaron diferentes tonos de colores para su clasificación, dependiendo del grado del deterioro (sobre todo en el deterioro por decoloración) se utilizara otra escala de intensidad de deterioro con valores del 5% (poco deteriorada) al 100% (muy deteriorada).

El deterioro marcado con esta clasificación de colores es tan solo el más evidente en la roca, no corresponde al deterioro total con el que cuenta.

VI.I Deterioro Catedral Metropolitana

De los monumentos estudiados la Catedral Metropolitana fue la que en mejores condiciones se encontró, ha tenido varías remodelaciones recientes (por el bicentenario de la independencia de México) lo cual también influye en su buena conservación. En cuanto a las torres (Figura 6.1a), la del lado sur es más reciente y no está compuesta por la Ignimbrita Cantera si no por argamasa, por lo tanto solo nos centraremos en la torre original la cual es reconocible a simple vista por no encontrarse pintada.

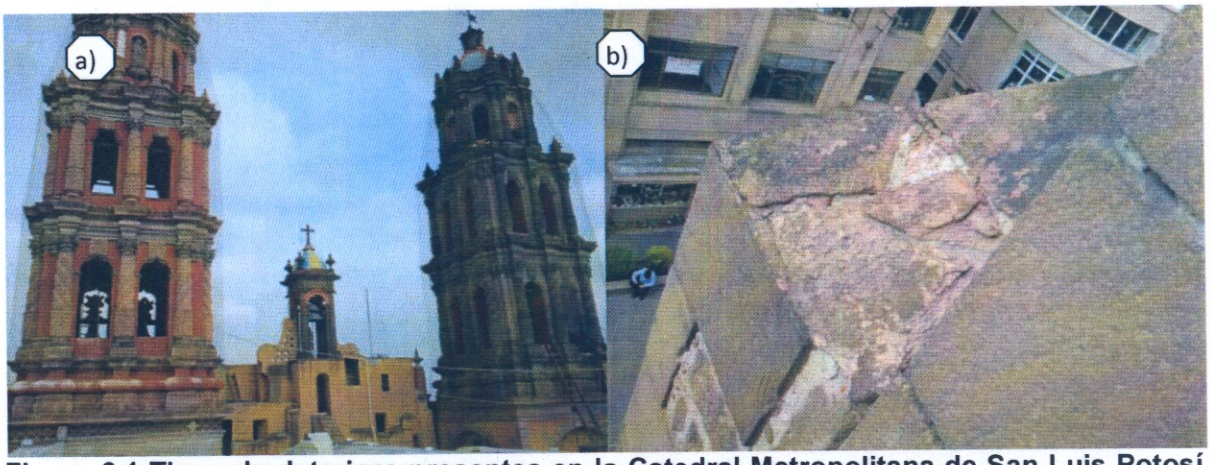


Figura 6.1 Tipos de deterioro presentes en la Catedral Metropolitana de San Luis Potosí. a) torre norte (lado derecho) construida con la Ignimbrita Cantera y torre sur (lado izquierdo) construida posteriormente de argamasa. b) se puede ver la separación de algunos fragmentos de roca debido al deterioro y exposición de la roca a fenómenos atmosféricos.

La fachada se encuentra compuesta por bloques de la Ignimbrita Cantera, al igual que el bisel, muchos de los acabados como estatuas y figuras, los escalones del techo y las torres. Partes de la torre norte han sido resanadas y reemplazadas junto con las campanas originales, por lo que en general se encuentran en buen estado.

En los biseles se presenta principalmente una separación en forma de descamaciones y desincrustaciones hojueladas (Figura 6.1b). En las partes expuestas horizontalmente (pisos, escalones en su parte superior, bardas en la superficie, etc.) así como en las torres se observa una erosión puntiforme y sus cavidades características por la pérdida de material, lo que nos da una superficie muy rugosa a comparación de la que originalmente se tenía. En la base principalmente se observa una decoloración de costra obscura que contrasta con las partes que ya fueron desprendidas y muestran roca más fresca (Figura 6.2).

Figura 6.2 Clasificación por colores de los tipos de deterioro presentes en la Catedral Metropolitana. a) Lado oriente, se observa con morado el decoloro más intenso en las partes bajas, con amarillo se muestra separación de tipo de desintegración en bloques de la ignimbrita. b) fachada frontal, presenta en amarillo separación por desincrustación y descamación en forma de hojuelamiento. En morado se muestra decoloración muy evidente en la roca y de rojo se muestran la pérdida de material mecánicamente.

La base de la Catedral Metropolitana es la parte más expuesta al fenómeno de humedad del suelo, por lo tanto se pueden ver manchones de humedad cercanos al piso y desincrustaciones de la roca en forma de hojuelas siendo las mayores de hasta ± 6 cm 50 cm. Algunos de los detalles muestran desintegraciones de la roca que se deben a la acción humana presente ya que las partes bajas interactúan con la gran cantidad de personas que pasan a diario por la catedral. También es fácil de observar sobre todo en los costados de pilares una costra de tono oscuro que se debe a la transformación superficial del sustrato pétreo mediante agentes externos y en algunas zonas suele resaltar más gracias al lajamiento existente. Observamos también fracturas y pérdida de partes debido al daño mecánico al cual se encuentra expuesto el edificio. Algunas de estas fracturas y pérdidas en los acabados se encuentran resanadas con argamasa (Figura 6.3).

En las partes que dan a la fachada principal se colocó una malla para proteger a la construcción de aves y otros animales, y fue clavada en la roca lo que ha venido a provocar daño mecánico por la tensión ejercida por la red, esto puede parecer insignificante pero a largo plazo puede contarse como agente del deterioro que sufre la roca de construcción.

Figura 6.3 Deterioro presente en la fachada de la Catedral Metropolitana. a) El decoloro marcado en morado es muy evidente, en la base este es más intenso. En rojo se marca la pérdida de partes en forma de perforaciones y picaduras, se encuentra presente en muchos bloques de la roca. b) En la fachada principal nos encontramos con separaciones grandes (amarillo) en forma de descamaciónes y desincrustaciones las cuales hacen que la roca tenga perdida de partes muy significativas ya que la parte exterior se desgasta más rápido. En morado marcamos la muy evidente decoloración en comparación con la parte desprendida que muestra roca más fresca. En rojo se ven los pedazos que ya han sido desprendidos y algunos han sido resanados (gris). Se pueden ver pequeños agrietamientos (azul) que son producto del deterioro de separación.

El deterioro en la torre norte se comienza a ver principalmente en las esquinas de las bases (Figura 6.4a), ya que muchas se encuentran redondeadas y en desincrustación hojuelada debido a la erosión existente que provoca que se desprenda poco a poco. En sus pilares se puede apreciar un deterioro en forma de picaduras producto de una erosión puntiforme que genera cavidades en el material pétreo, estas se ven claramente cubiertas de una costra oscura debido al depósito de suciedad ajena a la roca.

