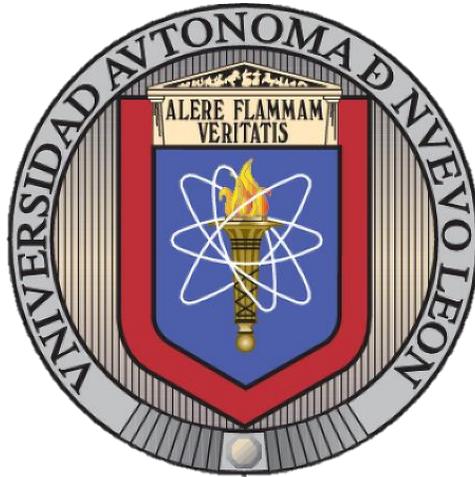


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



**“ESTUDIO GEOLÓGICO DEL DETERIORO DE LA IGLESIA
EL SEÑOR DE LA MISERICORDIA, LINARES, N. L.”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO**

PRESENTA

JESÚS HEBERTO ARRIAGA DE LA CERDA

LINARES, N. L.

OCTUBRE 2017.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®



FCT

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA®

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

TESIS

**“ESTUDIO GEOLÓGICO DEL DETERIORO DE LA IGLESIA EL SEÑOR DE LA
MISERICORDIA, LINARES, N. L.”**

Presenta

Jesús Heberto Arriaga de la Cerda

Para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández

Facultad de Ciencias de la Tierra

Universidad Autónoma de Nuevo León

ASESOR EXTERNO

Dr. Rubén Alfonso López Doncel

Instituto de Geología

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

LINARES, N. L.

OCTUBRE 2017.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®



FCT

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA®

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**

Tesis

**“ESTUDIO GEOLÓGICO DEL DETERIORO DE LA IGLESIA EL SEÑOR DE LA
MISERICORDIA, LINARES, N. L.”**

Presenta

Jesús Heberto Arriaga de la Cerda

Para obtener el título de
INGENIERO GEÓLOGO

Comité de Titulación

Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández

Director de Titulación

Dra. Yolanda Pichardo Barrón

Co-Director de Titulación

M.C. Efraín Alva Niño

Co-Director de Titulación

LINARES, N. L.

OCTUBRE 2017.

Por este conducto declaro bajo protesta que este trabajo ha sido desarrollado personalmente, con el apoyo del Comité de Titulación y el Asesor Externo. Toda la información utilizada para este estudio ha sido citada debidamente.

Jesús Heberto Arriaga de la Cerda

Linares, Nuevo León

Octubre de 2017.

DEDICATORIA

A quien representa mi más grande fortuna en la vida, mis padres

Gracias Mamá y Papá

Iliana Edith de la Cerda Taméz

Juan José Arriaga Gilguero

A mi hermano, mi cuñada y mi sobrino

Carlos Tomás Arriaga de la Cerda

Aurora Vigil Briones

Carlos Andrés Arriaga Vigil

A quienes han sido mis segundos padres durante mi formación académica y que sin duda siempre llevaré en mi corazón, gracias por el apoyo dentro y fuera de la facultad

Yolanda Pichardo Barrón

Javier Aguilar Pérez

Y no menos importante, por quien vivo y por quien estoy aquí

Gracias Dios.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi *Alma Mater* la Universidad Autónoma de Nuevo León, que a través de la Facultad de Ciencias de la Tierra y de todos sus profesores me brindaron las herramientas y los conocimientos para llegar a ser un profesionalista.

Agradezco igualmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el valioso apoyo a través de los proyectos Ciencia Básica 130282 y Cooperación Bilateral 191044 a cargo del Dr. Rubén Alfonso López Doncel.

Aprovecho a su vez para agradecer al Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí que a través del Dr. Rubén Alfonso López Doncel, me brindaron la oportunidad de utilizar sus instalaciones, y aun siendo ajeno a la Institución, me trataron como si perteneciera a la misma. Don Rubén, gracias por brindarme su confianza para realizar este trabajo, por su disponibilidad, por compartir sus conocimientos conmigo, y sobre todo por su amable trato, muy familiar, y sobre todo muy humilde, algo que admiro de Usted.

A mi Director de Tesis, el Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández, por el apoyo y el tiempo que me brindó, durante la realización de este trabajo, gracias.

A mi Co-Directora la Dra. Yolanda Pichardo Barrón por todo el tiempo invertido en mí, durante la realización del trabajo y también durante mi formación como profesionalista, muchas de las oportunidades académicas que tuve, no habrían sido posible sin su ayuda, me faltan palabras para agradecerle. Gracias por los estirones de orejas, gracias por los sabios consejos para el trabajo y para mi vida cotidiana, de verdad, gracias por todo.

A mi Co-Director el M. C. Efraín Alva Niño, por el apoyo brindado en el Laboratorio de Geología en la realización de pruebas físicas como parte del trabajo, gracias por compartir sus conocimientos conmigo.

Al Dr. Javier Aguilar Pérez, por todo el apoyo brindado durante la carrera, por sus puntuales y sabios consejos, y por siempre tratarme con esa amabilidad y ese carisma que lo caracteriza, muchas gracias.

Al Dr. Fernando Velasco Tapia por algunos consejos que aportó para la elaboración del trabajo, sin ser parte el comité, brindó un poco de los muchos conocimientos que posee, gracias.

A la Ing. Ana María Garza Castillo por el tan amable trato que tuvo para conmigo en el Laboratorio de Geoquímica de la Facultad de Ciencias de la Tierra, siempre con la disponibilidad de ayudar, gracias.

Al personal del Laboratorio de Geopreparación de la Facultad de Ciencias de la Tierra, por facilitar el uso de sus instalaciones y brindarme apoyo durante la preparación de las muestras.

Al personal de la Parroquia El Roble, coordinadora de la Iglesia El Señor de la Misericordia, por facilitarme el acceso a las instalaciones, la realización de pruebas y la toma de muestras, gracias.

A mis compañeros de escuela que poco a poco se fueron convirtiendo en amigos. La onda: Gonzalo Rivera, Ramiro Martínez (Borre), Alfredo Charles (Fredy), Alejandro Valadez (Vala). A aquellos que encontré durante mi paso en la FCT y se volvieron parte importante de mi vida: Diana Mireles, Alondra Bailón, Daniel Saavedra y Laura González. Al grupo de los queretanos por tan buenos momentos que pasamos en el congreso y también como amigos: Meme, Chuy, Amaya, Yayo, Kere, Nalle, Mitzy, Marisol. A todos les deseo éxito en todo lo que venga, y que todas sus metas se cumplan.

Especialmente a mi mamá, Iliana Edith de la Cerda Taméz, en primera instancia por haberme brindado la vida. Gracias por representar mi más grande motivación para salir adelante, gracias por otorgarme la oportunidad de estudiar, gracias por ser mi mejor amiga y gracias por siempre preocuparte por mi bienestar y el de mi hermano, en verdad madre, te agradezco infinitamente, y nunca terminaré de pagarte todo lo que has hecho por mí, te amo y de nuevo ¡gracias!

Y a todos aquellos que de manera desinteresada ayudaron a mi formación como profesionista, así como a la elaboración de este trabajo, ¡Muchas Gracias!

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS.....	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN	1
Justificación.....	2
Objetivos	3
Metodología.....	3
a) Gabinete Inicial	4
b) Trabajo de Campo.....	4
c) Trabajo de Laboratorio	4
d) Materiales Estudiados	7
e) Gabinete Final (uso de <i>Software</i>).....	8
Localización y vías de acceso	8
a) Localización del Templo El Señor de la Misericordia	8
b) Localización cantera de areniscas	9
c) Localización cantera de travertino.....	11
1.- GENERALIDADES.....	13
1.1.- Meteorología	13
1.2.- Tipos de Deterioro.....	15
1.2.1.- Deterioros Físicos.....	15
a) Agua	16
b) Humedad	16

c)	Erosión Atmosférica	16
d)	Suciedad	16
1.2.2.-	Deterioros Mecánicos	17
a)	Deformaciones	17
b)	Grietas	17
c)	Fisuras	18
d)	Desprendimiento	18
e)	Pérdida de Material	18
f)	Erosiones Mecánicas	18
g)	Deplacado, Exfoliación y Descamación	18
1.2.3.-	Deterioros Químicos	19
a)	Alveolización	19
b)	Eflorescencias	19
1.2.4.-	Otros Agentes	20
	Contaminantes Atmosféricos	20
	Organismos	21
	Animales	21
	Plantas	21
	Rayaduras	21
	Decoloración	22
	Resanamiento	22
	Corteza	22
1.3.-	Marco Teórico	23
1.3.1.-	Propiedades Petrofísicas	23
a)	Densidad	23

b) Porosidad.....	24
c) Absorción de agua capilar.....	27
d) Propiedades hígricas/hídricas.....	29
1.4.- Marco Geológico.....	31
1.4.1.- Geología Regional.....	31
1.4.2.- Geología Local.....	32
Formación San Felipe (Cretácico Superior).....	32
Travertino (Neógeno-Cuaternario).....	32
1.5.- Marco Histórico-Arquitectónico del Templo El Señor de la Misericordia.....	33
1.5.1.- Historia.....	33
1.5.2.- Descripción Arquitectónica.....	34
2.- MAPEOS LITOLÓGICOS DEL TEMPLO EL SEÑOR DE LA MISERICORDIA	38
2.1.- Fachada principal del templo.....	38
2.2.- Campanario.....	39
2.3.- Fachada oriental.....	41
3.- RESULTADOS.....	43
3.1.- PROPIEDADES PETROGRÁFICAS.....	43
3.1.1.- Clasificación de las Areniscas.....	45
3.1.2.- Descripciones Petrográficas.....	46
Descripción de la lámina Cap1a.001.....	46
Descripción de la lámina Cap2a.001.....	48
Descripción de la lámina Cap4a.001.....	50
3.2.- PROPIEDADES PETROFÍSICAS.....	52
3.2.1.- Densidad.....	52

3.2.2.- Porosidad	53
3.2.3.-Absorción de agua capilar	55
3.2.4.-Expansión hídrica	55
3.2.5.-Velocidad de ondas ultrasónicas	57
3.2.6.-Difracción de Rayos-X.....	57
4.- DESCRIPCIÓN DE DETERIOROS.....	58
4.1.-Ciclos térmicos.....	58
4.2.-Hinchamiento hídrico e hígrico.....	59
4.3.-Daños por procesos químicos y biológicos	61
5.- CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE DETERIORO EN LAS ROCAS DEL TEMPLO EL SEÑOR DE LA MISERICORDIA	63
5.1.- Fachada principal del templo	64
5.2.- Campanario.....	65
CONCLUSIONES.....	67
DISCUSIÓN	69
BIBLIOGRAFÍA	70

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	En esta imagen se presentan las herramientas necesarias para la elaboración de láminas delgadas. En la imagen (A); se encuentra la cortadora MK, en la imagen (B); se observan los discos pulidores y en la imagen (C); se muestra la última etapa en donde se pule la lámina con los polvos abrasivos, hasta que esta pueda observarse con claridad en el microscopio polarizado.	5
2	Trabajo de laboratorio con los distintos procesos a los que fueron sometidos las rocas (explicación en el texto).	6
3	Mapa del centro histórico de Linares, N. L., sitio donde se ubica el Templo El Señor de la Misericordia.	9
4	Mapa de la Presa Cerro Prieto, donde se encuentra ubicada la cantera de areniscas perteneciente a la Formación San Felipe (tomado y modificado de GoogleMaps 2015).	10
5	Cantera inactiva de areniscas intercaladas con cenizas volcánicas alteradas (horizonte verde) pertenecientes a la Formación San Felipe, lugar donde se extrajeron muestras frescas para pruebas de laboratorio, zona ubicada en las cercanías a la presa Cerro Prieto.	11
6	Mapa de la parte sur del municipio de Linares, en color azul se indica el recorrido para llegar a la cantera de sillar, ubicada a lado de la Planta de Agua Jesús González SN-S (modificado de GoogleMaps, 2015).	12
7	Recorte transversal de la loma, en la imagen se puede observar los dos tipos de texturas que muestra el caliche. Las manchas de escorrentías de agua se hacen presentes en color negro a gris oscuro, ocasionadas por el agua producto de la vegetación del lugar. Estas manchas son similares a las que se presentan en las rocas que conforman el Templo. Zona ubicada en la colonia “La Loma” al sur de la ciudad de Linares.	13
8	Comparación de las temperaturas promedio mínimas de los años 1902-2011 vs. 2016 (tomado de atlasclimatico.unam.mx, 2016).	14
9	Comparación de las temperaturas promedio máximas de los años 1902-2011 vs. 2016 (tomado de atlasclimatico.unam.mx, 2016).	15

10	Fachada principal del Templo. Las líneas en color rojo muestran los dos cuerpos rectangulares horizontales y las líneas en color azul muestran el cuerpo vertical que representa el campanario.	34
11	Puerta principal del Templo en la actualidad. Las líneas en color rojo muestran el cordón de ornamentación fitomórfica, mientras que las líneas en color azul muestran el par de pilastras con ornamentación antropomórfica.	35
12	Partes específicas que conforman la fachada principal del Templo: en la imagen (a); se muestran las pilastras en donde se encuentran los atlantes, en la imagen (b); se observa el capitel (cabeza de atlante con un tocado fitomórfico), en la imagen (c); se puede apreciar el pie del atlante, mientras en la imagen (d); se presenta el motivo del basamento y por último en la imagen (e); el motivo fitomórfico del basamento.	36
13	Parte superior de la fachada principal del Templo en la actualidad. Las líneas en color verde muestran la ventana al coro, las líneas en color azul indican las pilastras que forman los capiteles de la fachada, mientras que las líneas en color rojo muestran algunos de los diseños arquitectónicos del tipo zoomórfico y fitomórfico.	37
14	Fachada lateral del Templo, en donde se muestra en las líneas de color rojo los contra-fuertes principales, construidos a base de rocas areniscas y una puerta secundaria.	37
15	Simbología utilizada para el mapeo litológico.	38
16	Litologías presentes en la fachada principal del Templo, resalta el color verde (travertino trabajado) constituyendo la mayor parte del edificio, seguido del azul (travertino), rojo (arenisca) y gris (mortero).	39
17	Las abundantes piezas representadas en color rojo son evidentes, siendo las areniscas las que componen en su mayoría la parte lateral del campanario, seguido del color azul (travertino), verde (travertino trabajado) y gris (mortero).	40
18	Parte sur del campanario, presenta la misma forma que en la parte frontal y oriental. Las areniscas componen la mayor parte de la estructura, seguido del travertino, travertino trabajado y al final el mortero.	41
19	Primera parte de la fachada oriental, resalta en cada lado un contrafuerte, constituidos a base de rocas areniscas, al centro una puerta secundaria con una ventana, cabe resaltar el	42

	pequeño tamaño de la ventana, esto debido al grosor que poseían las paredes, alrededor de la puerta los moldes constituidos totalmente por travertino trabajado. En cada uno de los contrafuertes se observan anclas, que fueron implementadas recientemente para dar estabilidad a la construcción.	
20	Segunda parte de la fachada oriental, constituida principalmente por areniscas y mortero, contiene una gran cantidad de mortero, que se puede apreciar en la parte superior de la puerta, esto debido a las restauraciones recientes que se llevaron a cabo en la construcción. También resalta un tercer contrafuerte al lado derecho de la imagen, constituido por areniscas.	43
21	Modelo para la clasificación de areniscas (tomado y modificado de Pettijhon et al., 1987). Qtz: cuarzo; Fptos.: feldespatos; Frag. Rocas: fragmentos de rocas.	44
22	Lámina Cap.1a001, granos finos-medio, donde sus granos se encuentran conectados en un contacto cóncavo-convexo a punto de contacto. Predominando los cristales de cuarzo y los manchones de color rojo marrón representando una oxidación pronunciada.	47
23	Diagrama Ternario representativo de la lámina Cap1a.001.	48
24	Lámina Cap 2.00, en esta imagen se pueden observar los manchones en color marrón y algunos feldespatos con maclado polisintético. Matriz de grano soportado, los clastos de cemento se pueden observar en color crema. Los cuarzos predominan en colores grises de formas bien definidas. El contacto entre los granos en algunas partes llega a ser puntual, la saturación de esta sección es típica de las areniscas grauvacas.	49
25	Diagrama Ternario representativo de la lámina Cap2a.001.	50
26	Lámina Cap4a.001, se pueden apreciar algunos maclados polisintéticos de las plagioclasas, el cemento carbonatado se presenta a lo largo de la lámina en color beige a amarillo claro, los cuarzos predominantes son de tipo volcánico con extinción recta.	51
27	Diagrama Ternario representativo de la lámina Cap4a.001.	52
28	Gráfico de la distribución del radio de poro de acuerdo al porcentaje del volumen de porosidad en la roca (40.53) en la muestra VE3.	54

29	Resultados de expansión hídrica para las muestras de arenisca (A2) y travertino (T1 y T2) bajo condiciones de saturación en agua. Se observa que en las tres muestras se presentaron valores negativos, es decir, las rocas se contrajeron.	56
30	Difractograma de la muestra VE3, se observa en el pico de 2θ calcita, que representa el componente principal de la roca, en picos menores la presencia de illita, resultado de la alteración de minerales.	58
31	Parte inferior derecha, correspondiente a la fachada principal del Templo, en donde se puede observar los estragos del deterioro tipo mecánico en las rocas arenisca. La desintegración y la descamación son algunos de los ejemplos más comunes. Las areniscas contienen minerales hidratados como son algunas micas, susceptibles a los cambios de clima, ya que estos pierden hidratación.	59
32	En esta imagen se pueden observar las distintas fisuras y grietas disgregadas presentes en la fachada principal del Templo plasmadas en las areniscas.	60
33	Descamación en las areniscas causante de pérdida de material. Se aprecian manchones de mortero. En una de las rocas sobre sale una capa de la superficie original de la misma, típico aspecto de descamación en las areniscas.	61
34	El caliche presenta un color amarillo fuerte en sus bordes, señal de intemperismo alto, la mayoría de los sillares que se colocan en la parte del suelo se comportan como una tela, al momento en que llueve estos absorben el agua por capilaridad de abajo hacia arriba, son rocas que persisten menos al desgaste. Al lado derecho se puede observar una arenisca cubierta casi en su totalidad de una pátina en color blanca que corresponde a la cristalización de sales.	62
35	a) Capitel derecho de la fachada principal, muestra patina de color negro, siguiendo el patrón de las escorrentías del agua por el muro en donde se postra el atlante, manchones en los repisones inferiores, véase el crecimiento de vegetación, abundantes plantas, hongos y moho; b) Parte lateral de un muro (fachada lateral del Templo), en esta parte también se observa la pátina en color negro y abundante vegetación; c) Parte superior de los muros en la fachada lateral. Patina en color negro, daños mayores en las areniscas.	63

36	Simbología utilizada para la clasificación de deterioros.	64
37	Clasificación de deterioros por colores. En diferentes tonalidades de verde se observan predominantemente daños causados por decoloración. En color rosa, colonización biológica, en amarillo, pérdida de material por erosión, en rojo, agrietamiento y en gris, resanado o remodelaciones.	65
38	En diferentes tonalidades de verde se observan los daños por decoloración que afectan la mayor parte del campanario, las tonalidades más oscuras representan un daño más marcado. En color amarillo se observa la pérdida de material por erosión en uno de los moldes, seguido de un color gris que representa daño por remodelación en dónde fue utilizado mortero hecho a base de cemento portland y no de travertino. En la parte superior en color rojo la separación de material por agrietamiento, a la par de una fuerte decoloración en el travertino.	66

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Materiales Estudiados.	7
2	Clasificación de los deterioros presentes en el Templo, se les asignó un color diferente para su detección y grado de intensidad de los mismos.	23
3	Densidades obtenidas de las muestras de areniscas. Los datos de la muestra VE4 se obtuvieron en Alemania, mientras que los de las muestras A1 y A2, en México.	52
4	Densidades obtenidas de las muestras de travertino. Los datos de la muestra VE3 se obtuvieron en Alemania, mientras que los de las muestras T1 y T2, en México.	53
5	Porosidades efectivas obtenidas para las areniscas. Los datos de la muestra VE4 se obtuvieron en Alemania, mientras que los de las muestras A1 y A2, en México.	53
6	Porosidades efectivas obtenidas para el travertino. Los datos de la muestra VE3 se obtuvieron en Alemania, mientras que los de las muestras T1 y T2, en México.	53
7	Medidas en porcentaje de la distribución de poro en la muestra VE3.	54
8	Valores-w de acuerdo a Snethlage (2005), para las muestras de travertino y arenisca.	55
9	Datos obtenidos para la velocidad de ondas ultrasónicas en la arenisca VE4.	57

RESUMEN

El objetivo principal del presente estudio fue el identificar la litología y los daños más notables en el Templo El Señor de la Misericordia de Linares, N. L. A partir de la recolección de muestras, se realizaron estudios de propiedades mecánicas, químicas y petrográficas. El edificio de la iglesia El Señor de la Misericordia fue construido con travertino, travertino trabajado y areniscas. El travertino se encuentra principalmente en los arcos que rodean al campanario y en la torre del mismo. El travertino trabajado conforma prácticamente todas las molduras del templo, que son de tipo fitomórfico, antropomórfico y zoomórfico. Las areniscas brindan soporte a la estructura, y son las que representan la mayor parte del templo, se encuentran en los muros y contrafuertes del mismo. Los daños más frecuentes en el templo son los de decoloración, que se observan como una pátina en color negro tanto en el travertino como en las areniscas. A causa de la humedad se desarrolló el crecimiento de plantas en forma de colonización, principalmente en las zonas dónde se encuentran drenajes artificiales que se instalaron en el edificio para canalizar el agua de lluvia. Resanamiento es la aplicación de mortero en la estructura como parte de trabajos de remodelación, que se observa como plastas de color gris en algunas partes del edificio. Se analizó petrográficamente sólo un tipo de roca, misma que se compone principalmente de una matriz de arcillas, cuarzo y feldespatos, y que fue clasificada como una grauvaca feldespática, es decir, es un tipo de arenisca. En cuanto a los estudios petrofísicos, se obtuvo el promedio de la densidad aparente y de la matriz de las areniscas con valores de 2.6773 y 2.6776 g/cm^3 respectivamente, mientras que para el travertino fue de 1.514 y 2.404 g/cm^3 . Estos resultados nos indican que la arenisca es un buen tipo de roca para la construcción, contrario al travertino, considerándolo una roca inestable para los mismos fines. El porcentaje de porosidad promedio en la arenisca fue de 0.21%, mientras que en el travertino fue de 37.08%. La expansión hídrica para la arenisca y el travertino fue de: ± 0.1 y ± 0.5 mm/m , respectivamente. Los valores promedio de absorción de agua por capilaridad obtenidos para la arenisca son de 3.05 kg/m^2h . Para el travertino se obtuvo un valor de 22.15 kg/m^2h .