A lo largo de toda la parte alta de la fachada nos encontramos con estatuas fabricadas con la Ignimbrita Cantera (Figura 6.4b), resaltando principalmente las figuras de los doce apóstoles pertenecientes a la construcción original. El estado de las figuras no es muy bueno y en ellas se puede apreciar desgaste de separación en forma de descamación, desincrustación (hojuelamiento) y desmoronado granular y al igual que en las columnas de la torre una erosión puntiforme cubierta por decoloración de costra obscura. En general se encuentran muy alteradas y se llega a observar claramente su exposición a fenómenos biológicos como el excremento de las aves que provocan un biodeterioro. Se encuentran también otras estatuas de ángeles y cruces las cuales presentan un grado avanzado de erosión, perdida de partes, y abrasión. Muchas de estas han sido resanadas con argamasa.

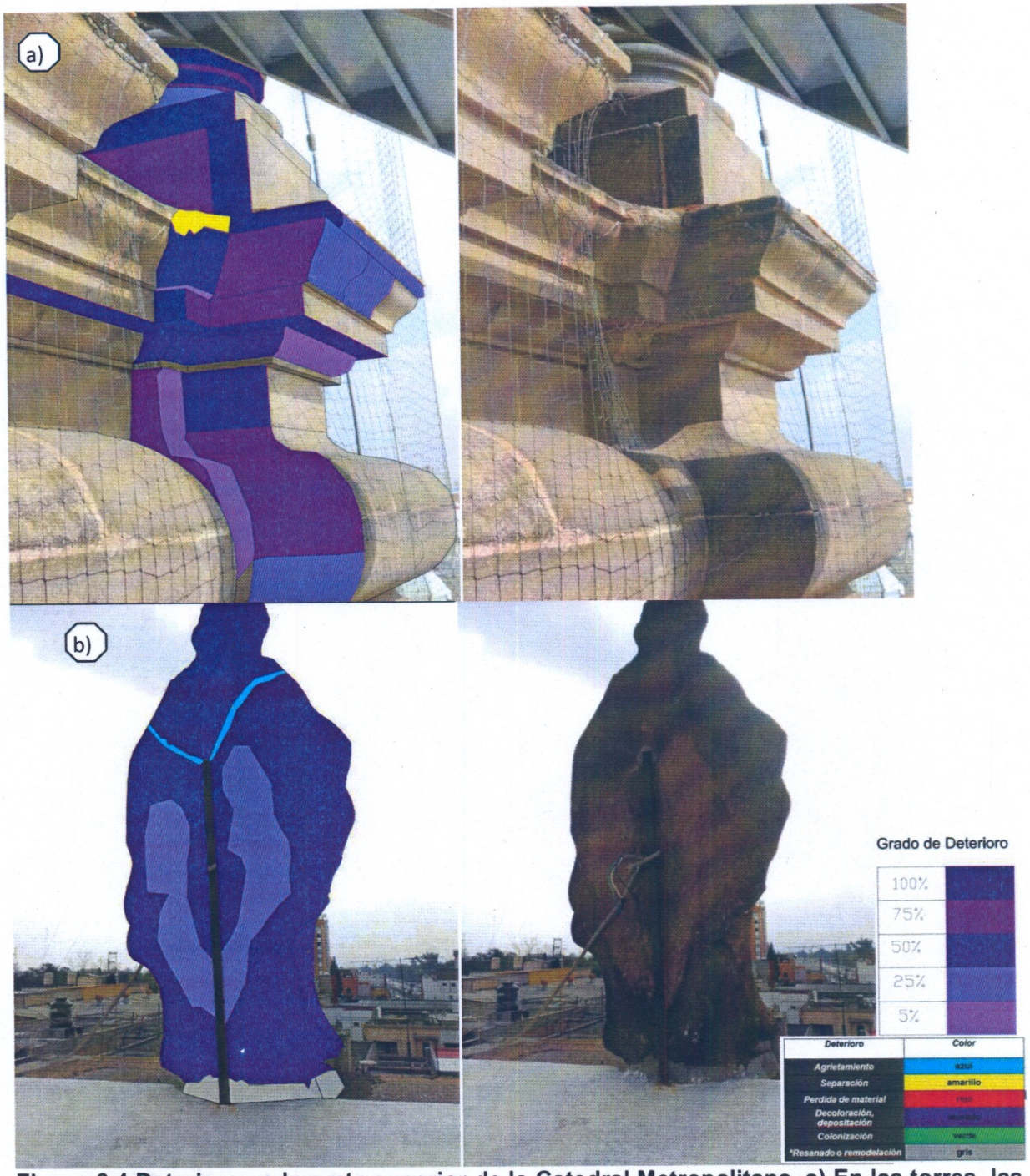


Figura 6.4 Deterioro en la parte superior de la Catedral Metropolitana. a) En las torres, las esquinas de las bases lucen despostilladas debido a la separación (amarillo) en forma de desincrustación hojuelada que se desarrolla por los fenómenos atmosféricos, en morado solo se marca el evidente decoloro de una costra oscura en la roca. b) Estatua fabricada con la Ignimbrita Cantera, completamente deteriorada. Lo más notorio es la decoloración (morado) que sufrió sobre su superficie ya desintegrada y con picaduras, también tiene agrietamientos (azul) provocados por su soporte metálico que en la base han sido resanados (gris).

VI.II Deterioro Templo de Nuestra Señora del Carmen

En la fachada de este templo se observa una mayor erosión a la de catedral a pesar de ser una construcción más joven. En las partes inferiores que están en contacto con el suelo se observa un gran deterioro de separación tal como descamación y desintegración en forma de hojuelas (Figura 6.5a). También se observa un cambio significativo en la tonalidad de la roca producido por costras obscuras y costras claras (Figura 6.5b). En las partes bajas se tienen huecos con colonización biológica evidente, concentrada en las zonas con mayor humedad, como lo son los desagües de las tuberías instaladas en la pared pero también otro tipo de colonización biológica puede ser observada en la fachada por las aves que habitan en ella (Figura 6.5c).

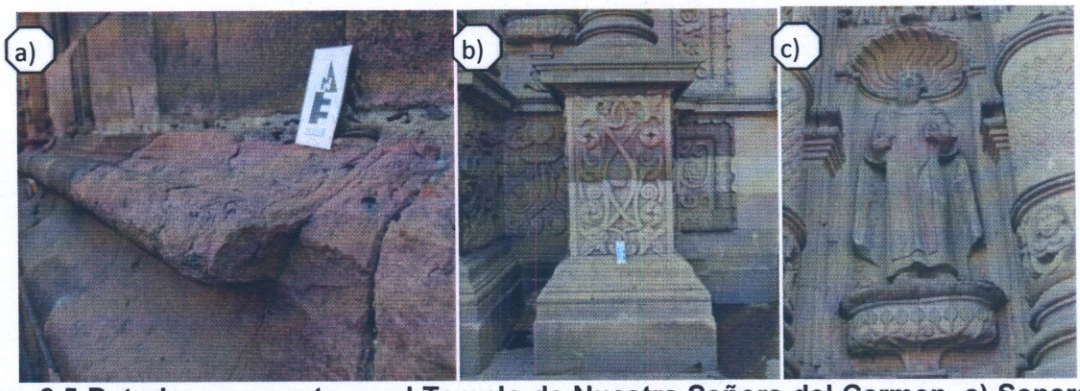


Figura 6.5 Deterioro presente en el Templo de Nuestra Señora del Carmen. a) Separación de desintegración y desfragmentación muy notoria en la fachada del templo. b) Decoloración con distintas intensidades en las partes bajas. c) Estatuas de la fachada con excremento de aves como ejemplo de la colonización biológica.

En la pared del lado norte del templo se observan unas tuberías que sirven para drenar el tejado, debido a estas existe una gran acumulación de humedad y estancamiento de líquido en el suelo cuando hay precipitación. Estas tuberías han propiciado un gran deterioro que es muy notable por la decoloración, separación del material, y colonización biológica como hongos y moho, en la parte donde llega el desagüe (Figura 6.6a). La decoloración en las partes bajas de la fachada es muy notoria, los tonos

varían según la intensidad del daño, existen bloques de la roca que han sido totalmente afectados (Figura 6.6b).

Figura 6.6 Deterioro en la parte baja de la fachada del Templo de Nuestra Señora del Carmen. a) En el lado norte se marca en morado la decoloración en toda la base, existe una costra más clara abajo de donde se encuentra el desagüe que debe su color a los minerales presentes en el agua. El verde dentro del hueco de desagüe muestra la colonización biológica que se desarrolla ahí por la presencia de humedad, con color amarillo se tiene el deterioro de separación que ha provocado pérdidas de material (rojo) y grietas (azul) por su avanzado grado.

Al exponerse la roca a la humedad es más propensa a ser deteriorada de su parte exterior, lo que provoca un desprendimiento de la parte ya desgastada en forma de descamaciones y desincrustaciones. Al ser muy intenso este fenómeno de separación provoca una pérdida de material debido a la erosión (Figura 6.7). En la base de esta zona existen bloques de la roca que ya han sido desintegrados y adquieren formas redondeadas.

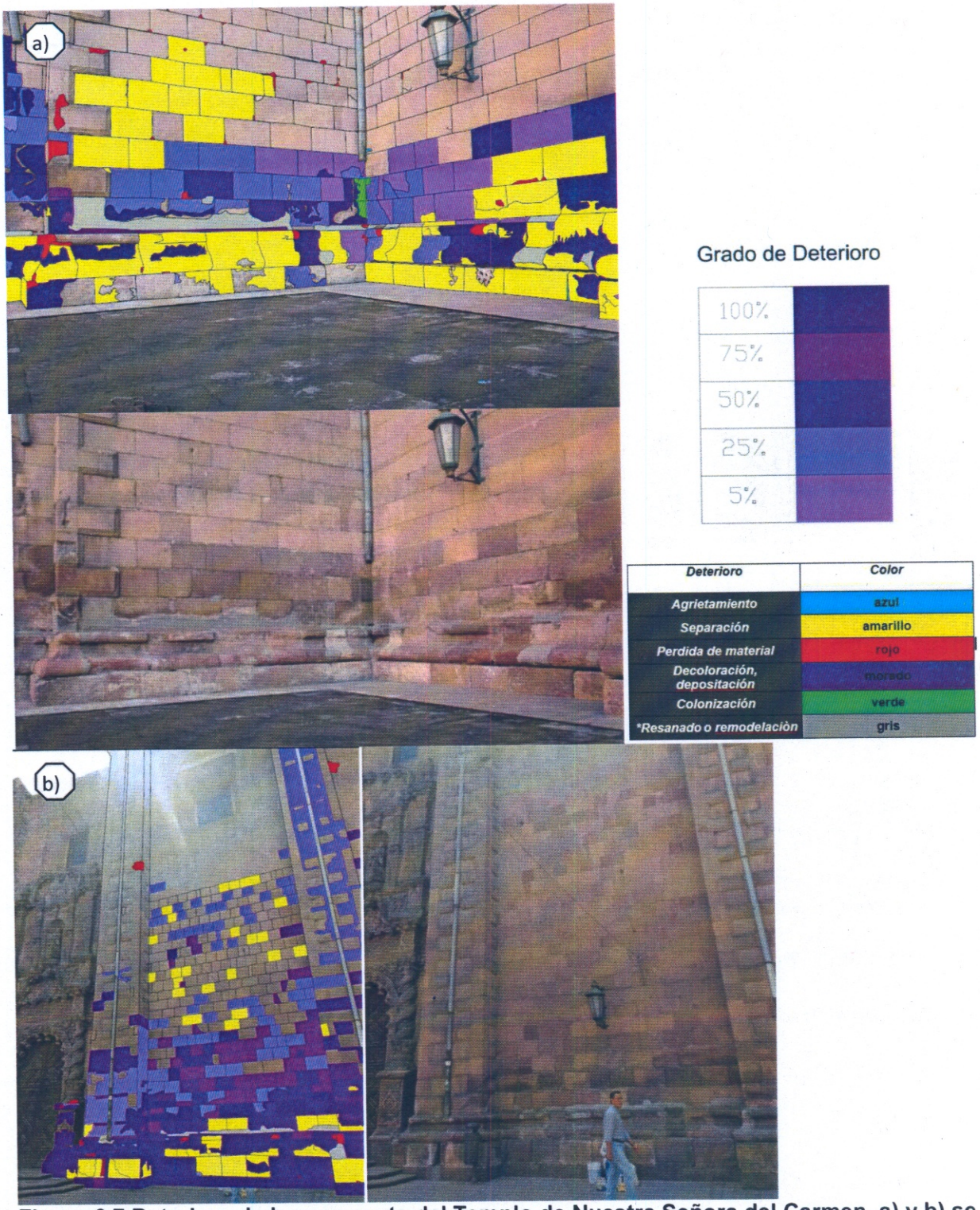


Figura 6.7 Deterioro de la zona norte del Templo de Nuestra Señora del Carmen. a) y b) se ve el daño provocado por la tubería y la humedad acumulada en las superficies (amarillo: separación, rojo: perdida de partes, morado: decoloración, verde: colonización y gris: resanado).

La decoloración en las partes bajas no solo se provoca por la humedad, también se debe a la interacción con las personas, ya que estas por sus actividades diarias provocan contaminación y ensuciamiento en la roca y también pueden hacer uso de herramientas externas para ocasionar un deterioro, tales como *graffiti*, pintura, pegamentos, etc. (Figura 6.8).