Los resultados de este trabajo indican que la estructura del edificio se encuentra en buen estado, tomando en consideración los materiales pétreos utilizados en su construcción. Se recomienda que en caso de un futuro mantenimiento o remodelación se utilicen exclusivamente los mismos materiales geológicos de las canteras explotadas originalmente.

ABSTRACT

The main objective of the present study was to identify lithology and the most significant damages in the “El Señor de la Misericordia” Church in Linares, N. L. Using selected samples, studies of mechanical, chemical and petrographic properties were carried out. The church was built with travertine, processed travertine and sandstone. The travertine is found mainly in the arches that surround the bell tower and in the tower. The processed travertine conform practically all the moldings of the temple. They are phytomorphic, anthropomorphic, and zoomorphic in style. The sandstones blocks give support to the structure, representing the most important volume of the walls and buttresses of the church. The most frequent damages in the temple are those of discoloration, which are observed as a black patina in the travertine as in the sandstones. Due to the humidity, the growth of plants in the form of colonization was developed, mainly in the areas where there are artificial rainwater drains that were installed in the building.

As part of the typical remodeling work is the application of mortar in the structure, which is seen as gray plasters in some parts of the building. Only one type of rock, which consists mainly of a matrix of clay, quartz and feldspars, was analyzed petrographically and was classified as a feldspatic graywacke, that is, a type of sandstone. As part of the petrophysical analysis, the average bulk and the matrix density for the sandstones were obtained, with values of 2.6773 and 2.6776 g/cm^3 respectively. On the other hand the travertine show values of 1.514 and 2.404 g/cm^3 . These results indicate that the sandstone is a suitable rock type for the construction, contrary to the travertine, considering it an incompetent rock for the same purposes. The percentage of average porosity in the sandstone was 0.21%, while in the travertine was 37.08%. The water expansion for sandstone and travertine is: ± 0.1 and ± 0.5 mm/m , respectively. The average value of water absorption by capillarity for the sandstone is 3.05 kg/m^2h . The travertine displays a value of 22.15 kg/m^2h . The results of this work indicate that the structure of the building is in good condition, taking into account the stone materials used in its construction. It is recommended that in the case of a future maintenance or remodeling, only the same geological materials from the originally exploited quarries should be used.

INTRODUCCIÓN

Linares es un municipio del estado de Nuevo León, ubicado en la parte central dentro de la "Región Citrícola". Su denominación actual proviene de su nombre antiguo Villa de San Felipe de Linares, cuya fundación se realizó el 10 de abril de 1712.

Este municipio cuenta con una riqueza arquitectónica representada por edificios importantes como el Palacio Municipal, la Catedral, la Parroquia del Sagrado Corazón, el Casino de Linares, el Colegio Modelo y el Templo El Señor de la Misericordia, este último considerado como el más antiguo de la ciudad, pero también es uno de los sitios religiosos de devoción católica más significativos del lugar.

El Templo El Señor de la Misericordia pertenece a la arquitectura religiosa de estilo barroco y cuenta con 190 años de antigüedad (tiempo considerado desde que comenzaron a realizarse los trámites necesarios para levantar la obra, en 1783).

La estructura externa de la obra está construida con diferentes materiales básicos y locales, como areniscas, sillar de caliche, arena de río, estuco, y ladrillo cocido (Espinosa *et al.*, 2009).

De acuerdo con King (2001) estos materiales son típicos para la arquitectura vernácula del noreste de México, utilizados en las construcciones de edificios históricos, haciendas y casas antiguas. Este estilo de arquitectura se encuentra presente a lo largo de todo el país, con infinidad de variantes en cuanto a historia, cultura y factores fisiográficos corresponde.

Se presume que las rocas que constituyen la edificación de dicho Templo, fueron extraídas de pequeñas canteras ubicadas en las cercanías de la ciudad, pertenecientes a la Planicie Costera del Golfo de México. A pesar de que no se tiene una documentación o algún tipo de archivo que asegure la procedencia exacta de las rocas, estas se relacionan litológicamente con dos canteras. La primera se ubica en la colonia "La Loma" al sur de la ciudad y la otra al norte, en las proximidades de la actual presa José López Portillo "Cerro Prieto".

En la actualidad, las construcciones antiguas de roca y sillar presentan una serie de daños físicos, químicos, mecánicos y antropogénicos, que con el paso del tiempo,

han afectado visual y funcionalmente las estructura y/u ornamentaciones, tal es el caso del Templo El Señor de la Misericordia que muestra notables afectaciones.

Para comprender y detallar el tipo de deterioro, en el presente trabajo se elaboró un mapeo, acerca de la litología y los daños más significativos, al igual que un análisis minucioso de las propiedades petrofísicas, en conjunto con el comportamiento que muestran las rocas a la resistividad de las lesiones en dicho edificio.

Es conveniente enfatizar que el presente trabajo retoma datos de un estudio previo realizado en el año 2016, y que por la importancia del tema, es profundizado con la generación de nuevos datos y nueva información.

Justificación

La necesidad de proteger los bienes que integran al Patrimonio Cultural, surge con la demanda de preservarlos de la destrucción indiscriminada que padecen tanto por la mano del hombre como por el paso del tiempo y los desastres naturales.

El patrimonio cultural es muy importante porque es lo que muestra la relación que existe de la gente con la historia y sus legados ancestrales, expresa tanto el pasado como su cultura, y es por eso mismo que se manifiesta tangiblemente como recurso intocable e irremplazable de un pueblo.

Los procesos para restaurar o rehabilitar este patrimonio es una tarea multidisciplinaria, en la cual se engloban Arquitectos, Ingenieros Civiles, Geólogos, Restauradores, entre otras profesiones. Es muy importante que las instituciones apliquen las medidas legislativas, administrativas, técnicas y financieras concebidas para proteger el patrimonio.

En el presente trabajo se expone como la Geología contribuye a la mejor toma de decisiones para la debida restauración en las rocas del Templo. Además se pretende dar a conocer los procesos de deterioro de las mismas, para así en un futuro pertinente planear una restauración adecuada al dicho edificio.

Objetivos

- Identificar la litología y los daños más notables en el Templo El Señor de la Misericordia, en base a detallados mapeos que permitirán extender y explicar los procesos de deterioro que ha sufrido la edificación a lo largo de los años.
- A partir de la recolección de muestras, realizar estudios de propiedades mecánicas, químicas y petrográficas, que ayudarán a entender el comportamiento de desgaste y/o resistencia de tales rocas a los distintos factores físicos, mecánicos, químicos y de actividad antropogénica, a los que estas han estado sometidas.

Metodología

Para la realización de este estudio, se seleccionó el edificio histórico El Templo El Señor de la Misericordia de Linares, N. L., construido en su totalidad de rocas sedimentarias y estuco. Se llevó a cabo trabajo de campo y de laboratorio, para determinar distintos parámetros tales como:

- Identificación litológica
- Mapa litológico
- Identificación de deterioros
- Mapa de deterioros (intensidades de los mismos)
- Densidad
- Porosidad
- Distribución de poro
- Propiedades hídricas
- Petrografía
- Difracción de Rayos X
- Velocidad de ondas ultrasónicas

a) Gabinete Inicial

Se acudió al edificio para realizar una inspección previa, que permitiera mediante la observación cuantificar las distintas rocas que conforman la fachada del Templo, y de la misma manera cualificar el tipo de daños y la intensidad de los mismos. Una vez conseguido esto, se procedió a la toma de fotografías. Estas fueron impresas y utilizadas como borrador de apoyo, permitiendo la elaboración de los mapas correspondientes.

Se recaudó el máximo de datos y/o documentos referentes a la propiedad, los cuales nos aportan un historial y conocimiento más amplio acerca del edificio, uno de los documentos recaudados fue el libro **“La Capilla del El Señor de la Misericordia”**, donado por cortesía del Museo de Historia de la ciudad (Espinosa *et al.*, 2009). Este nos habla acerca de la historia y descripción arquitectónica de la obra. En cuanto a la realización de los experimentos de laboratorio, fue necesario recolectar muestras en campo.

b) Trabajo de Campo

En esta etapa se efectuaron visitas tanto al Templo para la toma de fotografías y realización de mapeos, como a las canteras para la recolección de muestras *in situ*. Una vez llegado al lugar, en ambos sitios se utilizó el GPS para la obtención de coordenadas UTM. Se tomaron muestras frescas de diversos tamaños para la elaboración de polvos, empleados para las pruebas de rayos X, y fragmentos de roca para la elaboración de láminas delgadas, utilizadas para petrografía, y por último para cubos de $\sim 6 \text{ cm}^3$ usados en las pruebas petrofísicas.

c) Trabajo de Laboratorio

La preparación de láminas delgadas consistió en recortar muestras de mano, de los tipos de litologías presentes en el templo (travertino y areniscas, ver inciso d), con una cortadora disco marca MK (Figura 1A). El recorte fue pegado a un portaobjetos y posteriormente pulido y lijado en los discos pulidores (Figura 1B), hasta lograr un espesor de $\pm 35 \mu\text{m}$. Por último, se utilizaron polvos abrasivos (No. 800) para afinar

el lijado y de esta manera facilitar su observación en el microscopio polarizado *Motic* (Figura 1C), con el fin de realizar los estudios de petrografía.

En laboratorio usando un microscopio se realizó un conteo de 1,000 puntos por lámina para clasificar el tipo de arenisca estudiada, para este trabajo se eligió la clasificación de Pettijohn *et al.* (1987).

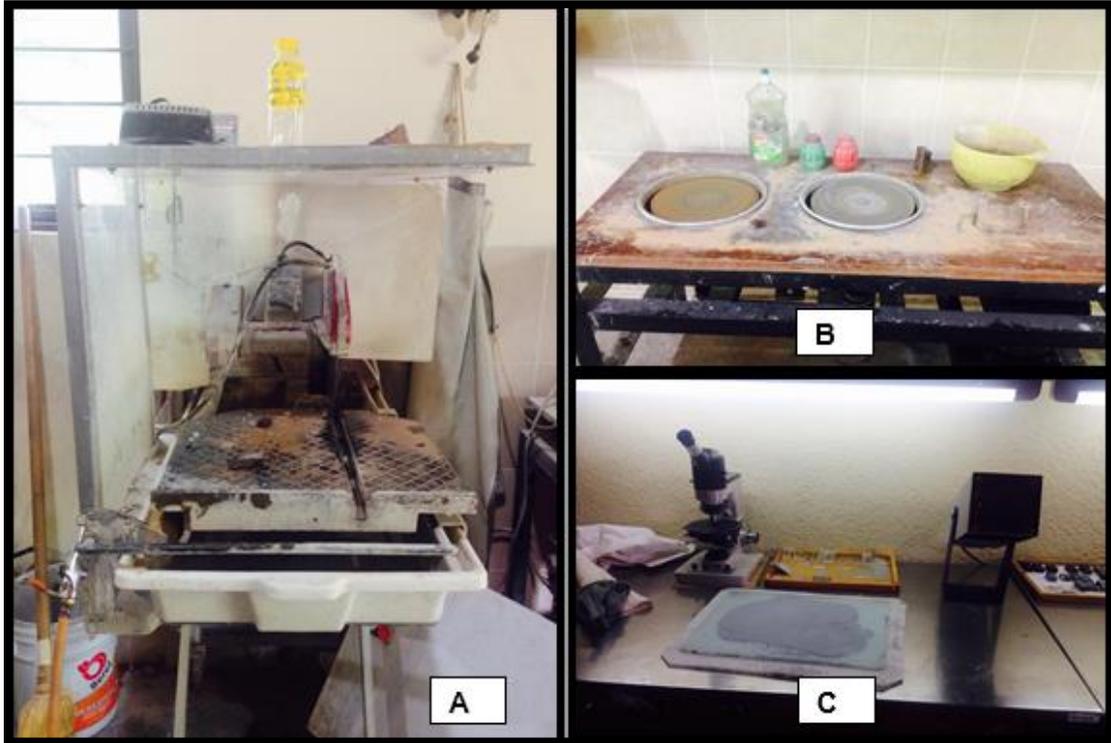


Figura 1 En esta imagen se presentan las herramientas necesarias para la elaboración de láminas delgadas. En la imagen (A); se encuentra la cortadora MK, en la imagen (B); se observan los discos pulidores y en la imagen (C); se muestra la última etapa en donde se pule la lámina con los polvos abrasivos, hasta que esta pueda observarse con claridad en el microscopio polarizado.

En cuanto a los estudios geoquímicos, se requirieron 200 g de polvo de cada muestra. Para ello se trituraron manualmente pequeños fragmentos de las rocas en un mortero de hierro, hasta obtener las partículas más pequeñas.

Para los análisis de propiedades de tipo físicas, en el primer estudio realizado en el año 2016, se recortaron dos cubos de $\sim 6 \text{ cm}^3$, en la cortadora de disco MK. El procedimiento se repitió actualmente en el 2017, generando cuatro cubos más con las mismas características. Todos los procedimientos antes mencionados se

efectuaron en la **Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León**.

En el primer estudio (2016) una vez obtenidos los cubos y el polvo, estos fueron enviados al Departamento de Geología Estructural y Geodinámica, en el **Centro de Geociencias de la Universidad de Göttingen, Alemania**, donde se realizaron las pruebas de tipo físicas (porosidad, densidad, distribución de poro, difracción de rayos X y velocidades ultrasónicas) (Figura 2).

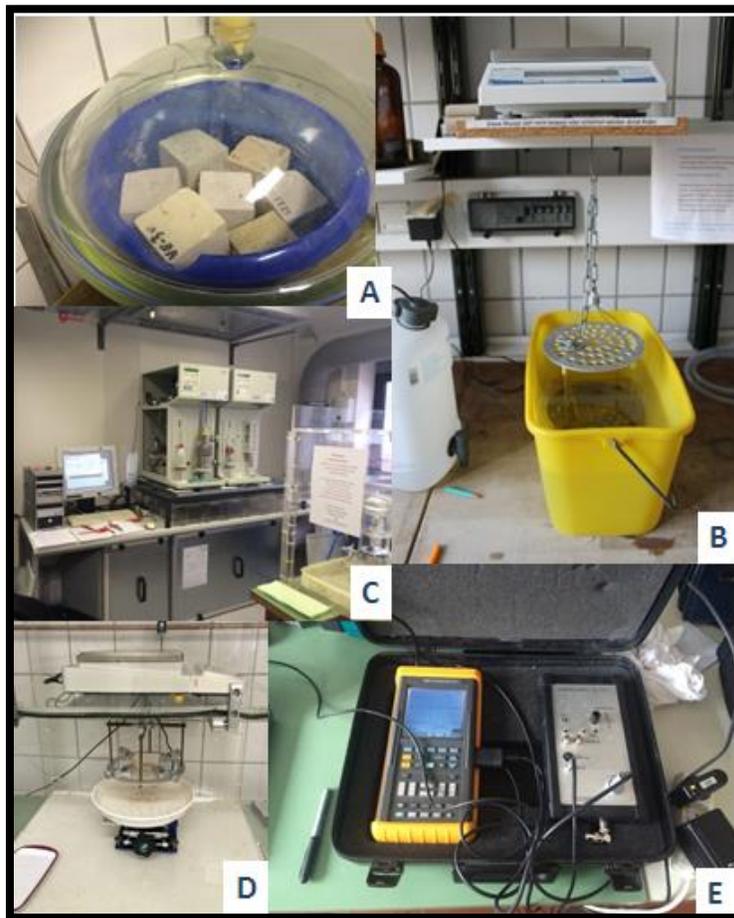


Figura 2 Trabajo de laboratorio con los distintos procesos a los que fueron sometidos las rocas (explicación en el texto).

Las muestras fueron sometidas a distintos experimentos, para el cálculo de densidad y porosidad, los cubos con medidas de $\sim 6 \text{ cm}^3$, se colocaron en un horno durante 24 hrs., con el fin de retirar la humedad. Una vez transcurrido dicho lapso las muestras se pesan (peso seco), y se colocan en la máquina extractora de aire (Figura 2A).

Siguiendo con el procedimiento de densidad, las muestras son sometidas al método de Arquímedes, con el cual se puede medir el empuje que actúa sobre la muestra una vez que está sumergida en agua destilada, para así, ser pesadas con saturación de agua en sus poros. Aquí se calcula el peso húmedo y sumergido de cada muestra (Figura 2B).

La distribución de poro fue determinada mediante un porosímetro de mercurio (Figura 2C), una pequeña parte de cada muestra (que solo llega a pesar pocos gramos) es introducida a esta máquina, la cual aplica una presión atmosférica de hasta 400 MPa

En la Figura 2D, se ejemplifica el experimento de absorción de agua de las rocas. En la máquina se coloca la muestra, mientras que la superficie de la misma está en contacto con el agua. Cada 5 segundos se toma el peso que esta tiene al absorber el líquido. Por último, la Figura 2E ilustra el aparato utilizado para calcular la velocidad ultrasónica en las que viajan las ondas transversalmente en las rocas.

En el segundo estudio, bajo los mismos procedimientos, se realizaron pruebas de densidad, porosidad, expansión hídrica, absorción al vacío y absorción de agua capilar en las muestras rotuladas como T1, T2 (travertino) y A1, A2 (areniscas), en el **Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí**.

d) Materiales Estudiados

Los materiales estudiados fueron obtenidos a partir de diversas canteras ubicadas en el municipio de Linares, N. L., así como del mismo edificio de la iglesia.

Tabla 1 Materiales Estudiados.

Litología	Origen	Abreviación
Arenisca	Cantera localizada cerca de la Presa "Cerro Prieto"	VE4
Arenisca	Iglesia El Señor de la Misericordia	A1
Arenisca	Iglesia El Señor de la Misericordia	A2
Travertino	Cantera localizada en la Col. La Loma, Linares, N. L.	VE3
Travertino	Iglesia El Señor de la Misericordia	T1
Travertino	Iglesia El Señor de la Misericordia	T2

e) Gabinete Final (uso de *Software*)

En esta última parte del trabajo, se interpretan los resultados que arrojaron las pruebas de laboratorio.