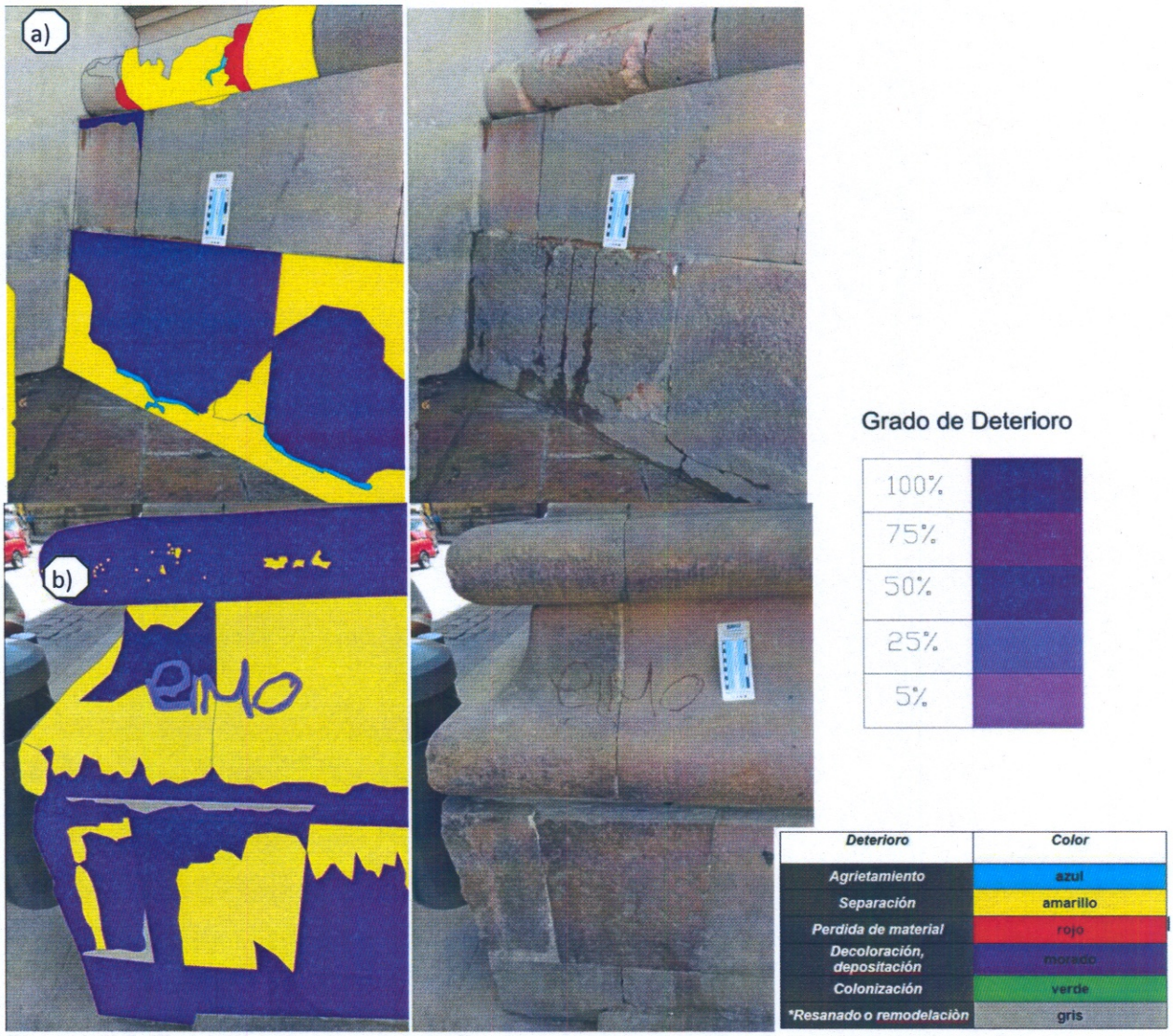


Figura 6.8 Ejemplos de decoloración en las partes bajas de la fachada del Templo de Nuestra Señora del Carmen. a) base con deterioro de separación (amarillo) y decoloración presente debido a la humedad (morado) que provocan perdida de material (rojo) con agrietamiento (azul). b) decoloración debido a ensuciamiento, humedad y *graffiti* (morado) sobre roca con deterioro de separación en forma de desintegración (amarillo) en la que se puede ver partes ya resanadas (gris).

VI.III Deterioro Caja del Agua

La Caja del Agua fue utilizada durante mucho tiempo como distribuidor de agua para la ciudad de San Luis Potosí, la gran mayoría de su deterioro es debido principalmente a la acción del agua en ella, este se puede observar en las partes que estaban en contacto directo y constante como las tinajas que le fueron elaboradas con el fin de retener el liquido. La base también está elaborada con cantera, el suelo y las paredes del monumento en contacto con este se encuentran muy deteriorados, la separación de fragmentos en forma de descamación y hojuelamiento se aprecia a simple vista y también la desintegración del material de roca con una decoloración en forma de costra obscura ocasionada por la humedad (Figura 6.9).

Figura 6.9 Base de la Caja del Agua afectada por el deterioro.

La humedad dentro del monumento ha hecho que se desarrollen formas más complejas de colonización biológica tales como líquenes y plantas, las cuales atraen a mas animales al lugar los cuales se instalan dentro de la construcción (Figura 6.10a).

Dentro de las tinajas se pueden observar indicadores de que el agua estuvo presente, se ve en forma de costras claras que rodean el lugar esculpido por la erosión del agua al caer, y costras oscuras en el fondo de la tinaja que nos indica el elevado grado de humedad que existía. La misma acción del agua provocó una desintegración de los componentes de la roca que se desarrollaron en pequeñas separaciones que fueron desgastando la superficie de la pared (Figura 6.10b).

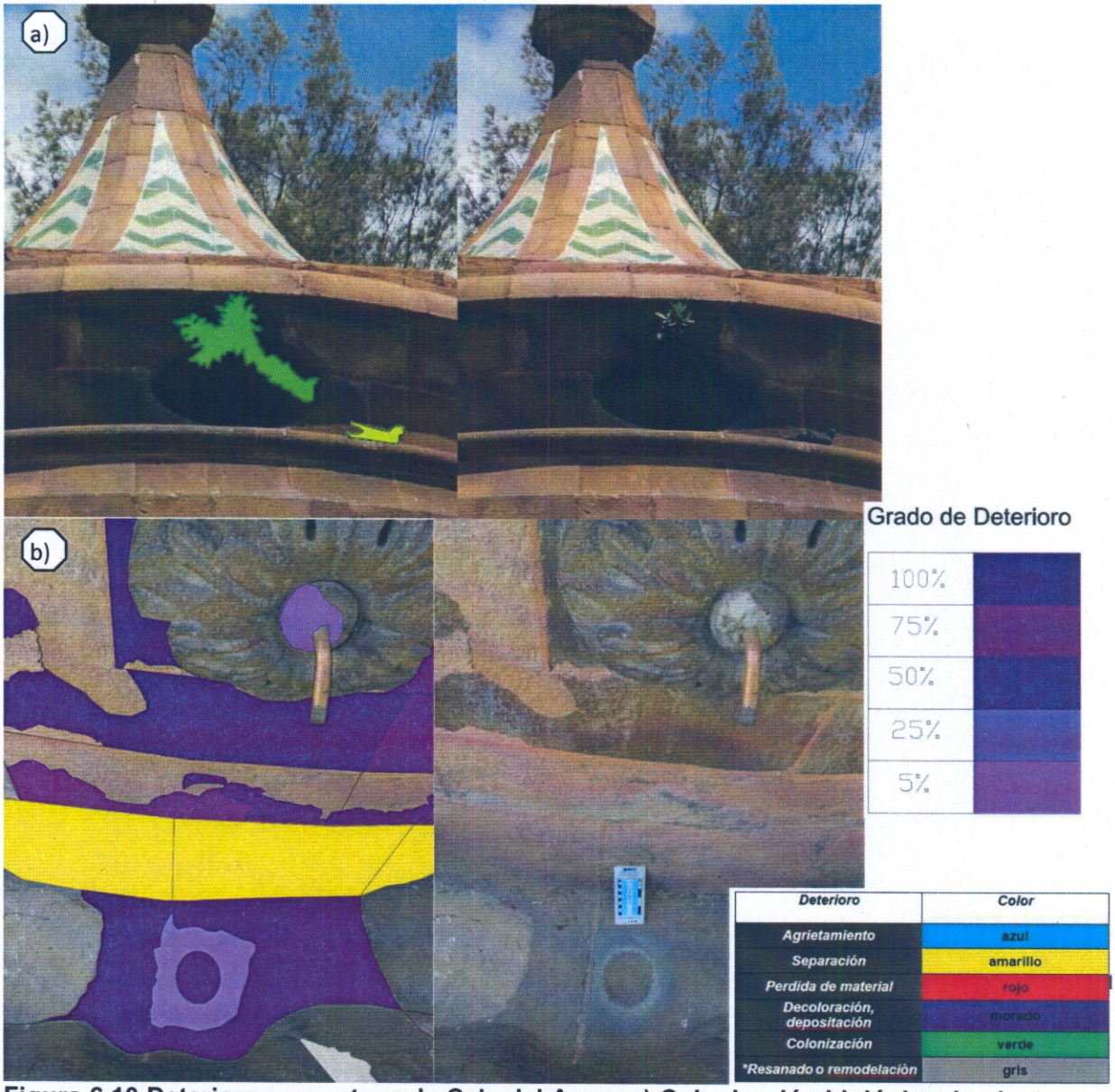


Figura 6.10 Deterioro presente en la Caja del Agua. a) Colonización biológica de plantas y animales (verde) en la parte interna y externa. b) parte interna de la tinaja donde se puede ver la decoloración y erosión (morado) provocada por la caída de agua, y el deterioro de desintegración (amarillo) en la pared.

En general el monumento se encuentra bien conservado, presenta decoloraciones típicas de la roca que se deben a fenómenos climáticos y al intemperismo. Las partes más dañadas son las que estuvieron en contacto con el agua y fueron expuestas a su erosión la cual provoco la perdida de partes, separación del material en forma de

fragmentaciones, desintegraciones, y desincrustaciones de la superficie de la roca (Figura 6.11a).

Figura 6.11 Tipos de deterioro en la Caja del Agua. a) Deterioro a lo largo de la estructura que se hace mayor en las partes bajas en donde estaba en contacto con el agua. Con rojo se observan la pérdida de partes (rojo) del líquido, la desintegración (amarillo) y la decoloración de la roca (morado). b) Poste con deterioro de decoloración (morado), agrietamiento (azul) y desintegración (amarillo).

Los postes que conforman la Caja del Agua, aunque fueron colocados recientemente, también presentan deterioro, el más notorio en todos la decoloración por la humedad presente debido al contacto directo con el suelo y al riego constante que tienen los jardines donde se encuentran, esta humedad provoca también una desintegración en la roca que hace que se desmorone poco a poco en las partes bajas. Otro deterioro muy notorio es el agrietamiento y perdida de muchas de las partes de estos postes debido al daño mecánico ocasionado por las cadenas que les fueron colocadas, el peso que estas tienen junto con la acción de la gravedad provocan que los esfuerzos actúen en la roca, rebasando su límite elástico y ocasionando ruptura (Figura 6.11b).

A pesar de que la Ignimbrita Cantera consiste en una roca porosa y aparentemente poco consistente, ha demostrado ser una roca duradera y resistente para las tareas que se le designan, incluso la de almacenar agua. Es por esto que durante siglos se ha utilizado como una roca idónea para edificios y monumentos representativos de ciudades y pueblos.

RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

De acuerdo a los experimentos realizados para obtener las propiedades petrofísicas de la Ignimbrita Cantera se pudieron conocer los factores específicos que hacen de esta roca un eficiente material pétreo para la construcción.

Los valores de densidad obtenidos para la Ignimbrita Cantera fueron los siguientes:

- Densidad aparente: 2.26 g/cm^3. Esta densidad es afectada por el espacio de poro presente en la roca.
- Densidad de matriz: 2.60 g/cm^3. Que se debe a la densidad de los cristales de cuarzo, como principales componentes de la roca.

Basándonos en la clasificación de Popp (1994) que relaciona la densidad con la composición química de la roca, se puede clasificar a la Ignimbrita Cantera como una roca félsica, ya que su densidad es menor a 2.8 g/cm^3. Este valor también indica que se trata de una roca de composición consistente.

La porosidad es una de las propiedades más importantes en relación con el deterioro, el porcentaje presente en la roca es del 12.83% que de acuerdo a la clasificación de von Moos y Quervain (1948) se trata de una roca muy porosa. De esta porosidad el 81.97% equivale a poros capilares (1-10 μm) y el 18.02% equivale a microporos (.005-1 μm). Sus valores de porosidad son resultado de su origen y ambiente de depósito.

En los microporos presentes en la roca el agua condensara valores de humedad relativa por debajo del 99% y en los poros capilares se presentara una succión capilar relevante (mayor absorción de agua capilar) debido a la geometría del sistema de poro. Esto significa que la roca puede presentar un transporte de agua heterogéneo ya que

cuenta con poros de distintos tamaños, pero en general presenta una mayor absorción de agua pues tiene una alta porosidad efectiva. Esto puede influir directamente con su expansión hídrica e hígrica al encontrarse en contacto con el agua y la humedad del ambiente, pero a pesar de sus valores de porosidad la expansión hídrica que presenta es de ±0.015 mm/m y la expansión hígrica es de ±0.91 mm/m, estas son cantidades pequeñas y al parecer no significativas pero que a lo largo del tiempo puede ocasionar daños relevantes en la superficie de la roca tales como decoloración, separación de partes, perdida de partes, colonización, etc. Los valores de sorción (adsorción de humedad) obtenidos de la Ignimbrita Cantera a una humedad relativa del 95% fueron de 0.0061 g/cm^3, comparando este valor con los de las tobas estudiadas por Wanja *et al.* (2012) es un valor de sorción muy bajo, esto explica la pequeña cantidad de humedad que adsorbe esta roca del ambiente, lo cual es bueno pues de lo contrario podría provocar cambios dimensionales significativos en la roca e incluso llegaría a afectar gravemente sus propiedades mecánicas, color y aspecto estético. A comparación de otras tobas ya estudiadas por Steindlberger (2003) la Ignimbrita Cantera cuenta con una mayor densidad, porosidad y menor expansión hídrica e hígrica, esto se debe a su grado de soldamiento y desvitrificación de la matriz.

Los valores de resistencia sin ruptura al esfuerzo aplicado (fuerza) de la Ignimbrita Cantera nos dicen mucho de su comportamiento como roca dimensional. Los valores obtenidos donde la muestra experimenta una pérdida total de cohesión a lo largo de su superficie de fractura (fuerza de compresión) van de 94.30-98.04 MPa con 4% de anisotropía. Una clasificación dada por De Quervain (1967) y Peschel (1974) la colocan como una roca medianamente dura (70-110MPa). Los valores máximos de esfuerzo

tenso a los que puede ser sometida antes del rompimiento (fuerza de tensión) van de 9.89-10.56 MPa con 7% de anisotropía (en muestra seca) y 8.23-8.71 MPa con 5.5% de anisotropía (en muestra húmeda), la reducción de la fuerza de tensión repartida es del 18% lo que habla del porcentaje de ductilidad en el cuerpo de roca. Se puede decir que la roca es más estable cuando está totalmente seca, y cuando está en condiciones húmedas pierde resistencia pero no en una cantidad significante, la anisotropía es baja en comparación con otros materiales, lo que demuestra que se trata de un cuerpo de roca resistente.