Para la elaboración de los mapas litológicos se utilizó el programa **Corel DRAW X8**. En estos mapas podemos observar el tipo de materiales que constituyen la fachada del Templo (travertino, areniscas y mortero). El mismo programa fue utilizado en el mapeo de deterioros, donde se representa en diferentes colores, el tipo y la intensidad de daños presentes.

El conocimiento del clima histórico en la ciudad es de suma importancia, ya que permite evaluar los cambios de temperatura y la cantidad de agua de las lluvias, entre otros aspectos climatológicos que afectan a la obra. Estos datos se consultaron en los sitios web (**inafed.gob.mx, 2015**) y (**atlasclimatico.unam.mx**). Con el programa **X'Pert HighScore Plus (PANalytical)** se interpretaron los datos obtenidos en la prueba de Rayos X, donde es comprobado mediante gráficas la cantidad de minerales presentes en las rocas, detectando el ángulo de difracción que estos arrojan al momento de ser sometidos a los mismos rayos.

Localización y vías de acceso

Linares se encuentra al sureste de la ciudad de Monterrey, en la región o provincia geológica Planicie Costera del Golfo de México. Se ubica en la parte central sur del estado de Nuevo León (Figura 3), a 280 msnm, y cuenta con una extensión territorial de 2,445.20 km².

La Sierra Madre Oriental (SMOr) cruza el municipio por el oeste, en donde se encuentran las zonas abruptas que se localizan en las estribaciones de la misma. El resto del territorio es generalmente plano con algunos lomeríos.

a) Localización del Templo El Señor de la Misericordia

El Templo se encuentra ubicado en la zona Centro de la ciudad de Linares, en el cruce de las calles Hidalgo y Gral. Anaya, entre las calles Protacio Rodríguez

Cuellar y Salvador Díaz Mirón (Figura 3), al lado del colegio católico Salesiano Modelo. Se ubica a 400 m al sur de la Presidencia Municipal.



Figura 3 Mapa del centro histórico de Linares, N. L., sitio donde se ubica el Templo El Señor de la Misericordia.

b) Localización cantera de areniscas

Coordenadas: 14R 0460525 E / 2757565 N

Esta cantera inactiva se localiza en la parte NE de la presa Cerro Prieto. Para llegar a este punto, se parte del Libramiento Vial Norte, sobre la carretera 85, dirigiéndose hacia el norte de la ciudad hasta llegar a la primera rotonda. Una vez ahí se gira a la derecha tomando la calle Lucio Blanco, y en el siguiente punto, se torna al noreste, prosiguiendo en la Av. Las Américas, ruta 36, hacia el norte. Se debe rodear la presa, hasta llegar al punto de extracción (Figura 4).

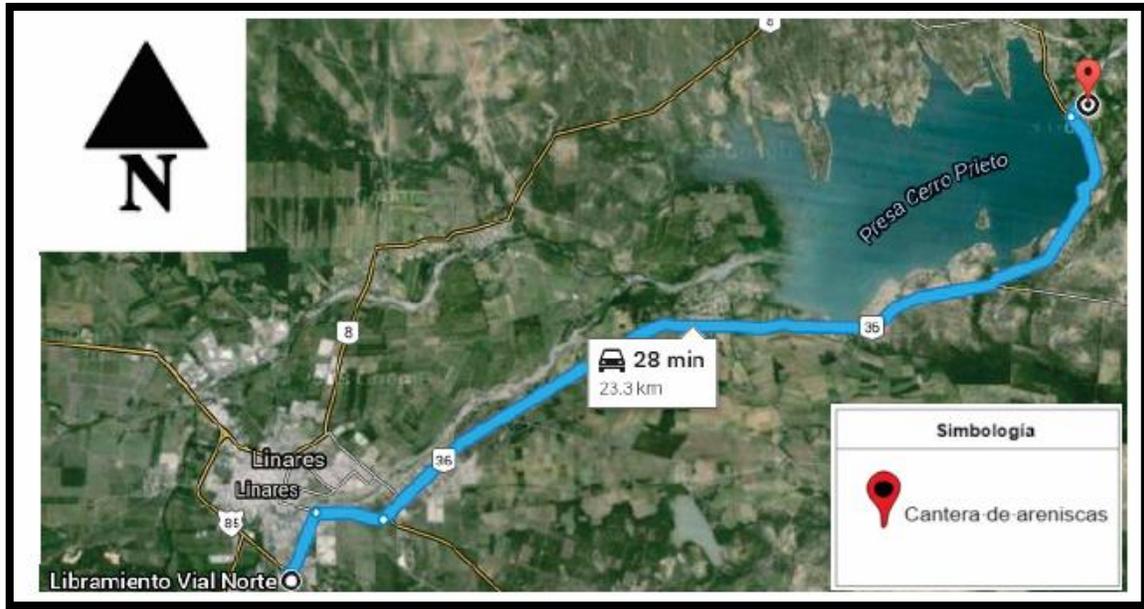


Figura 4 Mapa de la Presa Cerro Prieto, donde se encuentra ubicada la cantera de areniscas perteneciente a la Formación San Felipe (tomado y modificado de GoogleMaps 2015).

El área del recorte analizado, está compuesto mayoritariamente por paquetes horizontales de areniscas marrones, grises y rojizas que presentan alto grado de oxidación, con medidas alrededor de 40 cm de ancho. Estos se presentan interestratificados paralela y esporádicamente con capas delgadas en color verde de cenizas volcánicas alteradas de aproximadamente 5 cm de grosor. La zona está comprendida por un recorte semicircular por abajo del nivel de suelo formando una pequeña fosa con medidas de 3 m de profundidad a 15 m de ancho aprox. Por encima del recorte se puede apreciar una capa delgada e intemperizada del suelo lutítico perteneciente a la Formación Méndez (Figura 5).

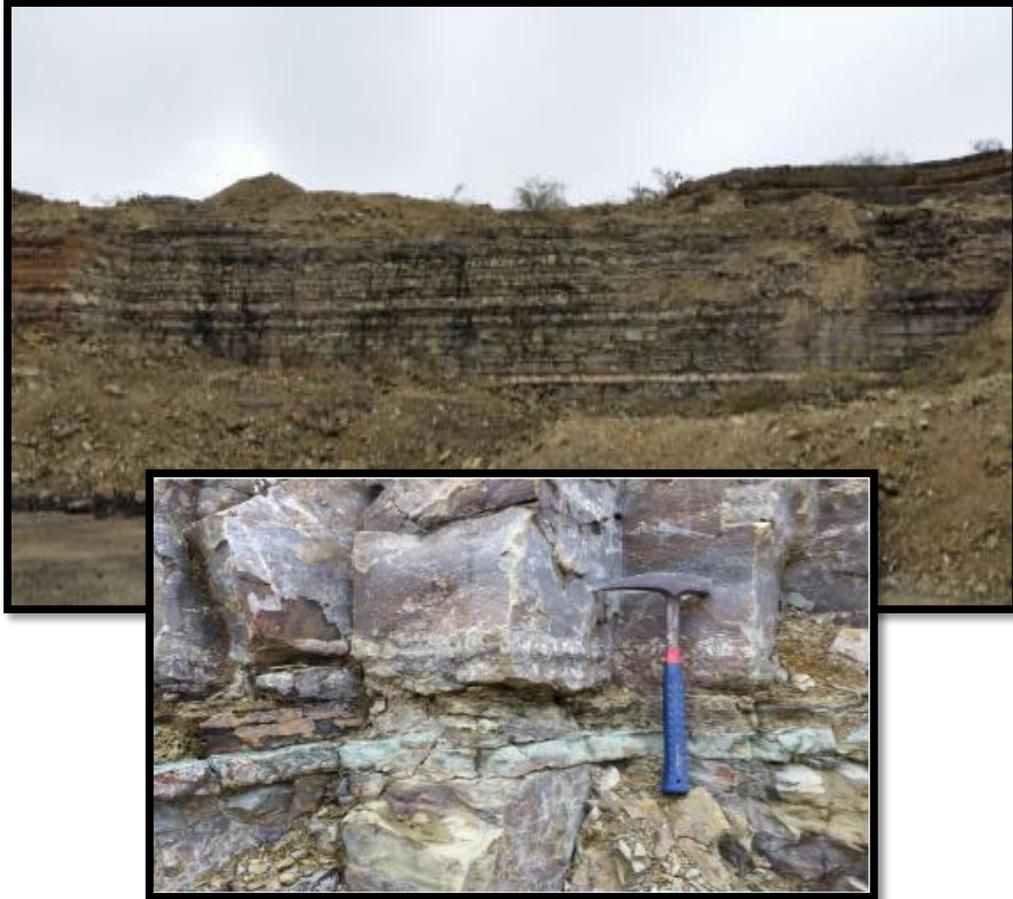


Figura 5 Cantera inactiva de areniscas intercaladas con cenizas volcánicas alteradas (horizonte verde) pertenecientes a la Formación San Felipe, lugar donde se extrajeron muestras frescas para pruebas de laboratorio, zona ubicada en las cercanías a la presa Cerro Prieto.

c) Localización cantera de travertino

Coordenadas UTM: 14R 0441151 E / 2746306 N

Partiendo de la presidencia municipal con dirección al sur, sobre la calle Hidalgo, hasta intersectar con la carretera Villagrán-Linares, se continúa por la calle Matehuala-Niños Héroe, ruta 58. Se sigue en línea recta hasta llegar a la calle Félix U. Gómez, donde se torna a la izquierda para llegar a la Planta de Agua Jesús González SN-S, donde a escasos metros se encuentra la pequeña cantera inactiva. El recorrido es de 14.9 km (Figura 6).



Figura 6 Mapa de la parte sur del municipio de Linares, en color azul se indica el recorrido para llegar a la cantera de sillar, ubicada a lado de la Planta de Agua Jesús González SN-S (modificado de GoogleMaps, 2015).

En el sitio se observó un recorte transversal realizado en las partes altas de las paredes de los lomeríos, donde se pudo apreciar una capa del suelo de color blanco a tonos amarillos, con alto grado de intemperismo, al punto de sufrir desmoronamientos al simple tacto. Aún se aprecian las marcas de extracción.

El recorte presenta dos tipos de texturas, en la parte superior la vegetación y los factores de intemperismo afectaron al suelo saturándolo de materia orgánica así mostrando una textura menos consolidada, mientras que en la parte inferior el suelo se aprecia esta costra más compactada o consistente (Figura 7).



Figura 7 Recorte transversal de la loma, en la imagen se puede observar los dos tipos de texturas que muestra el caliche. Las manchas de escorrentías de agua se hacen presentes en color negro a gris oscuro, ocasionadas por el agua producto de la vegetación del lugar. Estas manchas son similares a las que se presentan en las rocas que conforman el Templo. Zona ubicada en la colonia “La Loma” al sur de la ciudad de Linares.

1.- GENERALIDADES

1.1.- Meteorología

El clima en el municipio de Linares se describe como semicálido-subhúmedo con lluvias en verano, y su precipitación promedio es de 70 mm, con un régimen de lluvias en los meses de abril, mayo, agosto, septiembre y octubre. La dirección predominante del viento es del este. Las temperaturas frías promedio van desde los 13°C y se presentan en los meses de noviembre, diciembre y enero; mientras que las máximas van desde los 30°C, siendo los meses de julio y agosto los más calurosos (Inafed, 2015).

Por medio de la página atlasclimatico.unam.mx se obtuvieron los datos históricos de las temperaturas promedio máximas, mínimas y la precipitación en milímetros de los años 1902 al 2011, con la finalidad de tener una idea del clima al que se ha expuesto el edificio a lo largo de 109 años.

Las temperaturas promedio mínimas en los años 1902-2011, van desde los 7°C a los 23°C, presentándose las más bajas en la estación invernal que comprende a los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre. En comparación, el año 2016, las temperaturas van desde los 6°C, para el mes de diciembre, hasta los 22°C (Figura 8).

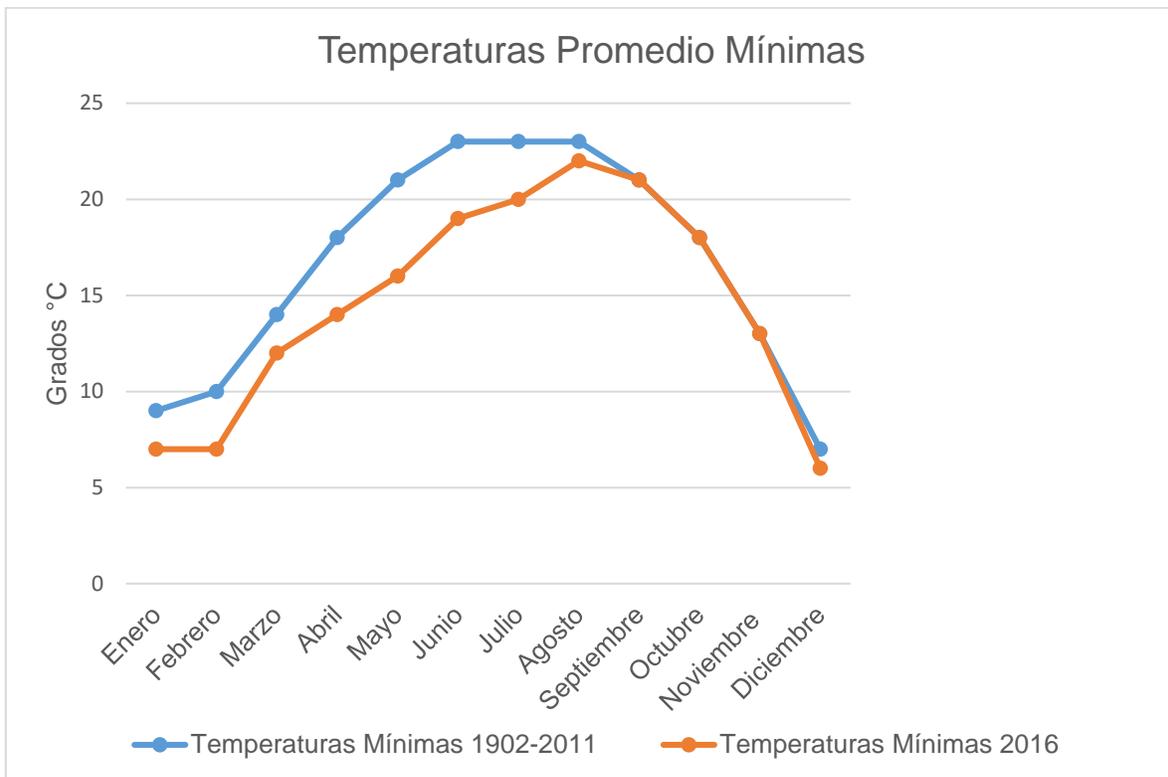


Figura 8 Comparación de las temperaturas promedio mínimas de los años 1902-2011 vs. 2016 (tomado de atlasclimatico.unam.mx, 2016).

Las temperaturas máximas promedio que se registran en la siguiente gráfica en el periodo 1902-2011, van desde los 22°C a los 38°C. Los meses más calurosos son, junio, julio y agosto. En el lapso del mes de marzo a junio se nota un ascenso muy marcado de 8°C, empezando así los meses más calurosos. En comparación con el

periodo del año 2016 las temperaturas máximas van desde los 17°C a los 35°C, siendo los meses más calurosos junio y julio, ambos con 35°C (Figura 9).

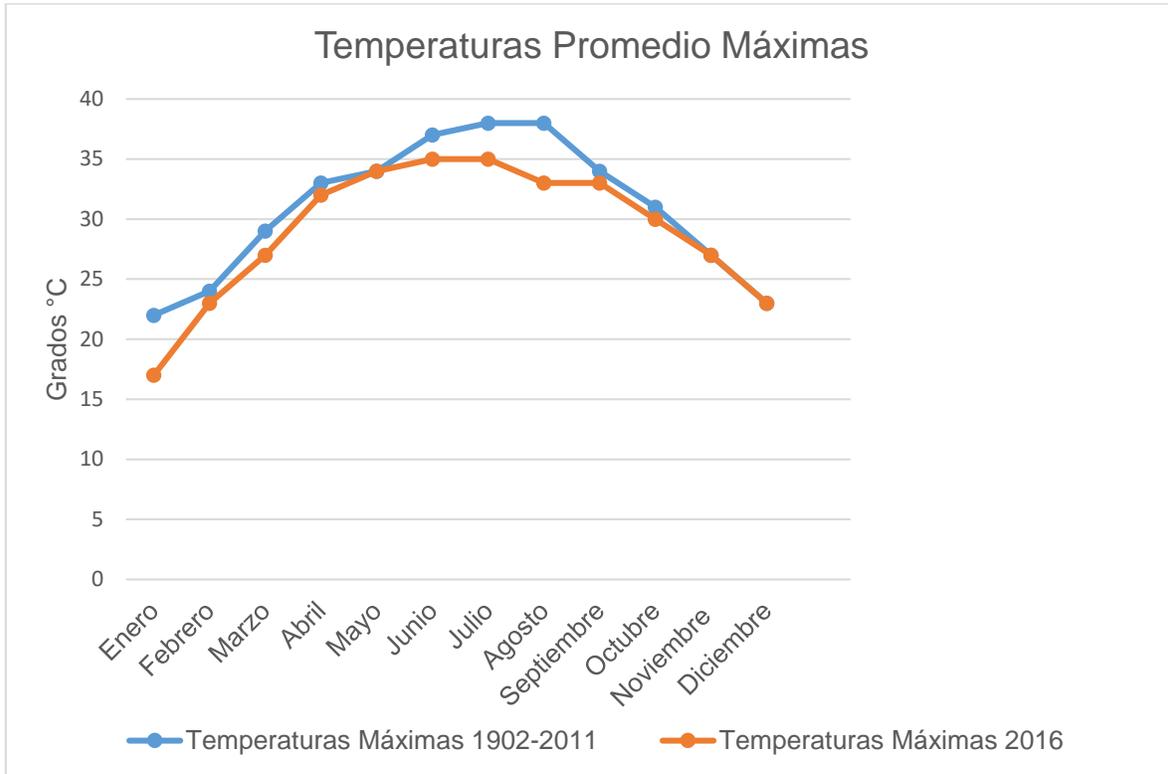


Figura 9 Comparación de las temperaturas promedio máximas de los años 1902-2011 vs. 2016 (tomado de atlasclimatico.unam.mx, 2016).

1.2.- Tipos de Deterioro

Los materiales pétreos colocados en un edificio o monumento, y expuestos a condiciones climáticas, tienden a deteriorarse como consecuencia de la combinación de diversos procesos químicos, físicos y biológicos (Alonso *et al.* 2006). A continuación se hace mención de los tipos de deterioro y/o agentes deteriorantes a los que está expuesto el Templo El Señor de la Misericordia.

1.2.1.- Deterioros Físicos

Son todos aquellos en que la problemática patológica se produce a causa de fenómenos físicos como heladas, condensaciones, etc. y normalmente su evolución dependerá también de estos procesos físicos. Las causas físicas más comunes son:

a) Agua

El agua es, por sí misma, uno de los más importantes agentes de alteración, al tiempo que sirve de vehículo para las acciones deteriorantes de otros agentes. Los efectos o daños ocasionados por el agua (humedad) en sus diversas formas (vapor, líquido, hielo) son básicamente de dos tipos: químicos y físicos (mecánicos).

En el primer caso, el agua interviene en los principales procesos químicos que afectan a las rocas (disolución de carbonatos, hidrólisis de silicatos, reacciones de oxidación reducción, hidratación, etc.)

En el segundo caso, cuando el agua retenida en los poros de las rocas se congela aumenta su volumen (~ nueve veces) y, en consecuencia, ejerce sobre las paredes de los poros una presión que, tras repetidos ciclos de hielo-deshielo, puede llegar a originar importantes daños físicos en la roca (Alonso *et al.* 2006).

b) Humedad

Se produce cuando hay una concentración de agua en un porcentaje mayor al considerado como normal en un material o elemento constructivo. Esta pueda llegar a producir variaciones de las características físicas de dicho material.

c) Erosión Atmosférica

Es la pérdida o transformación superficial de un material, y puede ser total o parcial. Producida por la acción física de los agentes atmosféricos, generalmente se trata de la meteorización de materiales pétreos provocados por la succión de agua de lluvia que, si va acompañada por posteriores heladas y su consecuente dilatación, rompe láminas superficiales del material constructivo (Alonso *et al.* 2006).

d) Suciedad

Es el depósito de partículas en suspensión sobre la superficie de las fachadas. En algunos casos puede incluso llegar a penetrar en los poros superficiales de dichas fachadas. Podemos distinguir dos tipos de suciedad:

- Suciedad por Depósito:

Es el producido por la simple acción de la gravedad sobre las partículas en suspensión en la atmósfera.

- Suciedad por Lavado Diferencial:

Partículas ensuciantes que penetran en el poro superficial del material por acción de lluvia y que tiene como consecuencia más característica los escurrimientos de manchas que se aprecian en las fachadas urbanas (Monjo Carrió, 1998).

1.2.2.- Deterioros Mecánicos

Aunque las lesiones mecánicas se podrían englobar entre las lesiones físicas puesto que son consecuencia de acciones físicas, suelen considerarse un grupo aparte, debido a su importancia. Definimos como deterioro mecánico a aquel en el que predomina un factor mecánico que provoca movimientos, desgaste, aberturas o separaciones de materiales o elementos constructivos. Podemos dividir este tipo de deterioros en cinco apartados diferentes:

a) Deformaciones

Son cualquier variación en la forma del material, son consecuencias de esfuerzos mecánicos, que a su vez se pueden producir durante la ejecución de una unidad o cuando está en carga. Entre este tipo de daños diferenciamos seis subgrupos que a su vez pueden ser origen de lesiones secundarias como fisuras y desprendimientos.

b) Grietas

Se trata de aberturas longitudinales que afectan a todo el espesor de un elemento constructivo. Conviene aclarar que las aberturas que solo afectan a la superficie o acabado superficial superpuesto de un elemento constructivo no se consideran grietas sino fisuras. Dentro de las grietas, y en función del tipo de esfuerzos mecánicos que las originan. Por exceso de carga se pueden formar grietas que afectan a elementos estructurales al ser sometidos a cargas para las que no estaban diseñados. Este tipo de grietas requieren, generalmente, un refuerzo para mantener la seguridad.

c) Fisuras

Aberturas que afectan a la superficie o al acabado de un elemento constructivo. Aunque su sintomatología es similar a las de las grietas, su origen y evolución son distintos y en algunos casos se consideran una etapa previa a la aparición de las grietas.

d) Desprendimiento

Es la separación entre un material de acabado y el soporte al que está aplicado por falta de adherencia entre ambos, y suele producirse como consecuencia de otras lesiones previas, como humedades, deformaciones o grietas. Los desprendimientos afectan tanto a los acabados continuos como a los acabados por elementos, a los que hay que prestar atención especial porque representan un peligro para la seguridad del usuario de las calles y edificios.

e) Pérdida de Material

Mediante la observación de la fábrica de la roca podemos determinar los puntos en los que se puede detectar falta de material, anotando su localización, profundidad de la pérdida y área afectada.

f) Erosiones Mecánicas

Son las pérdidas de material superficial debidas a esfuerzos mecánicos, como golpes o rozaduras. Aunque normalmente se producen en el pavimento, también pueden aparecer erosiones en las partes bajas de fachada y tabiques, e incluso en las partes altas y cornisas, debido a las partículas que transporta el viento.

g) Deplacado, Exfoliación y Descamación

Se trata de la separación superficial de láminas paralelas o escamas entre sí. Esta forma de alteración se observa con frecuencia en los sillares situados en las zonas más bajas de los edificios debido a la presencia de agua (Serrano Alcudia, 1998).

1.2.3.- Deterioros Químicos

Son los daños que se producen a partir de un proceso patológico de carácter químico, y aunque este no tiene relación alguna con los restantes procesos patológicos y sus lesiones correspondientes, su sintomatología en muchas ocasiones se confunde (Arnold y Zehnder, 1989).

A corto plazo las rocas de edificación suelen verse afectadas por la presencia de soluciones acuosas conteniendo sales solubles de diversa naturaleza (principalmente sulfatos, nitratos y cloruros de calcio, sodio, potasio y magnesio; Arnold y Zehnder, 1989).

Estas sales pueden ser inherentes a la propia composición del material rocoso (yeso en margas o calizas), o extrínsecas al mismo, ya procedan del suelo, de otros materiales de construcción (morteros), de la interacción de minerales con contaminantes atmosféricos o aerosoles marinos, o incluso derivadas de ciertos tratamientos de conservación (Esbert *et al.*, 1991).

Las sales solubles dan lugar a eflorescencias o criptoflorescencias al cristalizar en la superficie de la roca, cerca de ella o en el interior de la misma. También suelen acumularse en el exterior en forma de costras o depósitos superficiales.

Además, las presiones ejercidas por la cristalización de sales solubles en el interior de poros y microfisuras de la roca puede originar fenómenos disruptivos, sobre todo en aquellos materiales con mayor abundancia de microporos, dando lugar a diferentes formas de deterioro físico-químico (especialmente alveolización y arenización; Binda y Baronio, 1987).

a) Alveolización

Los alvéolos se originan por desintegración y posteriormente separación de los granos de arena de la matriz de los materiales porosos, produciendo unos surcos que van progresando en extensión y profundidad.

b) Eflorescencias

Se trata de un proceso patológico que suele tener como causa directa previa la aparición de humedad. Los materiales contienen sales solubles y estas son

arrastradas por el agua hacia el exterior durante su evaporación y cristalizan en la superficie del material.

Esta cristalización suele presentar formas geométricas que recuerdan a flores y que varían dependiendo del tipo de cristal. Presente dos variantes:

- Sales cristalizadas bajo la superficie del material:

En oquedades, que a la larga acabaran desprendiéndose. Este tipo de eflorescencia se denomina criptoflorescencia.

- Sales cristalizadas que no proceden del material:

Sobre el que se encuentra la eflorescencia sino de otros materiales situados detrás o adyacentes (Arnáiz & Martin, 1977).

1.2.4.-Otros Agentes

Contaminantes Atmosféricos

La capacidad agresiva del agua, como agente de alteración química, puede verse sensiblemente incrementada por la presencia de sustancias contaminantes atmosféricas.

Entre los contaminantes que, en principio, pueden afectar, directa o indirectamente, la durabilidad de las piedras de construcción, se encuentran: óxidos de carbono, óxidos de nitrógeno y compuestos de azufre, gran parte de los cuales provienen de fuentes de inmisión antropogénicas (fundamentalmente de la combustión de combustibles fósiles; Arnáiz & Martin, 1977).

En presencia de humedad, estas sustancias atacan los componentes de las rocas, dando lugar a la formación de sales solubles, cuyos efectos negativos han sido ya mencionados. En este sentido, son las áreas urbanas e industriales, en las que mayores índices de contaminación se han alcanzado en las últimas décadas, donde el deterioro de los materiales pétreos se ha visto más acelerado, si bien los efectos de dichas sustancias pueden extenderse también a las áreas rurales, a través de las lluvias acidas (Rosvall, 1988).

Organismos

Tantos los organismos animales como vegetales pueden llegar a afectar a la superficie de los materiales. Principalmente, el excremento de las palomas contiene compuestos químicos como nitratos, sulfatos y sulfitos, que sirven de medio de cultivo para el desarrollo de hongos y bacterias capaces de crear condiciones favorables para que microorganismos que pueden vivir sin oxígeno (anaeróbicos), entren en función, deteriorando la pintura, los aplanados y la roca.

Animales

Suelen afectar, y en muchas ocasiones deteriorar, los materiales constructivos, sobre todo, los insectos que a menudo se alojan en el interior del material y se alimentan de este, pero también los considerados animales de peso, como las aves o pequeños mamíferos que causan principalmente daños erosivos.

Plantas

La acción biológica de estos organismos vivos (bacterias, algas, hongos, líquenes, etc.), a partir, sobre todo, de los productos químicos generados por ellos (ácidos orgánicos), coadyuva, en ocasiones, al deterioro físico-químico de los materiales rocosos (Valentín, 1990).

No siempre, sin embargo, la presencia de organismos en la roca debe suponer necesariamente un daño para la misma, al margen de apreciaciones estéticas (Krumbein, 1988).

Rayaduras

Son aquellas que son realizadas por el hombre, pueden presentarse rayaduras de tintas, pintura de marcadores y/o navajas, entre otros.

Decoloración

Se observa principalmente en las zonas de drenaje, o dónde se concentra la mayor parte de humedad, como manchas o pátinas en color oscuro, la mayoría de las veces generadas por el crecimiento de organismos.

Resanamiento

Son todas las manchas o capas que se puedan observar en el edificio, con contenido de cemento, cal, o cualquier tipo de resanamiento por medidas de restauración.

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.

En cualquier caso, la mayor o menor susceptibilidad al deterioro de una roca de construcción depende no sólo de las características intrínsecas de material (mineralogía, textura, porosidad, etc.), a las que se ha hecho ya referencia, sino también de los agentes y factores extrínsecos actuantes en cada caso. Así, por ejemplo, un mismo material pétreo se comporta, de hecho, en el mismo período de tiempo, de forma distinta en función de su ubicación en el edificio y de las condiciones microambientales del lugar (Esbert *et al.*, 1991).

A continuación se presenta una categorización que conjunta los tipos de deterioro citados anteriormente, con el fin de ordenar y facilitar la identificación de los daños del Templo (Tabla 2). Esta clasificación fue la utilizada en el presente trabajo.

Tabla 2 Clasificación de los deterioros presentes en el Templo, se les asignó un color diferente para su detección y grado de intensidad de los mismos.

DETERIORO	COLOR
AGRIETAMIENTO Sepultamiento Fisuras	ROJO
PÉRDIDA DE MATERIAL Erosión	AMARILLO
DECOLORACIÓN Costras Corteza Pátina	VERDE
COLONIZACIÓN Animales Hongos Plantas Moho	ROSA
RAYADURAS	NARANJA
RESANADO / REMODELACIÓN	GRIS

INTENSIDAD DE DETERIORO	
100%	
75%	
50%	
25%	
5%	

1.3.- Marco Teórico

1.3.1.- Propiedades Petrofísicas

a) 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.

En las rocas carbonatadas existe una clara diferencia entre la densidad de matriz (ρ_{Matrix}) y la densidad aparente (ρ_{Bulk}) caso contrario para las areniscas en donde ambas densidades son casi similares, esto debido a las diferencias de porosidad presentes en ambos tipos de roca.

b) 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 en Siegesmund y Snethlage, 2011). Todos los huecos, espacios o cavidades en una roca pueden ser clasificados bajo el término 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 sólidas (granos, minerales, etc.). Los poros entre las partículas sólidas son llamados "interpartícula", mientras que los poros dentro de una partícula de roca sólida son llamados "intrapartícula" 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 geoméricamente 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 (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:

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

Ecuación 3

Donde r_p es el radio de entrada del poro de un poro capilar, γ la tensión superficial en la interface líquida, θ el ángulo de contacto líquido-sólido, y P la presión aplicada. La ecuación se basa en el principio de que cada radio de poro capilar se caracteriza 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 $\theta > 90^\circ$.

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, 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.

Fitzner y Kownatzki (1991), Fitzner y Basten (1994), Meng (1993) y Heinrichs (2005) *en* Siegesmund y Snethlage (2011), 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).

c) 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 espontáneo 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 rearrreglo del proceso involucrado. Los poros más pequeños entonces incrementarían 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 $[(kg/(m^2 h^{0.5}))]$. Se determina en el laboratorio usando un espécimen cúbico de roca 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 significativo 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:

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

Ecuación 4

En donde m_w es la absorción de agua relacionada a la superficie (kg/ m^2) y 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 lineal. 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:

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

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 ($w < 0.5 \text{ kg/m}^2/\text{h}$), medianamente absorbentes ($w < 0.5-3.05 \text{ kg/m}^2/\text{h}$), y altamente absorbentes ($w > 3.05 \text{ kg/m}^2/\text{h}$).

d) 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 hídrica periódica o estacional de una roca debido a los factores climáticos del ambiente.

El proceso de dilatación hídrica 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 hídrica como función de la humedad relativa (HR) muestra variaciones dependiendo del material.

En muchas ocasiones, la expansión hídrica es la responsable por los daños vistos en las rocas. La combinación de una hinchazón hídrica 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.

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.

1.4.- Marco Geológico

Las unidades litológicas (areniscas y travertino) del Templo El Señor de la Misericordia son propias de la Planicie Costera del Golfo de México. Las unidades que afloran son del Cretácico Superior y del Cuaternario.

1.4.1.- Geología Regional

Las areniscas de la Formación San Felipe se formaron en el Cretácico Superior. Al comienzo del Cretácico las áreas continentales que existieron, fueron cubiertas por mares en diferentes tiempos, lo que hizo que se desarrollaran bancos y plataformas evaporítico-carbonatadas (Eguiluz, *et al.*, 2000). Así mismo durante el Coniaciano-Santoniano se incrementó la actividad volcánica en el occidente de México lo cual afectó a la sedimentación marina del Golfo de México, continuando el depósito de capas delgadas de calizas y lutitas, con abundantes horizontes de cenizas alteradas de la misma Formación San Felipe. Sobreyaciendo a la Fm. San Felipe, se encuentra la Fm. Méndez, de edad Cretácico Tardío. Esta unidad consiste de un depósito uniforme de lutita gris-azul de varios metros de espesores, con borde interno arcilloso a semi-margoso; toda la secuencia consiste de marga y algunas capas irregulares de arenisca y caliza (Jeffreys, 1910 *en* Palmer, 1927).

Desde el Cenomaniano al Maastrichtiano, la paleogeografía y facies de la región del Golfo de México, cambiaron drásticamente como resultado de la deformación Laramide, lo cual formó estructuras plegadas, dando origen a la Sierra Madre Oriental (SMOr, Padilla & Sánchez, 1982; Goldhammer & Johnson, 2001). Sin embargo, el área de estudio se localiza al oriente de esta provincia. Las unidades sedimentarias del Cretácico Superior muestran plegamientos muy suaves, con estratificaciones prácticamente horizontales, excepto en algunas regiones donde se localizan pequeños pliegues. Esto hace que la topografía de la región sea prácticamente horizontal. Sobre estas unidades se acumularon depósitos fluviales

y aluviales, producto de la erosión de las rocas de SMO. El Paleógeno y el Neógeno no están representados en la zona, por lo que se considera un prolongado hiatus por la no depositación/erosión.

1.4.2.- Geología Local

Formación San Felipe (Cretácico Superior)

Fue descrita inicialmente por Jeffreys (1910). Posteriormente Muir (1936) e Imlay (1944) la describieron como intercalaciones de caliza gris, interestratificada con margas con bandas lenticulares de pedernal negro y caliza parduzca que indican la base. Muir (1936) definió formalmente a esta formación en la localidad San Felipe, ubicada a 8 Km. al este de Ciudad Valles, San Luis Potosí.

Esta unidad ha sido dividida en dos miembros: (a) Inferior La Boca, una intercalación de arenisca verde, limolita y caliza, con un espesor de 32 m; y (b) Superior Solís, definiéndolo como una secuencia de caliza de color blanco que intemperiza a color verde, capas delgadas de pedernal gris e intercalación de arenisca verde, limolita, lutita y caliza, correspondiente al Cretácico Superior.

La Formación San Felipe, en Nuevo León, constituye una secuencia turbidítica, donde los sedimentos representan un ambiente deposicional de base de talud y cuenca. Una de las secuencias turbidíticas más característica se encuentra ubicada en Villa de Santiago, al lado Este de la Presa La Boca (Seibertz, 1988).

En el presente trabajo no se presenta la definición de la Formación Méndez, en virtud que no fue utilizada en la construcción del Templo.

Travertino (Neógeno-Cuaternario)

El travertino se define como una roca sedimentaria de origen parcialmente biogénico, formada por carbonato de calcio. En la región, su origen tiene lugar durante la transición del pre-Cuaternario al Cuaternario. La columna del tiempo geológico que representa a estas etapas, comprende unidades del Pleistoceno al Holoceno.

Su formación debe a la depositación de carbonato de calcio impuro al aflorar manantiales. En el ámbito de la construcción se le conoce como sillar de agua, por su uso en mamposterías toscas y ornamentación (Polanco Madrazo, *et al.* N.A.).

1.5.- Marco Histórico-Arquitectónico del Templo El Señor de la Misericordia

1.5.1.- Historia

La descripción de la historia del Templo El Señor de la Misericordia se transcribe de Espinosa *et al.*, (2009):

“El Templo, construcción cuya edificación corresponde a la época colonial tardía y primeras décadas del México independiente, es uno de los pocos templos que fueron erigidos expresamente para uso público en el noreste de México y que todavía se encuentra en funciones. Esta obra pía, fue establecida a perpetuidad en el año 1783 por doña Agustina Ignacia del Valle, vecina originaria de la ciudad de Linares.

El 21 de mayo de 1783 se elaboró un documento en Villa de Santiago del Saltillo (lugar en el que residía la sede vacante de la diócesis), donde se acepta la donación de doña Agustina, para que en terreno propio y a sus propias costas, pudiera “fabricar” este Templo, al que sería trasladado el Santísimo Cristo de la Misericordia (el cual se encontraba en la iglesia parroquial) estableciendo ahí su culto.

Acerca de la imagen del Cristo Crucificado se conoce muy poco, cuya procedencia y factura nada se sabe. Tras la muerte de la benefactora, en el año de 1789, el capitán Julián Antonio Valdez, junto con su padre don Ignacio del Valle se encargaron de terminar esta obra.

Como toda obra de cierta envergadura emprendida en el pasado, el Templo no pudo levantarse de un solo impulso constructivo. Es por ello que en su programa arquitectónico y ornamental es posible percibir cierto eclecticismo que responde precisamente al hecho de que la obra comenzó cuando el Barroco era aún (aunque no debería) el estilo en provincia del noreste de México. No se sabe con exactitud cuándo terminó la obra, pero es posible que esto ocurriera al comenzar la segunda

década del siglo XIX. En 1833 la imagen del Cristo fue trasladada al Templo y en esta fecha se presume el desenlace de la construcción de la obra”.

1.5.2.- Descripción Arquitectónica

El Templo fue construido entre 1825 a 1834 (período que se inserta la arquitectura neoclásica europea), en su ornamentación barroca nos muestra el estilo dominante del virreinato español del siglo XVII y el acento vernacular del noreste de México. Los muros, contrafuertes y cimientos se fabricaron a base de mampostería de roca arenisca de la Formación San Felipe del Cretácico Superior y de sillar extraído de lomeríos cercanos a la ciudad del pre-Cuaternario al Cuaternario. Estos representan materiales de construcción de la región. La edificación muestra una portada principal que está compuesta por tres cuerpos: dos unidades rectangulares horizontales sobre puestas y una vertical que remata con una torre campanario (Figura 10).



Figura 10 Fachada principal del Templo. Las líneas en color rojo muestran los dos cuerpos rectangulares horizontales y las líneas en color azul muestran el cuerpo vertical que representa el campanario.

El primer cuerpo horizontal está dividido en tres partes, en el centro se encuentra la puerta principal (Figura 11) rematada por un arco de medio punto. La puerta está flanqueada por dos pilastras con ornamentación antropomórfica donde se pueden observar dos de los cuatro atlantes que conforman la fachada.

En medio de cada par de pilastras se presentan hornacinas con arcos de medio punto en forma de concha marina estilizada y dos pequeños repisones arriba de estas. Divide a este cuerpo bajo del superior, un cordón de rica ornamentación fitomórfica que evidencia la influencia del Barroco.



Figura 11 Puerta principal del Templo en la actualidad. Las líneas en color rojo muestran el cordón de ornamentación fitomórfica, mientras que las líneas en color azul muestran el par de pilastras con ornamentación antropomórfica.

Los atlantes postrados en la fachada principal presentan una sencilla vestimenta definida solamente por un escaso trazo de bajo relieve. Las cabezas de la parte superior están rematadas por tocados fitomórficos de influencia románica como capiteles. Los pies se muestran en el apoyo sobre los basamentos. En su parte exterior contiene ornamentación zoomórfica y en la interior fitomórfica (Figura 12).