La dureza que presenta la roca de acuerdo a la escala de Freidrich Mohs (1812) va de 2.5-3 en la matriz y 7 por los cristales de cuazo presentes, estos fenocristales hacen que aunque la matriz parezca inconsistente la roca sea estable. Por otro lado presenta una baja resistencia a la abrasión, pues los fenocristales presentes en la matriz pueden contribuir a su desfragmentación (sobre todo cuando se encuentra mojada) ya que esta formada por finas esferulitas de vidrio.

Las muestras tomadas de las canteras situadas en Escalerillas, San Luis Potosí de acuerdo con los valores de velocidad obtenidos por el metodo de transmision de pulsos (Birch, 1960) para evaluar su daño estructural se pueden denominar de frescas a ligeramente deterioradas. Los valores de velocidad recorridos en distancias de 6.69-6.95 cm fueron de 3.82-3.86 km/s. Estos valores mas que por el deterioro que pudiera existir, se deben a la porosidad existente en la roca, ya que este método esta relacionado con el incremento de la porosidad a través del tiempo. Estos resultados eran de esperarse puesto que las muestras utilizadas para este experimento no son obtenidas de los edificios históricos, sino de los tajos de cantera en Escalerillas, S.L.P.

Esto indica que las rocas pertenecientes a esos tajos se encuentran en estado fresco y no han sido atacadas significativamente por el deterioro en su lugar de origen. También influye que se tiene una roca con porosidad significante (12%) pero gracias a que se trata de una roca con poros capilares, microporos, y que presenta un grado de soldamiento, la mayoría de estos poros no está interconectados y por lo tanto es más lento su deterioro.

BIBLIOGRAFÍA

Arikan, F., Ulusay, R. y Aydin, N., 2007, Characterization of weathered acidic volcanic rocks and a weathering classification basen on a rating system. Bull. Eng. Geol. Environ. 66/4:415-430.

Birch, F., 1960, The velocity and compressional waves in rocks to 10 kilobars. Part 1 J Geophys Res 65:1083-1102.

Birch, F., 1961, The velocity and compressional waves in rocks to 10 kilobars. Part 2 J Geophys Res 66:2199-2224.

Brakel, J. y Modry, S., 1981, Mercury porosimetry: State of the art. Powder Tech 29:1-12.

Braunauer, S., Emmett, P.H. y Teller, E., 1938, Adsorption of gases in multimolecular layers, J. Am Chem Soc. 60(2):309-319.

Cammerer, J.S., 1954, Das Verhalten der wichtigsten Baustoffe gegenüber flüssigen und dampfförmigen Wasser. Tonind Ztg 78:199-204.

Christensen, N.I. 1979, Compressional wave velocities in rocks at high temperatures and pressures, critical thermal gradient, and crtustal low-velocity zones. J Geophys Res: 84:6849-6857.

Crosson, R.S. y Lin, J.W., 1971, Voigt and Reuss predictions of anisotropic elasticity of olivine. J Geophys Res 76:570-578.

De Quervain, F., 1967, Technische Gesteinskunde. Lehrbücher und Monographien aus dem Gebiete der exakten Wissenschaften. Mineralogisch-geotechnische Rreihe, Bd 1. Birkhäuser, Basel.

Doveton, J.H., 1987, Log analysis of petrofacies and lithofacies. GFZ Logging Course. Geoforschungszentrum Potsdam, Potsdam.

Dürrast, H., Jahns, E., Tischer, A. y Siegesmund, S., 2001, Vorzugsorientierungen der Mikrorissbildung im triaxialen Verformungsexperiment am Beispiel des Piesberger Sansteins. Z dtsch geol Ges 152:611-620.

Esbert, R. M. y Ordaz J., 1985, Alteración y alterabilidad de las piedras de construcción: criterios petrofísicos y ensayos de laboratorio. I Congreso de Patología en la Edificadón, C.O.A.C, Barcelona, 15 p.

Fitzner, B. y Snethlage, R., 1983, Modellvorstellungen zum Kristallisations- und Hydratationsdruck con Salzen im Porenraum von Sandsteinen. Sitzungsbericht des Arbeitskreises `Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgûtern aus Stein', Erlangen.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
CICTD

Fitzner, B. y Kownatzki, R., 1991, Porositâtseigenschaften und Verwitterungsverhalten von sedimentâren Naturwerksteinen. Bauphysik 13/4:111-119.

Fitzner, B., 1970, Die Prûfung der Forstbestândigkeit von Naturbausteinen. Geol. Mitt 10:205-296.

Fitzner, B. y Basten, D., 1994, Gesteinsporositat, Klassifizierung, Mestechnische Erfassung und Bewertung ihrer Verwitterungsrelevanz- Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm "Steinzerfall-Steinkonservierung", 1992, Fôrderprojekt des Bundesministers fûr Forschung und Technologie. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Fitzner, B., Heinrichs, K. y Kownatzki, R., 1995, Weathering formas-classification and mapping. In: Snethlage, R. (ed), Denkmalpflege und Naturwisscnshaft. Natursteinkonservierung L, Ernst y Sohn, Berlin, pp.41-88.

Franzen, C. y Mirwald, P.W., 2004, Moisture content of natural stones: static and dynamic equilibrium with atmospheric humidity. Envirion Geol 46:391-401.

Fredrich, J.T. y Wong, T.F., 1986, Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks. J Geophys Res 91(B12):12743-12764.

Garrecht, H., 1992, Poirenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruhe.

Gebrande, H., 1992, Elasticity and inelasticity. In: Augenheister, G., (ed) Landolt-Börnstein, Band 1, Physikalische Eigenschaften der Gesteine. Springer, Berlin.

Google Maps, 2012, San Luis Potosí: México, INEGI, publicado 2012, disponible en <maps.google.com.mx>, consultado en septiembre de 2012.

Heinrichs, K., 2005, Diagnose der verwitterungsschäden an den Felsmonumenten der antiken Stadt Petra (Jordanien). Aachener Geowiss Beiträge 41:1-144.

Hirschwald, J., 1912, Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Verwitterungsbeständigkeit. Verlag W Ernst & Sohn, Berlin.

Kettenacker, L., 1930, Über die Feuchtigkeit in Mauern. Ges Ing 53:721-728.

Kiessl, K., 1983, Kapillarer und damfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Diss, Univ Essen.

Kilma, K. y Kluhanek, O., 1968, Quantitive correlation between preferred orientation of grains and elastic anisotropy of marble. IEEE Geisci Electron GE-6:139.

Klopfer, H., 1974, Wassertransport durch Diffusion n Festsoffen. Bauverlag, Wiesbaden.

Klopfer, H., 1985, Feuchte. En: Lutz, P., Jenisch, R., Klopfer, H., et al. (eds) Lehrbuch der Bauphysik. Teubner Verlag, Stuttgart.

Kraus, K., 1985, Experimente zur immissionsbedingten Verwitterung der Naturbausteine des Kölner Doms im Vergleich zu deren Verhalten am Bauwerk. Univ Cologne.

Krus, M., 1995, Feuchtetransport- und Speicherkoeffitzienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Diss Univ Stuttgart.