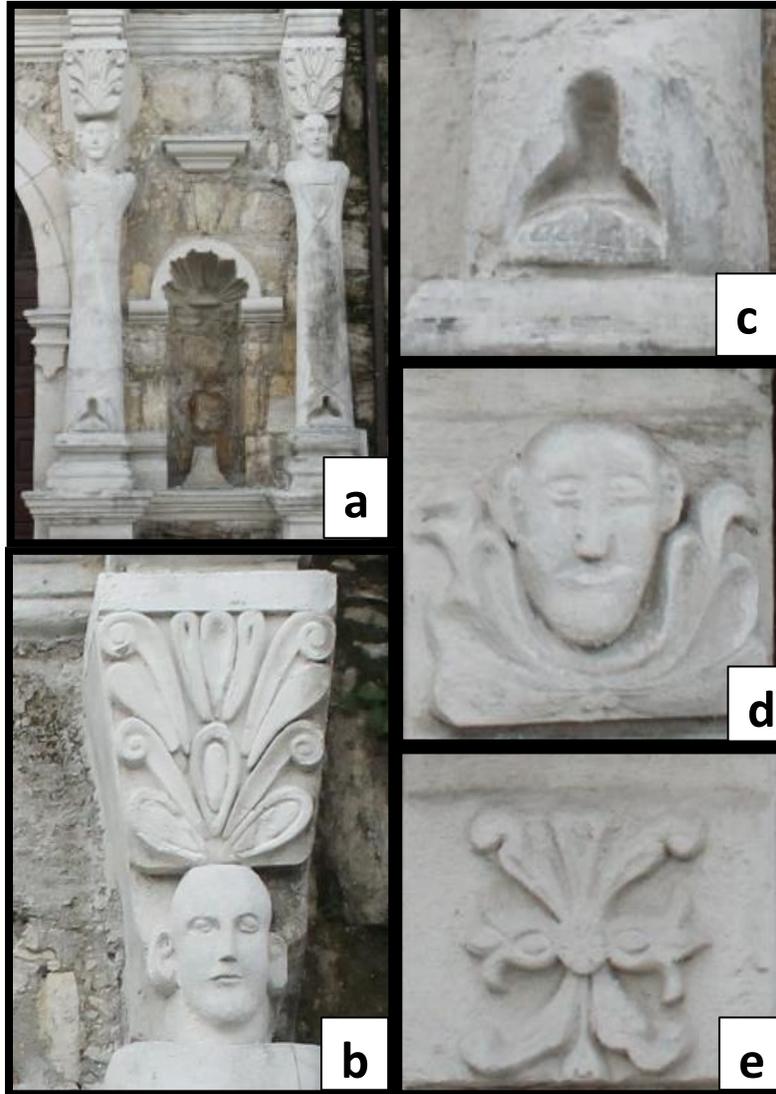


Figura 12 Partes específicas que conforman la fachada principal del Templo: en la imagen (a); se muestran las pilastras en donde se encuentran los atlantes, en la imagen (b); se observa el capitel (cabeza de atlante con un tocado fitomórfico), en la imagen (c); se puede apreciar el pie del atlante, mientras en la imagen (d); se presenta el motivo del basamento y por último en la imagen (e); el motivo fitomórfico del basamento.

El segundo cuerpo (Figura 13), también se encuentra dividido en tres partes, donde se presenta la ventana del coro al centro, con derrames hacia el interior, exterior y protegida por un dosel de influencia barroca tallado en el muro.

En los laterales de este vano hay un par de pilastras circulares con basamentos y capiteles con trazos decorativos fitomórficos. En medio de los pares existen otras hornacinas con arcos de medio punto con traza ornamental de concha marina.

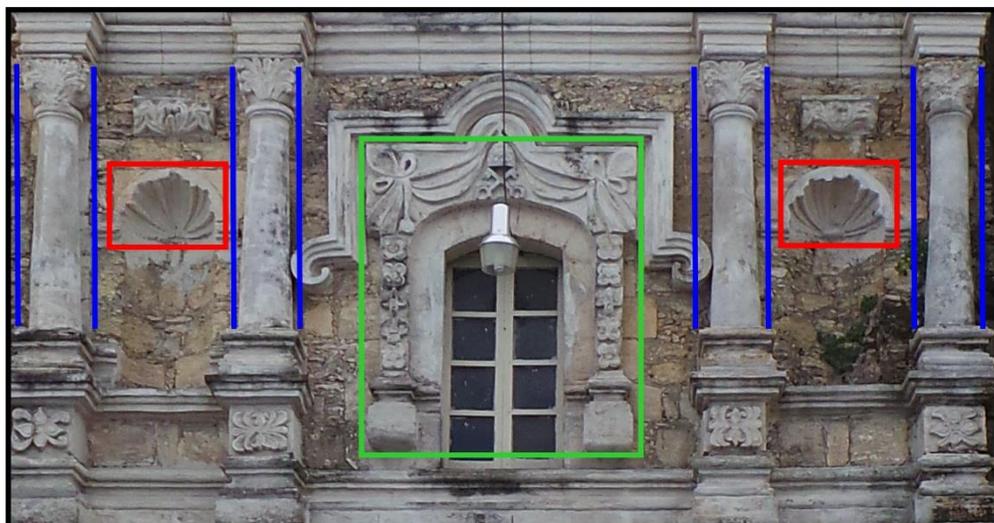


Figura 13 Parte superior de la fachada principal del Templo en la actualidad. Las líneas en color verde muestran la ventana al coro, las líneas en color azul indican las pilastras que forman los capiteles de la fachada, mientras que las líneas en color rojo muestran algunos de los diseños arquitectónicos del tipo zoomórfico y fitomórfico.

En la fachada lateral del Templo se encuentran los muros, contrafuertes y cimientos que se fabricaron a base de mampostería de roca arenisca, empleado su argamasa a base de cal y arena. Las secciones de estos elementos llegan a tener hasta 2 m en su base y en el caso de los contrafuertes 90 cm promedio en sus muros (Figura 14) (Espinosa *et al.*, 2009).



Figura 14 Fachada lateral del Templo, en donde se muestra en las líneas de color rojo los contra-fuertes principales, construidos a base de rocas areniscas y una puerta secundaria.

2.- MAPEOS LITOLÓGICOS DEL TEMPLO EL SEÑOR DE LA MISERICORDIA

El Templo, como se ha mencionado en todo el trabajo, se encuentra compuesto de dos tipos de roca, travertino y arenisca. Además de un tercer componente elaborado a base de travertino y cementante, al que para fines de mapeo llamaremos travertino trabajado, y que principalmente constituye las partes que tienen acabados o moldes en la construcción. También se toma en cuenta el mortero que es el material que rellena los espacios entre rocas sirviendo además como un adhesivo.

La Figura 15 representa los colores para las litologías y materiales.

LITOLOGÍA	COLOR
ARENISCA	ROJO
TRAVERTINO	AZUL
TRAVERTINO TRABAJADO	VERDE
MORTERO	GRIS

Figura 15 Simbología utilizada para el mapeo litológico.

2.1.- Fachada principal del templo

La fachada principal del Templo se encuentra constituida en su mayoría por travertino trabajado que puede observarse en color verde en la Figura 16. Todo lo que se observa en este color corresponde a las partes que contienen moldes, los cordones fitomórficos, los atlantes, las pilastras, básicamente todas las partes esculpidas que realzan la belleza del edificio.

En la base del Templo y en los contrafuertes se pueden observar en su mayoría rocas areniscas, debido a sus características físicas, ya que las mismas se consideran como rocas con alta dureza por su contenido de cuarzo, y por ende con una buena capacidad de carga.

El travertino, por ser menos pesado y tener mayor facilidad para trabajarlo, se observa como bloques en un arco que aparece al lado derecho del Templo en lo que corresponde al campanario, así como constituyendo la mayor parte del mismo en la parte superior (Figura 16).

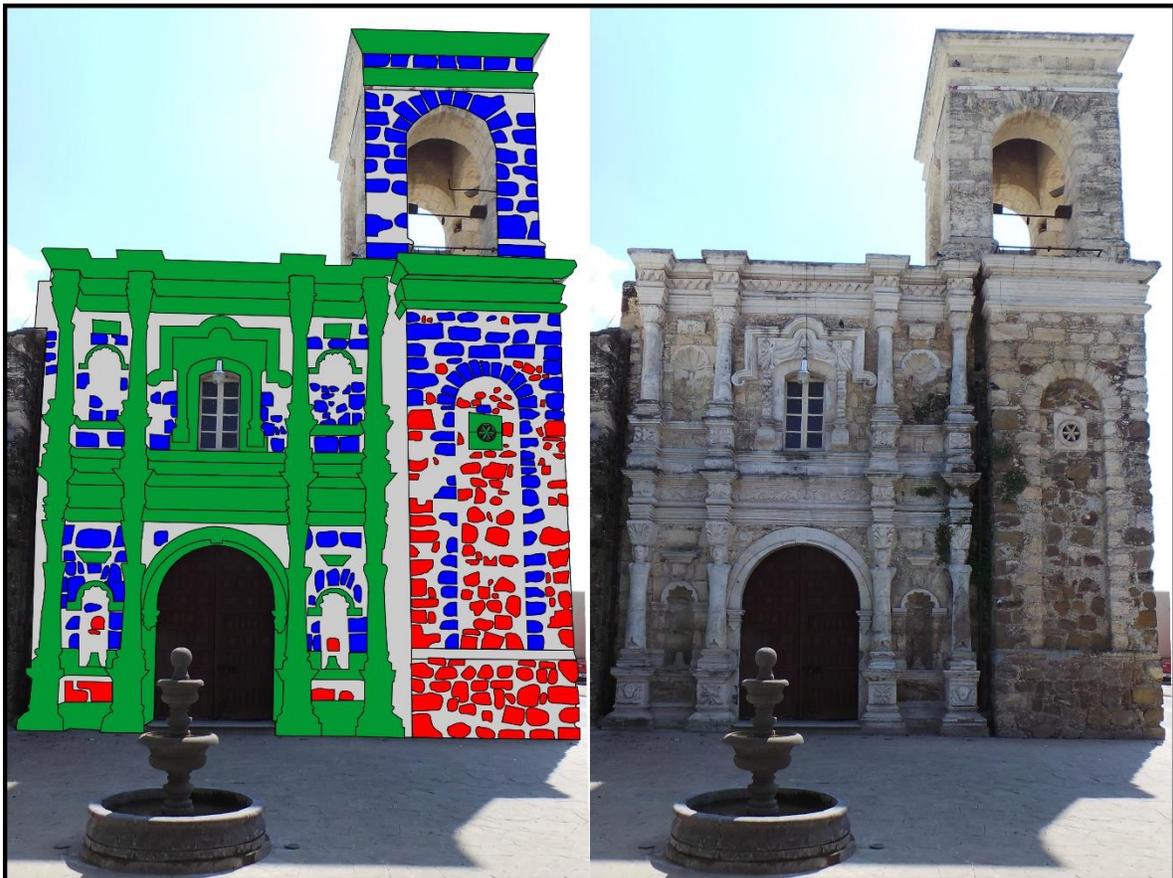


Figura 16 Litologías presentes en la fachada principal del Templo, resalta el color verde (travertino trabajado) constituyendo la mayor parte del edificio, seguido del azul (travertino), rojo (arenisca) y gris (mortero).

2.2.- Campanario

El campanario forma parte de la fachada principal y se encuentra en el lado norte de la misma. La parte oriental y sur (Figura 17 y 18) al igual que en la fachada principal, se constituye principalmente de rocas areniscas en la parte inferior y

media, con un arco en la parte media conformado por travertino. Algunos bloques de travertino en posición horizontal también se pueden observar en la parte media, así como constituyendo en su mayoría a la parte superior. Los moldes presentes en el campanario se observan sólo en la parte superior, como minoría. Lo restante corresponde a mortero.

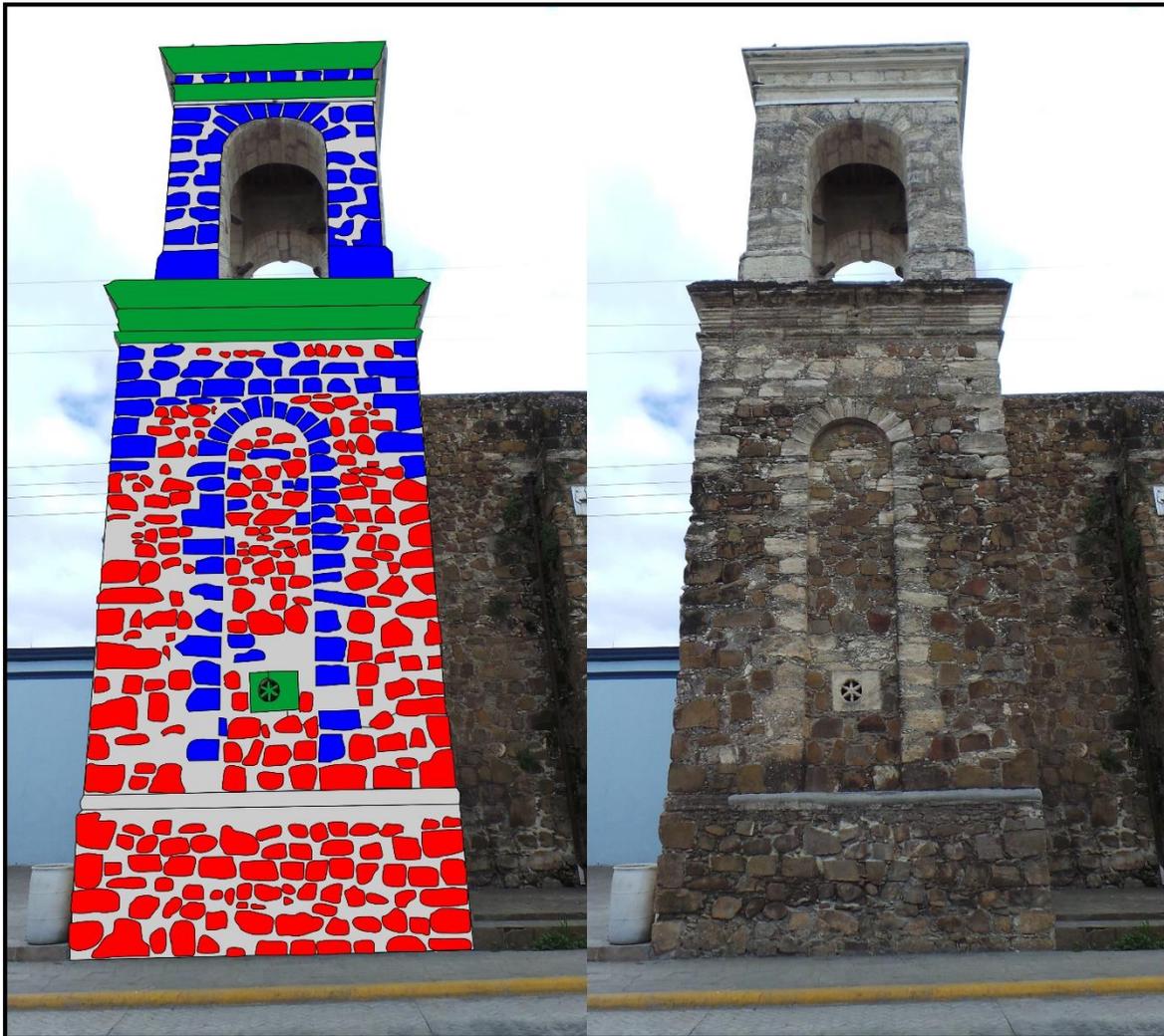


Figura 17 Las abundantes piezas representadas en color rojo son evidentes, siendo las areniscas las que componen en su mayoría la parte lateral del campanario, seguido del color azul (travertino), verde (travertino trabajado) y gris (mortero).



Figura 18 Parte sur del campanario, presenta la misma forma que en la parte frontal y oriental. Las areniscas componen la mayor parte de la estructura, seguido del travertino, travertino trabajado y al final el mortero.

2.3.- Fachada oriental

La fachada oriental del templo se encuentra constituida principalmente por rocas areniscas. Los muros y contrafuertes en esta parte dan sostén a la estructura y por lo tanto se entiende el porqué de su composición. Al centro de la fachada se observa una puerta secundaria (Figura 19) con una ventana en la parte superior, los moldes alrededor de la puerta se conforman de travertino trabajado, también pueden observarse algunos bloques de travertino en la parte que corresponde a la ventana. En la parte derecha de la fachada (Figura 20) se observa la parte restante de los muros y un tercer contrafuerte, constituidos en su totalidad por areniscas y mortero.

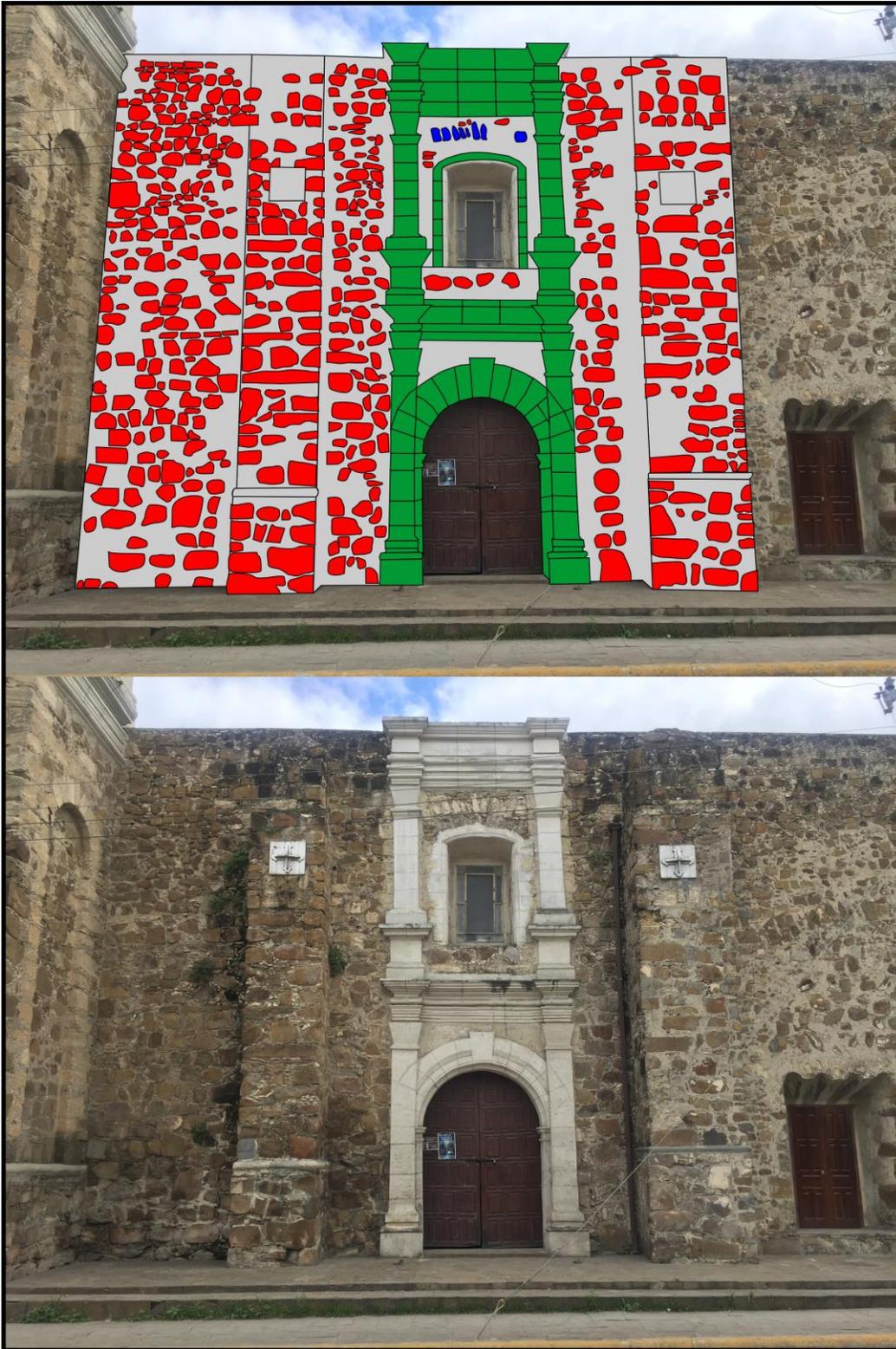


Figura 19 Primera parte de la fachada oriental, resalta en cada lado un contrafuerte, constituidos a base de rocas areniscas, al centro una puerta secundaria con una ventana, cabe resaltar el pequeño tamaño de la ventana, esto debido al grosor que poseían las paredes, alrededor de la puerta los moldes constituidos totalmente por travertino trabajado. En cada uno de los contrafuertes se observan anclas, que fueron implementadas recientemente para dar estabilidad a la construcción.



Figura 20 Segunda parte de la fachada oriental, constituida principalmente por areniscas y mortero, contiene una gran cantidad de mortero, que se puede apreciar en la parte superior de la puerta, esto debido a las restauraciones recientes que se llevaron a cabo en la construcción. También resalta un tercer contrafuerte al lado derecho de la imagen, constituido por areniscas.

3.- RESULTADOS

3.1.- PROPIEDADES PETROGRÁFICAS

Con el fin de obtener una clasificación y caracterización de las areniscas pertenecientes a la Formación San Felipe que aflora en la presa “Cerro Prieto”, se realizaron estudios petrográficos bajo un microscopio óptico de polarización marca *Motic* en un objetivo de 20x. Donde se tomaron tres muestras de areniscas, que posteriormente fueron sometidas a un conteo manual de 1,000 puntos por lámina.

El modelo de clasificación de las areniscas está basado en el artículo de *Pettijhon et al. (1987)* y se determina como (MDD), que significa Modelo Discriminante Determinístico, una herramienta en la cual el usuario introducirá las propiedades deseadas de las rocas y así clasificar al tipo de familia que pertenece la misma. La formulación de este modelo matemático procede de un conjunto de sistemas de inequaciones que facilita su uso computacional.

Los autores toman como base para la clasificación dos puntos, el primero es la composición de los clastos, este es índice de la procedencia de las rocas, el segundo punto se trata del porcentaje de matriz, que ha sido considerado en distintas clasificaciones como indicador de fluidez en las corrientes que se depositaron las areniscas. Así, las dichas rocas que presentan bajo porcentaje de matriz son formadas bajo corrientes altamente fluidas, mientras que las que contienen gran cantidad de matriz son formadas de material intersticial, que reflejan corrientes muy poco fluidas.

Para esta clasificación se toman cuatro componentes, tres de ellos son el cuarzo, feldespato y fragmentos de roca; y otro relativo con el contenido de matriz detrítica. En la clasificación, existen tres triángulos lo cuales se pueden observar en la Figura 21, los dos primeros pertenece a dos tipos de familia de areniscas, mientras el último pertenece a las lutitas.

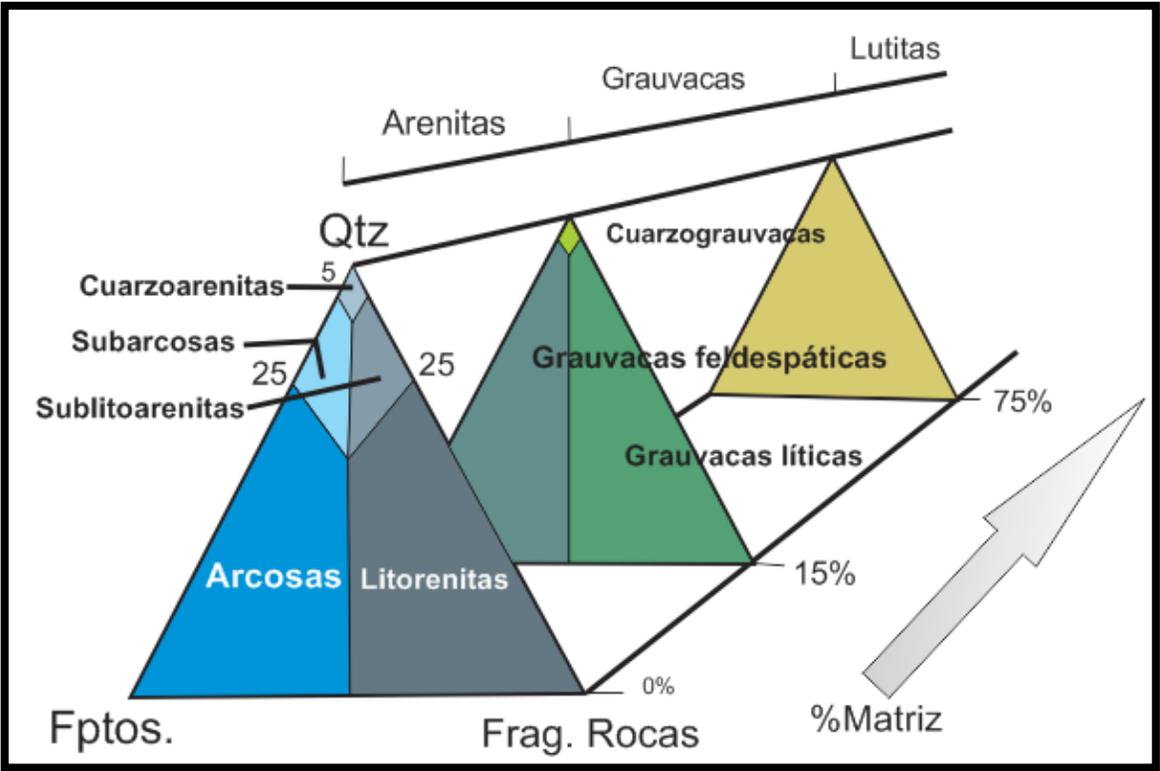


Figura 21 Modelo para la clasificación de areniscas (tomado y modificado de Pettijhon et al., 1987). Qtz: cuarzo; Fptos.: feldespatos; Frag. Rocas: fragmentos de rocas.

3.1.1.- Clasificación de las Areniscas

- **Familia de las Arenitas:** con porcentaje de matriz menor al 15% y esta subdividida en cinco tipos de arenitas; arenita cuarzosa (cuarzoarenita), arenita lítica (litarenita), sublitarenita, arenita feldespática (arcosa) y subarcosa.
- **Familia de las Grauvacas:** su matriz va entre el 15% y 75%, en general con menos del 75% de cuarzo. De acuerdo a la composición estas se dividen en grauvaca cuarzosa, grauvaca feldespática y por último grauvaca lítica.

El procedimiento para utilizar la clasificación de Pettijohn, Potter y Siever (1987) consiste en definir el tipo de matriz para cada triángulo a utilizar, es decir, si la matriz es menor que 15%, la roca que se está clasificando pertenece a la familia de las arenitas que conforman el primer triángulo; si la matriz está comprendida entre 15% y 75%, la roca pertenece a la familia de las grauvacas y, finalmente, si la matriz es mayor que 75%, la roca pertenece a la familia de las lutitas.

El tamaño de grano de la roca que se esté clasificando, ya sea arenita o grauvaca, define si la misma es de arena muy gruesa, arena gruesa, arena media, arena fina y arena muy fina.

Para determinar si un tipo de roca pertenece a uno de los cinco tipos de arenitas o si pertenece a uno de los tres tipos de grauvaca se debe realizar un análisis que depende de los componentes de clastos, los cuales están integrados por: porcentaje de cuarzo, porcentaje de feldespatos y porcentaje de fragmentación de roca. Cabe destacar, que estos 3 porcentajes deben totalizar un 100%, indiferentemente del caso.

A continuación se presenta la descripción y clasificación petrográfica de cada muestra tomada en el área de extracción, en la cantera ubicada en la Presa Cerro Prieto.

3.1.2.- Descripciones Petrográficas

Descripción de la lámina Cap1a.001

Roca de grano fino-medio, con abundancia de cemento carbonatado, la matriz representa un 34.7% de la totalidad de la lámina compuesta mayoritariamente de arcillas. Grado de redondez de los clastos, que va de redondeados a sub-redondeados, con esfericidad media.

El tipo de entramado se presenta cóncavo-convexo. El tamaño de los clastos es bimodal, los granos se encuentran distribuidos con distintas orientaciones, en esta lámina predominan los cuarzos en color grisáceos monocristalinos de tamaños variados con hábitos subhedrales de extinción ondulosa. La mayoría de los cuarzos presentan fracturas, estos representan un 25.5% de la lámina. Algunos de los cuarzos muestran bordes retrabajados, es decir, se encontraban desgastados, esto con menor frecuencia.

Los feldespatos representan un 16.6% del corte, distribuidos esporádicamente, siendo las plagioclasas de hábito euhedral y maclado polisintético las más representativas. Los fragmentos líticos son muy escasos siendo los de tipo sedimentario y volcánico los más frecuentes abarcan un 13.4%.

En cuanto a los minerales accesorios con 9.8% se identificaron distintos como: biotita, zircón, glauconita, clorita, muscovita, etc. En toda la lámina se presentaron manchones en color rojo oscuro a marrón que se presume es oxidación pronunciada de minerales máficos (silicatos, óxidos de Fe, etc.), que tal vez en un momento pudiera ser una sustitución de otro mineral. Arenisca (Grauvaca Feldespática) (Figura 22).

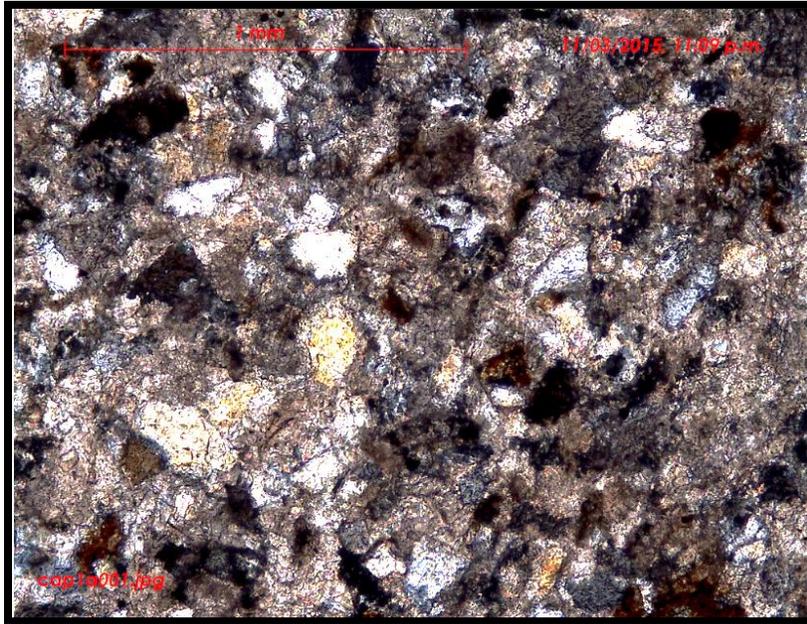


Figura 22 Lámina Cap. 1a001, granos finos-medio, donde sus granos se encuentran conectados en un contacto cóncavo-convexo a punto de contacto. Predominando los cristales de cuarzo y los manchones de color rojo marrón representando una oxidación pronunciada.

Los componentes principales de la lámina se representan en porcentajes en un diagrama ternario, usando el modelo MDD.

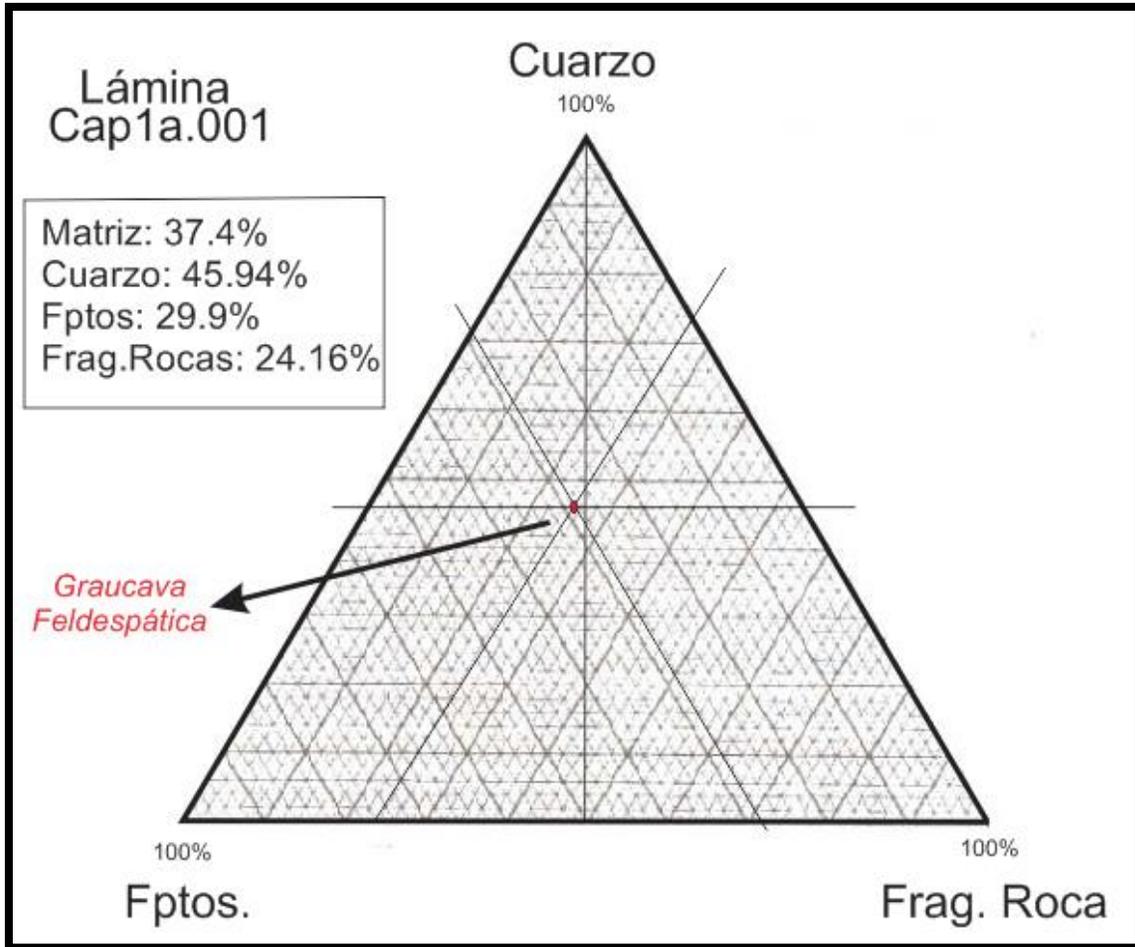


Figura 23 Diagrama Ternario representativo de la lámina Cap1a.001.

Descripción de la lámina Cap2a.001

Roca con variaciones en el tamaño de grano que van de fino-medio (0.25-1mm), con una esfericidad redondeada a sub-redondeada, matriz con grado de empaquetamiento soportado, esta constituye un 35.2 % del total de la lámina, rica en arcillas y cemento carbonatado.

Los granos presentan una clasificación media, de contacto cóncavo-convexo. Los cuarzos más abundantes son el monocristalino con extinción ondulosa, representando un 27.6 % de la sección, estos se presentan en color gris con pocas fracturas. Los feldespatos siguen en abundancia con un 19.6 %, siendo las

plagioclasas con maclas de tipo polisintéticas las más comunes, siguiendo sanidinos con bandeado de tipo carlsbad.

Los fragmentos líticos ocupan un 11.8% y los minerales accesorios biotita, zircón, glauconita, calcita esparítica y magnetita se presentan con menos abundancia que va de un 5.9%. La oxidación en este corte también está presente en manchones arriba de distintos minerales. Arenisca (Grauvaca Feldespática) (Figura 24).

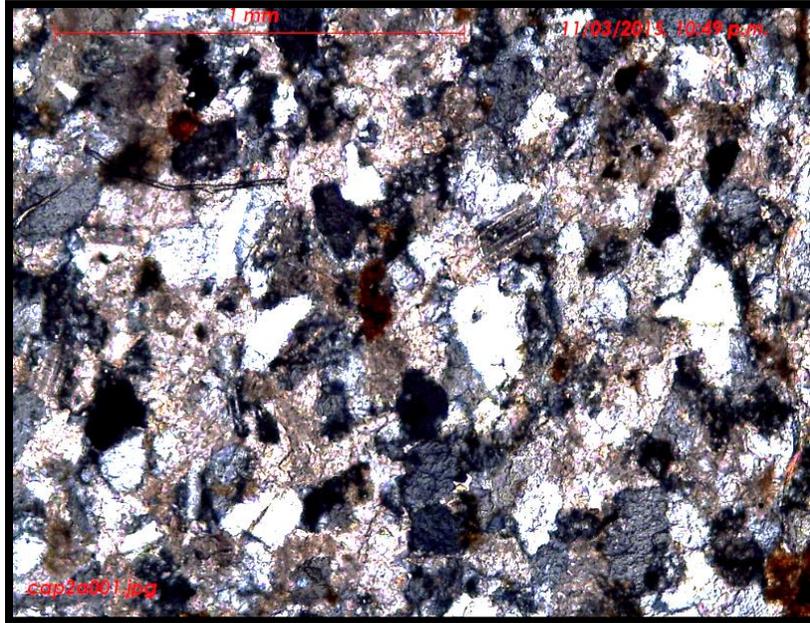


Figura 24 Lámina Cap 2.00, en esta imagen se pueden observar los manchones en color marrón y algunos feldespatos con maclado polisintético. Matriz de grano soportado, los clastos de cemento se pueden observar en color crema. Los cuarzos predominan en colores grises de formas bien definidas. El contacto entre los granos en algunas partes llega a ser puntual, la saturación de esta sección es típica de las areniscas grauvacas.

A continuación se presenta el porcentaje de componentes plasmado en un diagrama ternario basado en el modelo MDD.

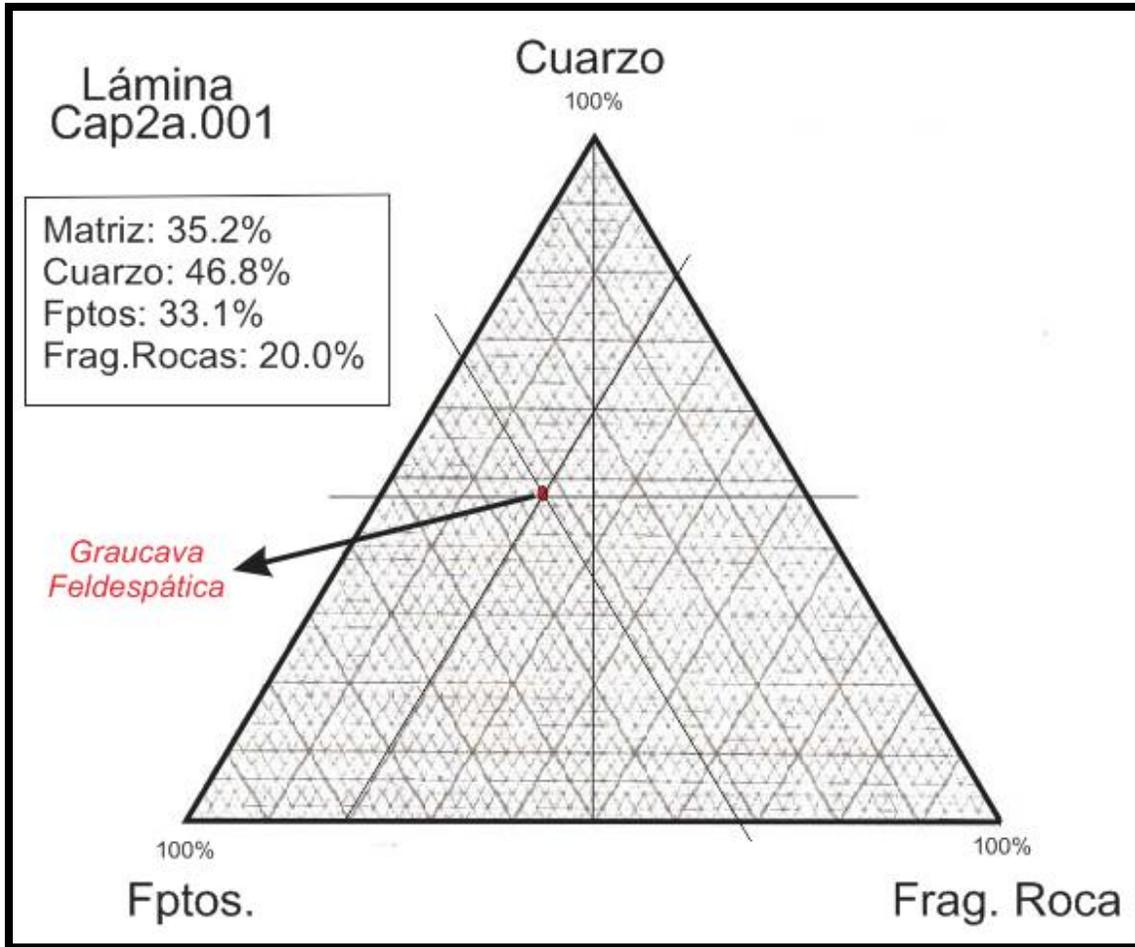


Figura 25 Diagrama Ternario representativo de la lámina Cap2a.001.