Künzel, H., 1994, Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Diss Univ Stuttgart.

Labarthe–Hernández, G. y Tristán–González, M., 1979, Cartografía geológica hoja "Tepetate", San Luis Potosí: Instituto de Geología y Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto Técnico 66, 31 pp.

Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M. y Aranda-Gómez, J.J., 1982, Revisión Estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí, Instituto de geología y metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto Técnico No. 85, p.208.

Lucia, F.J., 1983, Petrophysical parameters estimated from visual description of carbonate rocks: a field classification of carbonate pore space. J Petrol Tech 35:626-637.

Lucia, F.J., 1995, Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. Am Assoc Petrol Geol Bull 79:1275-1300.

Lucia, F.J., 1999, Carbonate Reservoir Characterization. Springer, Berlin.

Meng, B., 1993, Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtetransportvorgângen. Aachener Beitr Bauforsch 3:1-71.

México Desconocido, 2012, La cantera potosina: Legado de épocas pasadas: México, D.F., Angél Gallegos, publicado Julio de 1012, disponible en <http://www.mexicodesconocido.com.mx/la-cantera-potosina-legado-de-epocas-pasadas.html>, consultado el 15 de Agosto de 2012.

Mohs, F., 1812, Escala de dureza, en Tarbuck, E.J., Lutgens, F.K., (8 ed.) Ciencias de la tierra una introducción a la geología física: Madrid, Pearson Prentice Hall, 90.

Monicard, R.P., 1980, Properties of Reservoir Rocks: Core Analysis. Edition Technip, Paris.

Mosch, S., 2009, Optimierung der Exploration, Gewinnung und Materialcharakterisierung von Naturwerksteinen. Available in <http://webdoc.dub.gwdg.de./diss/2009/mosch/mosch/.pdf.> Accessed 20 July 2010.

Muller F., 2001, Gesteinskunde. Ebner-Verlag, Ulm.

Niesel, K. y Schimmelwitz, P., 1982, Zur quantitative Kennzeichnung des Verwitterunsgverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer gefügemerkmale. Bundesamt für Materialprüfung Forsch-Ber 86:1-100.

Nur, A. y Simmons, G., 1969, The effect of saturation on velocity in low porosity rocks. Earth Planet Sci Lett 7:183-193.

Peschel, A., 1974, Zur Ermittlung und Bewertung von Festigkeitseigenschaften bei Natursteinen. Z Angew Geol 20:118-128.

Popp T., 1994, Der Einfluss von Gesteinsmatrix, Mikrorissgenfügen und intergranularen Fluiden auf die elastischen Wellengeschwindigkeiten und die elektrische Leitfähigkeit krustenrelevanter Gesteine unter PT-Bedingungen. Diss Univ Kiel.

Poschlod, K., 1990, Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine. Mûnchener Geowiss Abh B 7, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munich.

Ruedrich J., Seidel, M., Kirchner, D., y Siegesmund, S., 2005, Salzverwitterung, hygrische und thermische Dehnung als auslôsende Schadensquantitâten. Z dtsch geol Ges 156/1:59-74.

Ruedrich, J., Bartelsen, T., Dohrmann, R. y Siegesmund, S., 2010, Building sandstone integrity affected by the process of hygric expansion. Environ Earth Sci. Doi: 10.1007/s12665-010-0767-0.

Sage, J.D., 1988, Thermal microfracturing of marble. In: Marinos, P.G., Koukis., G.C. (Eds) Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites, Balkema, Rotterdam.

Segall, P. y Pollard, D.D., 1980, Mechanics of discontinuous faults. J. Geophys Res 85: 4337-4350.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2004, Carta Geológico-Minera San Francisco F14-C13, escala 1:50,000: Pachuca, Hgo., Secretaria de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional De Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2007, Carta Geológico-Minera Tepetate F14-A83, escala 1:50,000: Pachuca, Hgo., Secretaria de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional De Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.

Siegesmund, S., 1996, The significance of rock fabrics for the geophysical interpretation of geophysical anisotropies. Geotekt Forsch 85:1-123.

Siegesmund, S., Weiss, T., Vollbrecht, A. y Snethlage, R., 1999, Marble as a natural building stone: rock fabrics, physical and mechanical properties. Z dtsch geol Ges 150(2):237-258.

Siegesmund, S., Mosch, St., Scheffzük, C.H. y Nicolayev, D.I., 2008, The bowing potential of granitic rocks: rock fabricas, thermal properties and residual strain. Environ Geol 55:1437-1448.

Siegesmund, S., Ullemeyer, K., Weiss, T. y Tschegg, E.K., 2000, Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. Int J Earth Sci 89:170-182.

Siegesmund S. y Dürrast H., 2011, Physical and mechanical properties of rocks. In: Siegesmund S (ed) Stone in architecture, 4th edn. Springer, Berlin, pp 97–225

Siegesmund S. y Snethlage R., 2011, Stone in architecture, 4th ed.Springer, Berlin, p 552.

Smith, R.L., 1960, Zones and zonal variations in welded ash-flows: U.S. Geol. Survey Prof. Paper 354-F.

Smith B.J., Lehane E., Warke P.A., 2010, Micro-environmental change as a trigger for granite decay in offshore Irish lighthouses: implications for the long-term preservation of operational historic buildings. Environ Earth Sci (2011) 63:1415-1431

SMN, CONAGUA, 2012, Temperatura y Precipitación: México, D.F., Servicio Meteorológico Nacional, publicado en Octubre de 2012, disponible en < http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=77>, consultado el 30 de octubre de 2012.

Snethlage, R., 1984, Steinkonservierung, Forschungsprogramm des Zentrallabors für Denkmalpflege 1979-1983- Berchit für die Stiftung Volkswagenwerk. Arbeitsheft Bayr Landesamt Denkmalpflege 22. Lipp Verlag, Munich.

Snethlage, R., Hoffmann, D. y Knöfel, D., 1986, Simulation der Verwitterung von Naturstein. Teil 2: Physikalisch-chemische Verwitterungsreaktionen. In: Wittmann, F.H., (ed.) 2nd Int Kolloqium 'Werkstoffweissenschaften und Bausanierung'. Technische Akademie, Esslingen.

Snethlage, R., 2005, Leitfaden zur Steinkonservierung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Sparks, R.S.J. y Walker, G.P.L., 1973, The ground surge deposit; A third type of pyroclastic rock: Nature, v. 241. P.62.

Steindlberger, E., 2003, Vulkanische Gesteine aus Hessen und ihre Eigenschaften als Naturwerksteine. Geol 46:378-390.

Stockhausen, D., 1981, Die Dilatation hochporöser Festkörper bei Wasseraufnahme und Eisbildung. Diss TU Munich.

Streckeisen, A. L., 1978. IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites and Melilite Rocks. Recommendations and Suggestions. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen, Vol. 141, 1-14.

Strohmeyer, D., 2003, Gefügeabhängigkeit technischer Eigenschaften. PhD thesis, Univ Göttingen.

Stück, H., Forgó, Z., Ruedrich, J., Siegesmund S. y Török, A., 2008, The Behaviour of consolidated volcanic tuffs: weathering mechanisms under simulated laboratory conditions. Environ Geol 56:699-713.