Descripción de la lámina Cap4a.001

Roca de grano fino-medio, matriz de grano soportado que compone el 32.1 % de la sección, contenido alto de cemento carbonatado en colores amarillo a crema, los granos cuentan con una esfericidad sub-redondeados-angulares. La distribución de granos es moderadamente clasificada, el entramado es de punto contacto mayormente, los cuarzos abundan con un 29.8 %, siendo los volcánicos subhedrales los más comunes con fracturas y extinción recta, algunos cuarzos con extinción ondulosa presentes pero en menor cantidad, de colores gris a blancos.

Los feldespatos característicos son las plagioclasas con maclado polisintético de hábito euhedral conformando un 17.7%. Otros feldespatos presentes con maclado sencillo se presumen son ortoclasa o sanidino.

Fragmentos de rocas en su mayoría sedimentarios y volcánicos, se presentaron algunos fósiles, entre ellos solo un par de pequeñas conchas ocupando un 10.7%. Los minerales accesorios son semejantes a las láminas anteriores que van desde las micas como biotita y muscovita hasta el zircón, con un 9.7%. Algunas manchas pequeñas negras en forma de puntos circulares muy bien definidos identificados como posibles óxidos de hierro. Arenisca (Grauvaca feldespática) (Figura 26).

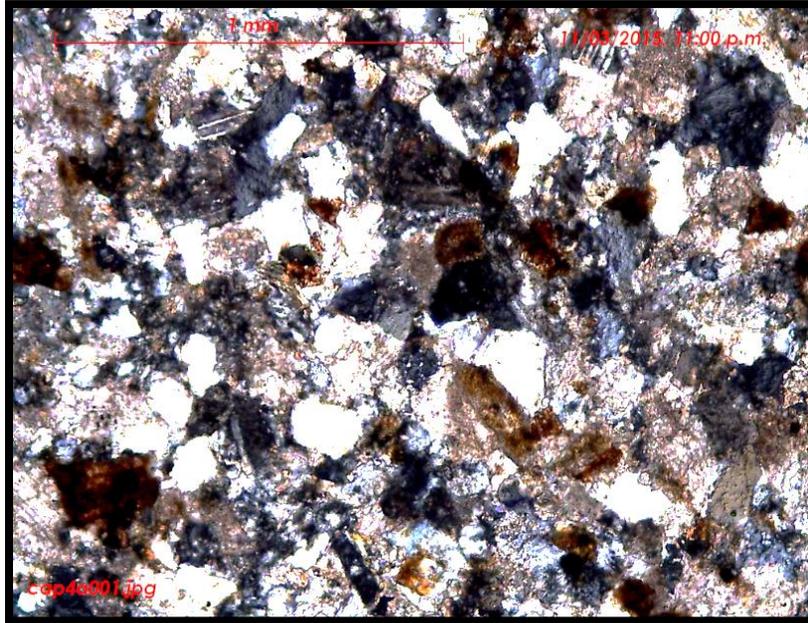


Figura 26 Lámina Cap4a.001, se pueden apreciar algunos maclados polisintéticos de las plagioclasas, el cemento carbonatado se presenta a lo largo de la lámina en color beige a amarillo claro, los cuarzos predominantes son de tipo volcánico con extinción recta.

En seguida se representan en porcentajes los componentes principales de esta lámina en un diagrama ternario basado en el modelo MDD.

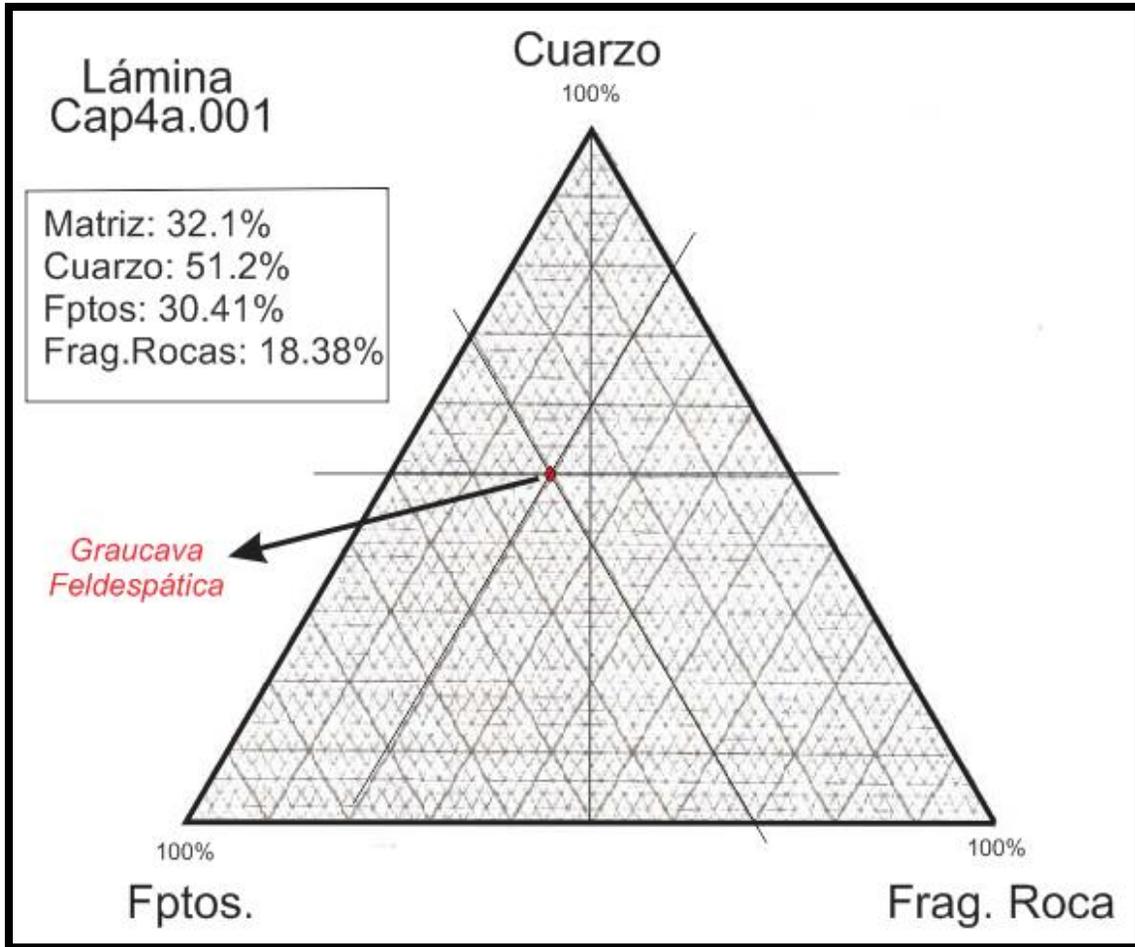


Figura 27 Diagrama Ternario representativo de la lámina Cap4a.001.

3.2.- PROPIEDADES PETROFÍSICAS

3.2.1.- Densidad

La densidad aparente de las muestras de arenisca analizadas, es significativamente afectada por el espacio de poro. Los valores para la densidad de matriz reflejan la densidad mineral del cuarzo como principal componente de las areniscas (Tabla 3).

Tabla 3 Densidades obtenidas de las muestras de areniscas. Los datos de la muestra VE4 se obtuvieron en Alemania, mientras que los de las muestras A1 y A2, en México.

Muestra	Densidad aparente g/cm ³	Densidad de matriz g/cm ³
VE4	2.677	2.687
A1	2.673	2.676
A2	2.673	2.679

Para las muestras de travertino, existe una clara separación entre la densidad aparente y la densidad de matriz. Esto debido a sus características deposicionales y a su composición mineralógica (Tabla 4).

Tabla 4 Densidades obtenidas de las muestras de travertino. Los datos de la muestra VE3 se obtuvieron en Alemania, mientras que los de las muestras T1 y T2, en México.

Muestra	Densidad aparente g/cm ³	Densidad de matriz g/cm ³
VE3	1.380	2.321
T1	1.682	2.449
T2	1.481	2.444

3.2.2.- Porosidad

Las areniscas presentes en la iglesia reflejan un valor de porosidad efectiva muy bajo, de acuerdo a von Moos y Quervain (1948) se clasifican como rocas compactas.

Tabla 5 Porosidades efectivas obtenidas para las areniscas. Los datos de la muestra VE4 se obtuvieron en Alemania, mientras que los de las muestras A1 y A2, en México.

Muestra	Porosidad (Vol. %)
VE4	0.364
A1	0.083
A2	0.207

Los resultados obtenidos para las muestras de travertino exhiben altos valores de porosidad, algo común en las rocas carbonatadas. De acuerdo al valor de porosidad efectiva von Moos y Quervain (1948) se clasifican como rocas muy porosas. Para la muestra VE3 se obtuvo una razón de poro promedio de 0.0355 μm .

Tabla 6 Porosidades efectivas obtenidas para el travertino. Los datos de la muestra VE3 se obtuvieron en Alemania, mientras que los de las muestras T1 y T2, en México.

Muestra	Porosidad (Vol. %)	Radio de poro promedio (μm)
VE3	40.532	0.0355
T1	31.300	-
T2	39.422	-

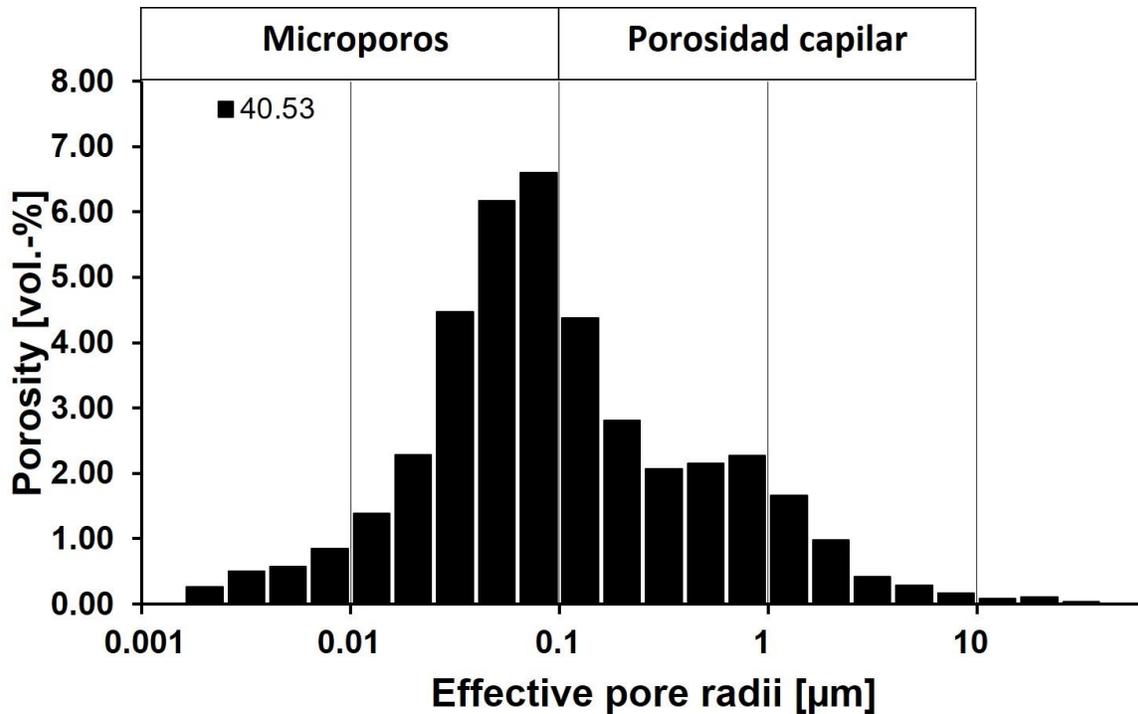


Figura 28 Gráfico de la distribución del radio de poro de acuerdo al porcentaje del volumen de porosidad en la roca (40.53) en la muestra VE3.

En cuanto a los datos obtenidos de la distribución de poros de la muestra VE3, predominan los microporos con un 57.02% del total de la muestra, mientras que 42.42% corresponde a porosidad capilar. Existe un 0.58% restante que corresponde a poros >10µm (Tabla 7).

Tabla 7 Medidas en porcentaje de la distribución de poro en la muestra VE3.

Muestra	Distribución de radio de poro (%)				
	0.001-0.01	0.01-0.1	0.1-1	1-10	>10
VE3	5.41	51.61	33.76	8.66	0.58

El grupo de los travertinos de acuerdo a Peschel (1977) presenta la variación más larga en valores de porosidad, que va desde <10% a 60%, para el caso de la muestra VE3 se presenta un 40.53%, valor que refleja el posible contenido de fragmentos de plantas.

3.2.3.-Absorción de agua capilar

Los valores obtenidos de absorción de agua capilar para las muestras de arenisca (A1 y A2) van de 2-4 kg/m²h y son bajos respecto a los de travertino (T1 y T2) que oscilan entre 18-25 kg/m²h (Tabla 8).

Tabla 8 Valores-w de acuerdo a Snethlage (2005), para las muestras de travertino y arenisca.

Muestra	Valor-w (kg/m ² h)
A1	3.65
A2	2.45
T1	18.79
T2	25.52

Basados en la clasificación de Snethlage (2005), de acuerdo a su valor-w, la muestra A2 se considera medianamente absorbente, y las muestras A1, T1 y T2, altamente absorbentes. Es importante mencionar que existe una marcada diferencia entre los valores de las muestras de travertino y arenisca, esto debido a la gran diferencia entre la porosidad existente entre ambas rocas. Los valores-w obtenidos para el travertino son altos, sin embargo en la literatura se pueden encontrar valores-w de hasta 70 kg/m²h.

3.2.4.-Expansión hídrica

La expansión hídrica muestra valores en un rango de -0.01 a -0.08 para las muestras de arenisca y travertino. Aunque las muestras son diferentes, sus valores son muy semejantes y en ambas se registró una contracción bajo condiciones de saturación en agua (Figura 29).

Las medidas se realizaron sólo en uno de los ejes, el cual no fue posible determinar por la naturaleza de las muestras.

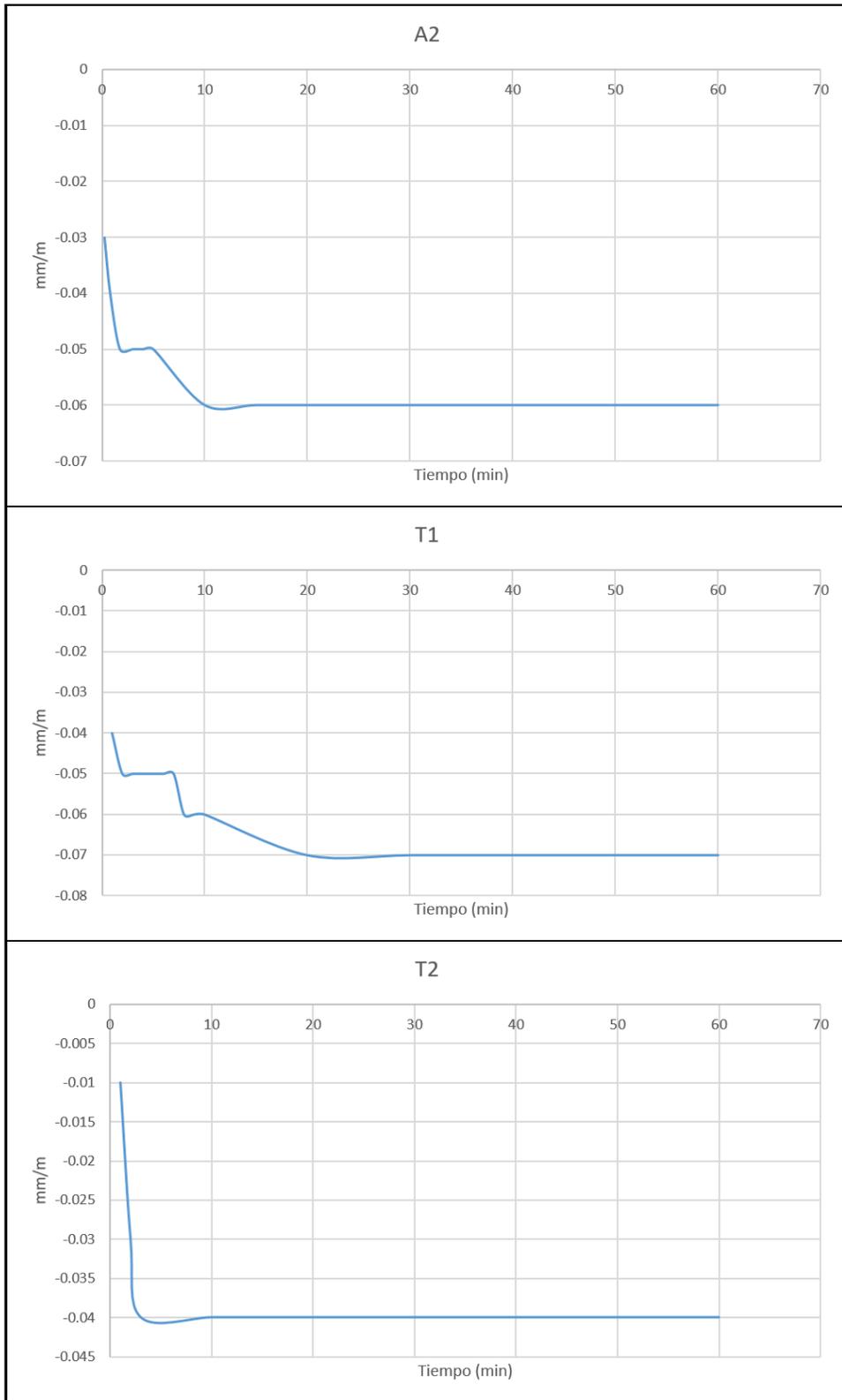


Figura 29 Resultados de expansión hídrica para las muestras de arenisca (A2) y travertino (T1 y T2) bajo condiciones de saturación en agua. Se observa que en las tres muestras se presentaron valores negativos, es decir, las rocas se contrajeron.

3.2.5.-Velocidad de ondas ultrasónicas

Las velocidades experimentales obtenidas en el laboratorio por el método de transmisión de pulsos para la muestra VE4 (arenisca) se muestran en la Tabla 9, en donde se muestra la superficie del eje recorrida (cm) y la velocidad (km/s) a la que recorrió la onda (V_p) de superficie.

Tabla 9 Datos obtenidos para la velocidad de ondas ultrasónicas en la arenisca VE4.

	Superficie del eje	Velocidad
X	6 cm	5.34 km/s
Y	6 cm	5.29 km/s
Z	6 cm	5.30 km/s

En base a la literatura, la velocidad de ondas ultrasónicas depende principalmente del grado de saturación de agua de la roca, su densidad y su preservación. Los resultados obtenidos para la arenisca muestran una velocidad alta, que refleja la frescura de la roca, esto debido a que la muestra fue tomada in situ del afloramiento y no del edificio.

3.2.6.-Difracción de Rayos-X

Las pruebas de difracción de Rayos-X fueron realizadas en la Universidad de Göttingen, Alemania. Se analizó únicamente la muestra VE3 perteneciente al travertino.

Los resultados fueron evidentes, la roca se compone en su mayoría por calcita, puesto que es una roca carbonatada, más se detectó la presencia de illita, una arcilla comúnmente encontrada en las rocas de la región y la cual es resultado de la alteración de los minerales presentes en las rocas arcillosas de la región, que se integran al travertino, cuando precipita de las aguas de los manantiales (Figura 30).

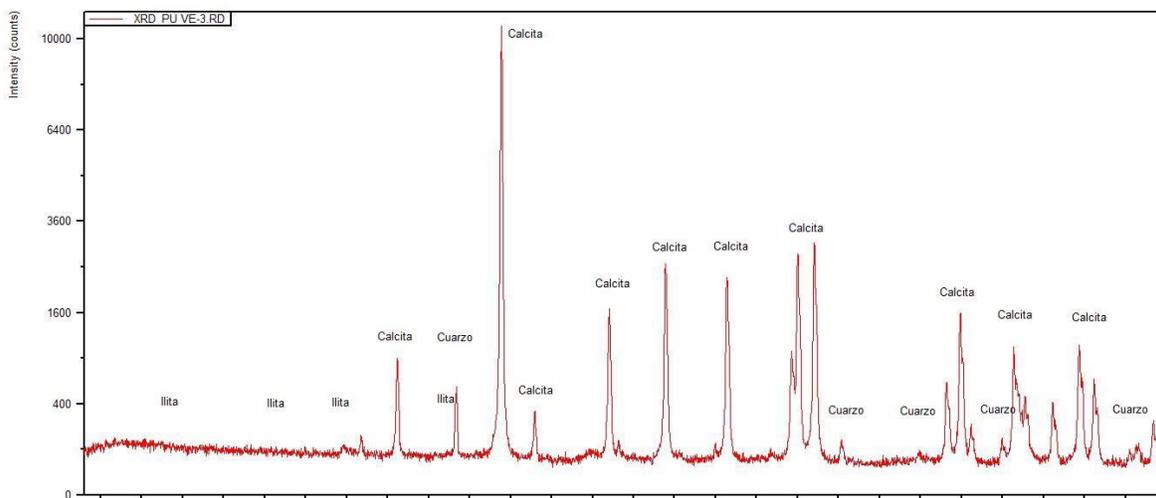


Figura 30 Difractograma de la muestra VE3, se observa en el pico de 2θ calcita, que representa el componente principal de la roca, en picos menores la presencia de illita, resultado de la alteración de minerales.