Thuro, K., Plinninger, R.J. y Zäh, S., 2001, Scale effects in rock strength properties. Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test. In: Särkkä, P., Eloranta, P., (eds) Rock Mechanics – A challenge for Society. Proceedings of ISRM Regional Symposium on Eurock 2001, Espoo, Finland. Swets & Zeitlinger, Taylor and Francis Group, London.

Tournier, B., Jeannette, D. y Destrigenville, C., 2000, Stone drying: an approach of the effective evaporation surface area. In: Fassina, V., ed. 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Elsevier, Amsterdam.

Tristán–González, M., Aguillón–Robles, A., Barboza–Gudiño, J.R., Torres–Hernández, J.R., Bellon, H., López–Doncel, R., Rodríguez–Ríos, R. y Labarthe–Hernández, G., 2009, Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí (en línea): Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 61(3), 287–303, disponible en <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/epoca04/6103/(1)Tristan.pdf>

Universidad Autónoma de San Luis Potosí., 1999, Estudio de prospección hidrogeológica del acuífero de Ocampo, Gto., CONAGUA Guanajuato, 38 p.

Viles, H.A., Camuffo, D., Fitz, S Fitzner, B., Lindquist, O., Livingston, R.A., Maravelaki, P.N.V., Sabbioni, C. y Warscheid, T.W., 1997, Group report: What is the state of our knowledge of the mechanisms of deterioration and how good are our estimates of rates of deterioration?- In: Baer NS, Snethlage R (ed) Report of the Dahlem Workshop on

Saving our architectural heritage: The conservation of historic stone structures. Wiley, Hoboken NJ.

Von Moos, A. y De Quervin, F., 1948, Technische Gesteinskunde. Birkhâuser, Basel.

Vos, B.H., 1978 Hygric methods for the determination of the behavior of stones. Int Symp Deterioration of Stone Monuments. UNESCO-RILEM, Paris.

Wanja Wedekind, Rubén López-Doncel, Reiner Dohrmann, Mathias Kocher y Siegfried Siegesmund, 2012, Weathering of tuff rocks caused by moisture expansion. Environmental Earth Sciences (in press).

Warscheid, T. y Braams, J., 2000, Biodeterioration of stone: a review. Int. Biodeterior Biodegr 46:343-368.

Washburn E.W., 1921, A method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. Proc Nat Acad Sci 7:115.

Weiis, G., 1992, Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefûge unter besonderer Berûcksichtigung gesteinsspezifischer Parameter. MûnchnerGeowiss Abh B 9, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munich.

Weimann, M.B, 2001, Hygrische Eigenschaften von Polymerbeton im Vergleich zu porösen mineralischen Werkstoffen im Bauwesen. Thesis, Technical University, Zurich, p.149.

Weiss, G., 1992, Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinsspezifischer Parameter. Münchner Geowiss Abh B 9, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munich.

Wendel, E., Charola E.A. y Fitzner, B., 1996, Easter Island tuff: Laboratory studies for its consolidation. In Riederer J (ed) Proceedings of 8th International Congress Deterioration and Conservation of Stone. Möller Druck und Verlag GmbH, Berlin.

Wendler E. y Sttler L., 1996, Bohrwiderstandsmessung als zerstörungsarmes Prüfverfahren. In: Wittmann F.H., Gerdes A., (eds) Proceedings of the 4th International Colloquium Material Science and Restoration, Aedificatio Publishers, Freiburg, Unterengstringen, pp. 145-160.

Wesche, K., 1981, Baustoffe für tragende Bauteile. 2nd ed., Vol 2. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin.

GLOSARIO

Absorción: Fenómeno de volumen. Poder de un sólido de tomar moléculas en su estructura.

Adsorción: Proceso en el que los átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie interfacial de un material pero no se encuentran fijos en un lugar específico de la superficie, sino que son libres de trasladarse en la interfase formándose como resultado una película líquida o gaseosa en la superficie de un cuerpo (sólido o líquido), esto se debe a las fuerzas de van der Waals.

Agente hidrofobizador: Producto auxiliar para hacer una superficie hidrofóbica.

Agua capilar: Es la fracción de agua que ocupa los microporos, se mantiene en su lugar gracias a las fuerzas de tensión superficial del agua.

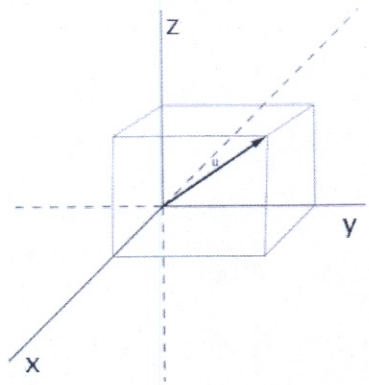
Agua higroscópica: también llamada como agua molecular. Es la fracción del agua absorbida directamente de la humedad del aire. Esta se dispone sobre las partículas del terreno en una capa de 15-20 moléculas de espesor y se adhiere a la partícula por adhesión superficial.

Ángulo de humedad: Ángulo de contacto líquido-sólido.

Capa monomolecular: Es una capa adsorbida cuyo espesor es de una sola molécula.

Desorción: Proceso contrario a la adsorción, se refiere comúnmente a la liberación de humedad o a la eliminación de material desde un medio adsorbente, usualmente para recuperar material.

Dimensiónes x (largo), y (ancho) y z(alto): Son vectores espaciales que comprenden un sistema imaginario de ejes que convergen de forma perpendicular y nos ayudan a la hora de realizar mediciones de longitud (x), espesor (y) y altura (z).



Hídrico(a): Referente al agua presente en el ambiente.

Hígrico(a): Referente a la humedad relativa del aire en el rango de 0% - 95% y al contacto de esta con materiales.

Higroscópico: Capacidad de algunas sustancias de absorber o ceder humedad al medio ambiente.

Humedad relativa: Cantidad de vapor de agua presente en el aire. Es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura.

Isotermas de adsorción: Describen el equilibrio de la adsorción de un material en una superficie a una temperatura constante. Representa la cantidad de material unida a la superficie (sorbato) como una función del material presente en la fase gas o en la disolución. Estas isotermas se usan como modelos experimentales. Estas isotermas

FMET5186

abarcan la isoterma de sorción (describe la cantidad de agua dsorbida en relación a la humedad relativa del aire a su alrededor) y la isoterma de desorción (describe el agua liberada como decrecimientos de la humedad relativa).

Sorción: Se refiere comúnmente a la adsorción de humedad. Es un proceso determinante en el transporte de compuestos orgánicos en el agua o el suelo. Describe la asociación de compuestos químicos en forma disuelta o gaseosa con materiales o el suelo. Se trata de un proceso de transferencia de fases en el que se puede dar entre una fase sólida y moléculas de vapor o entre una fase sólida y moléculas en forma disuelta.

Superficie hidrofílica: superficies con moléculas que tienen la propiedad a tener la tendencia de interactuar o disolverse en el agua u otras sustancias polares. Esas moléculas son capaces de unirse con el hidrógeno y se encuentran típicamente polarizadas con carga.

Superficie hidrofóbica: Superficie que no es miscible con el agua (no interacciona con ella). Esto ocurre cuando sus moléculas no son capaces de interaccionar con las moléculas de agua ni por interacciones ión-dipólo ni mediante puedes de hidrógeno.