4.- DESCRIPCIÓN DE DETERIOROS

A pesar que el Templo se encuentra constituido mayoritariamente por areniscas, las cuales son rocas con alta dureza por su contenido de cuarzos, estas no se encuentran exentas a los daños mecánicos, físicos y químicos que actúan en contra de su preservación a lo largo del tiempo, sin dejar de mencionar el deterioro que ha causado el hombre al edificio debido al mal manejo de las restauraciones efectuadas en los últimos años.

4.1.-Ciclos térmicos

Los cambios de la temperatura en el medio ambiente son parte de los daños mecánicos que atacan a las rocas. Estas al someterse a enfriamientos y calentamientos constantes, tienen como efecto una expansión. El coeficiente de expansión térmica dependerá de los distintos minerales que conformen la roca.

Este mecanismo comienza con la insolación, produciendo que la estructura interna de las rocas pierda cohesión entre sus granos. La tensión inducida resultante, esfuerzos compresivos o de cizalla a lo largo de los límites de grano pueden ser lo suficientemente grandes para causar fallamiento a lo largo de los precursores

microestructurales, tales como fracturas y planos de clivaje (Sage, 1988). En la fachada del Templo podemos observar algunos ejemplos de este tipo, tales como fragmentación, desincrustación y descamación (Figura 31), la deformación también se atribuye a los cambios del clima (ciclos térmicos; Siegesmund y Sneathlage, 2011).

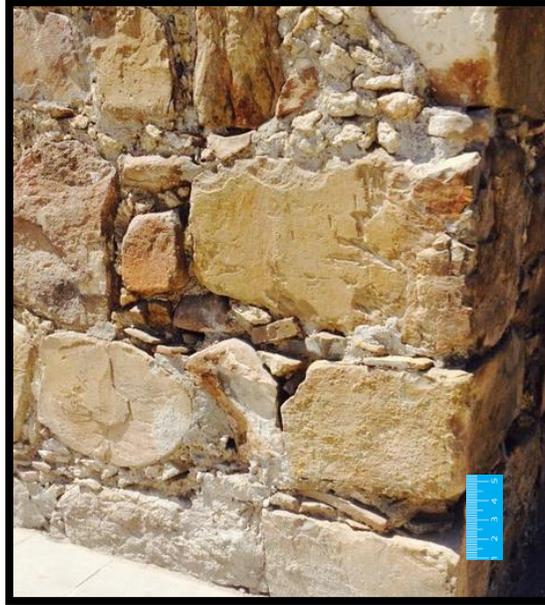


Figura 31 Parte inferior derecha, correspondiente a la fachada principal del Templo, en donde se puede observar los estragos del deterioro tipo mecánico en las rocas arenisca. La desintegración y la descamación son algunos de los ejemplos más comunes. Las areniscas contienen minerales hidratados como son algunas micas, susceptibles a los cambios de clima, ya que estos pierden hidratación.

4.2.-Hinchamiento hídrico e hígrico

En el Templo se pueden apreciar distintos daños mecánicos en las rocas como grietas, fisuras y desprendimiento de material. Aunque no representan un porcentaje mayor de daños visualmente, tienden a ser los deterioros más complicados de restaurar, se presume que la pérdida de material que se encuentra en el edificio en las zonas superiores e inferiores es causada por el contacto que tiene con el agua de lluvias cuando es drenada del techo.

Las grietas o fisuras generalmente se deben a las cargas mayores en los muros, en el Templo no se aprecian así, estas se encuentran disgregadas en diferentes zonas sin tener un patrón determinado, se encuentran en longitudes cortas y

específicamente en las areniscas, esto puede ser debido al acomodo no homogéneo y por la diversidad de tamaños en las rocas de la obra (Figura 32).



Figura 32 En esta imagen se pueden observar las distintas fisuras y grietas disgregadas presentes en la fachada principal del Templo plasmadas en las areniscas.

La descamación es notable en las areniscas, se puede apreciar como una capa superior amorfa arriba de su superficie original (Figura 33).



Figura 33 Descamación en las areniscas causante de pérdida de material. Se aprecian manchones de mortero. En una de las rocas sobre sale una capa de la superficie original de la misma, típico aspecto de descamación en las areniscas.

4.3.-Daños por procesos químicos y biológicos

En el Templo se observan daños en las areniscas como depositación de sales, donde se aprecia una capa de color gris-blanco recubriendo la superficie de dicha roca, mientras que en el caliche, el agua ocasiona erosión puntiforme, resultando una disolución en el material, inclusive cambiando su textura.

El agua al contacto con el sillar de caliche provoca que este último presente un grado de deterioro de hasta un 70 %, encontrándose en las partes inferiores al punto de desmoronamiento. 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 (Figura 34).



Figura 34 El caliche presenta un color amarillo fuerte en sus bordes, señal de intemperismo alto, la mayoría de los sillares que se colocan en la parte del suelo se comportan como una tela, al momento en que llueve estos absorben el agua por capilaridad de abajo hacia arriba, son rocas que persisten menos al desgaste. Al lado derecho se puede observar una arenisca cubierta casi en su totalidad de una pátina en color blanca que corresponde a la cristalización de sales.

En el Templo la pátina de color negra que es causada por la acidez del agua y la precipitación de ensuciantes en la atmósfera, se coloca como uno de los daños más visibles en la estructura, ocupando más del 50 %. Estos manchones se pueden apreciar por casi todo el edificio, van desde pequeños hasta manchones masivos, como es el caso de la fachada lateral. Estos también se encuentran en las partes altas de los muros ya que es ahí donde el agua siempre se drena cuando llueve. En la fachada principal, el capitel derecho es el más afectado por estas manchas, debido a que en esa parte se colocó un drenaje que va desde el techo del Templo hasta llegar a la parte inferior, justo en ese mismo capitel por el incremento del agua es donde llega a crecer de manera abrupta la vegetación (Figura 35).

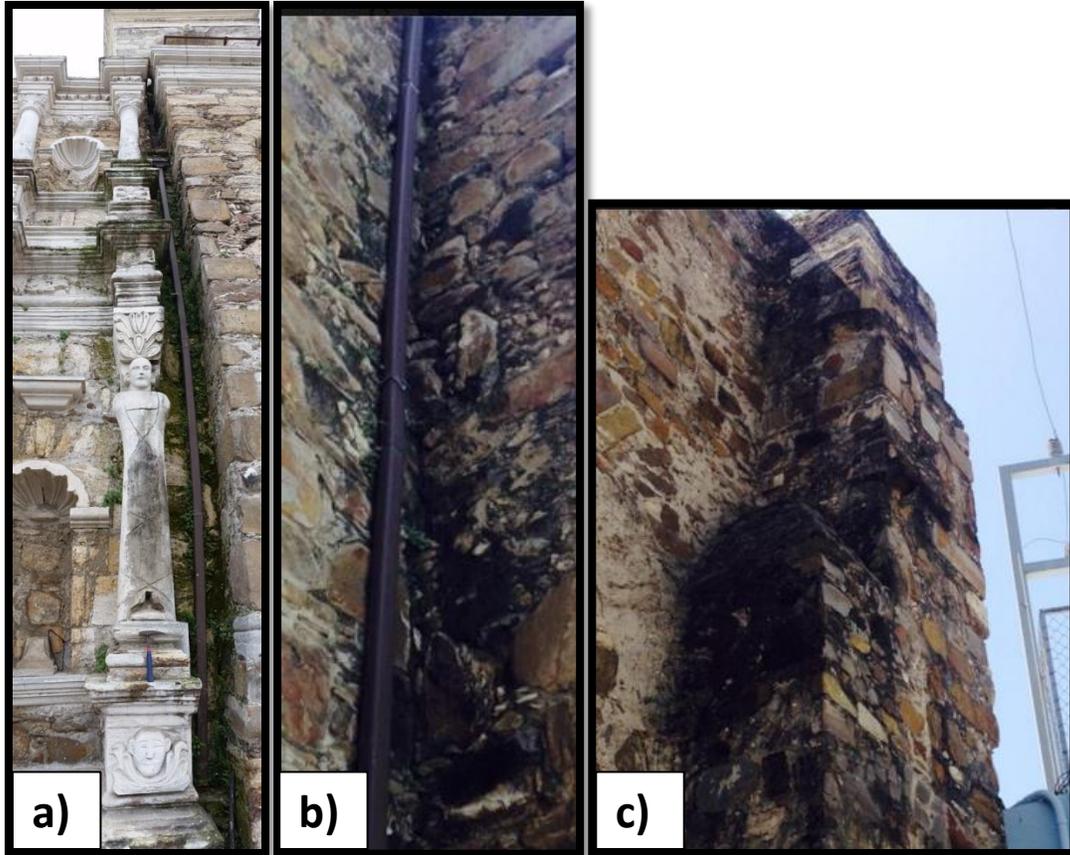


Figura 35 a) Capitel derecho de la fachada principal, muestra patina de color negro, siguiendo el patrón de las escorrentías del agua por el muro en donde se postro el atlante, manchones en los repisones inferiores, véase el crecimiento de vegetación, abundantes plantas, hongos y moho; b) Parte lateral de un muro (fachada lateral del Templo), en esta parte también se observa la pátina en color negro y abundante vegetación; c) Parte superior de los muros en la fachada lateral. Patina en color negro, daños mayores en las areniscas.

5.- CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE DETERIORO EN LAS ROCAS DEL TEMPLO EL SEÑOR DE LA MISERICORDIA

Para presentar una mejor clasificación de los deterioros, se realizó un mapeo en el que los mismos se caracterizaron por colores, en diferentes tonos de verde se señala la decoloración, graduando este deterioro de 5% (poco deteriorada) a 100% (muy deteriorada), esto debido a que es el mayor deterioro presente en la construcción.

La Figura 36 representa los colores para los diferentes tipos de deterioro.

DETERIORO	COLOR
AGRIETAMIENTO Sepultamiento Fisuras	ROJO
PÉRDIDA DE MATERIAL Erosión	AMARILLO
DECOLORACIÓN Costras Corteza Pátina	VERDE
COLONIZACIÓN Animales Hongos Plantas Moho	ROSA
RAYADURAS	NARANJA
RESANADO / REMODELACIÓN	GRIS

INTENSIDAD DE DETERIORO	
100%	
75%	
50%	
25%	
5%	

Figura 36 Simbología utilizada para la clasificación de deterioros.

5.1.- Fachada principal del templo

La fachada principal del Templo presenta prácticamente la mayoría de los tipos de deterioro, sin embargo, no afectan su estructura. Las condiciones en las que se encuentra se deben a que las remodelaciones realizadas anteriormente se han enfocado más en la parte lateral del edificio y no en su fachada principal.

Las pilastras y los cordones ornamentados presentan principalmente daños por decoloración, que se nota evidentemente como manchones en color negro, representado con graduaciones de color verde en el mapeo. En parte de los atlantes y en los detalles fitomórficos de las pilastras se observa también pérdida de material, acción causada por la lluvia que genera disolución de material. Entre la última pilastra y el campanario, al lado derecho de la fachada, se observa un notable deterioro por colonización biológica, esto debido a que por la estructura del edificio, este lugar es la parte principal por donde escurre el agua en épocas de lluvia. Los diferentes daños causados por la acción de la lluvia se deben a que los mismos son causados en diferentes tipos de roca. En la parte inferior de la segunda pilastra de

izquierda a derecha, se observan daños por agrietamiento. Como minoría se observan acciones de resanado/remodelado (Figura 37).

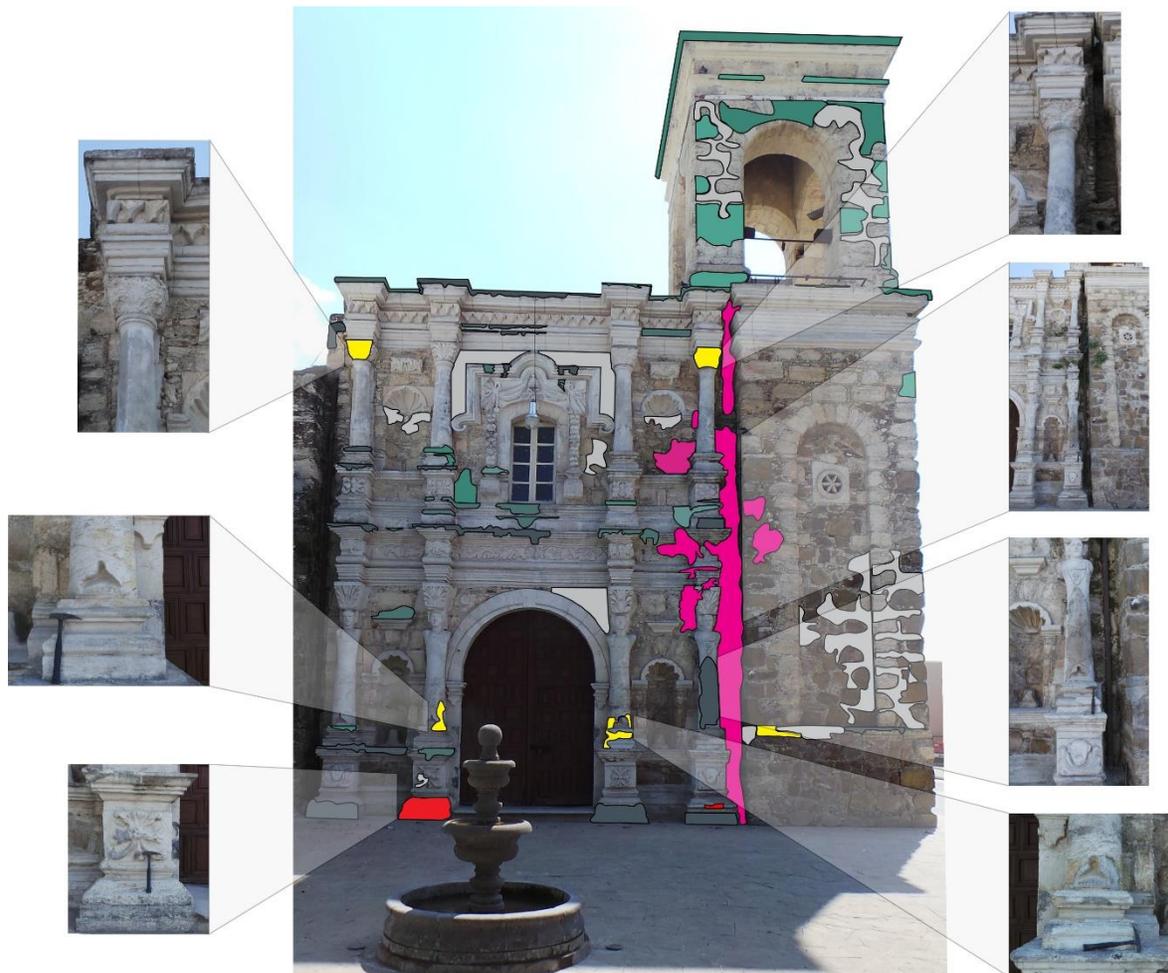


Figura 37 Clasificación de deterioros por colores. En diferentes tonalidades de verde se observan predominantemente daños causados por decoloración. En color rosa, colonización biológica, en amarillo, pérdida de material por erosión, en rojo, agrietamiento y en gris, resanado o remodelaciones.

5.2.- Campanario

La parte oriental del campanario se encuentra afectada principalmente por decoloración, el daño es muy visible en las areniscas que se tornan en un color prácticamente negro. En la parte superior del campanario, se observa agrietamiento causando separación en la estructura, aunado a una fuerte decoloración en lo que correspondería a travertino. En la parte inferior, se observa la implementación de mortero en un molde, como resultado de las remodelaciones recientes (Figura 38).



Figura 38 En diferentes tonalidades de verde se observan los daños por decoloración que afectan la mayor parte del campanario, las tonalidades más oscuras representan un daño más marcado. En color amarillo se observa la pérdida de material por erosión en uno de los moldes, seguido de un color gris que representa daño por remodelación en dónde fue utilizado mortero hecho a base de cemento portland y no de travertino. En la parte superior en color rojo la separación de material por agrietamiento, a la par de una fuerte decoloración en el travertino.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los experimentos realizados para obtener las propiedades petrofísicas de la arenisca y el travertino, se pudieron obtener los valores específicos que hacen de la arenisca un material eficiente para la construcción, contrario al travertino, considerándolo una roca inestable para los mismos fines.

Los valores de densidad promedio obtenidos fueron los siguientes:

- a) Arenisca
 - Densidad aparente: 2.6773 g/cm^3 .
 - Densidad de matriz: 2.6776 g/cm^3 .
- b) Travertino
 - Densidad aparente: 1.514 g/cm^3 .
 - Densidad de matriz: 2.404 g/cm^3 .

La densidad aparente es afectada por el espacio de poro presente en la roca. La densidad de matriz se debe a la densidad de los cristales de cuarzo, como principales componentes de la roca.

La similitud entre las densidades de la arenisca se debe que el espacio de poro presente en la roca es casi nulo, mientras que el travertino presenta alta porosidad por lo que sus densidades son notablemente diferentes.

La porosidad es una de las propiedades más importantes en relación con el deterioro, el porcentaje de porosidad promedio en la arenisca es de 0.21% que de acuerdo a la clasificación de von Moos y Quervain (1948) se trata de una roca compacta. El travertino en contraste presenta un 37.08%, considerándolo así una roca muy porosa. De la porosidad del travertino el 42.42% corresponde a poros capilares (1-10 μm) y el 52.07% equivale a microporos (.005-1 μm). Sus valores de densidad son resultado de su origen y ambiente de depósito.

En los microporos presentes en el travertino el agua condensará valores de humedad relativa por debajo del 99% y en los poros capilares se presentará 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 higríca 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 ± 0.05 , 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, pérdida de partes, colonización, etc.

Para el caso de la arenisca, la expansión hídrica fue de ± 0.1 , una cantidad casi similar al travertino, y que tendría los mismos efectos de deterioro con el paso del tiempo.

Los valores promedio de absorción de agua por capilaridad obtenidos para la arenisca son de $3.05 \text{ kg/m}^2\text{h}$ que de acuerdo a la clasificación de [Snethlage 2005](#) se considera medianamente absorbente. Para el travertino se obtuvo un valor de $22.15 \text{ kg/m}^2\text{h}$ clasificado como altamente absorbente. Estos valores están estrechamente relacionados con la porosidad presente en la roca.

La fachada principal del templo se encuentra constituida en su mayoría por travertino procesado, esto por la facilidad para trabajarlo y poder crear todos los acabados tales como zoomórficos, antropomórficos, y fitomórficos. Los arcos presentes en el campanario se constituyen de bloques de travertino también por la facilidad de manejarlo. Los muros y contrafuertes se constituyen de arenisca, roca con mayor competencia que el travertino, dando soporte a la estructura.

Los daños causados por el agua meteórica son diferentes en la arenisca y el travertino, debido a su diferente composición mineralógica.

La presencia de illita en el travertino, proveniente de la alteración de lutitas de la región, probablemente favorece a su erosión, una vez que se van disolviendo los cristales de calcita original.

La estructura del templo luce en buenas condiciones debido a una remodelación realizada en años pasados, aunque en la misma no se implementaron materiales similares a los de la construcción y es posible observar plastas de mortero hecho a base de cemento portland, en algunas partes del edificio.

DISCUSIÓN

La Geología forma parte fundamental en la conservación de patrimonios históricos y culturales. Dentro de sus múltiples aplicaciones, se encarga de realizar los estudios presentados en este trabajo.

Con la realización de dichos estudios, es posible conocer tanto el origen, como las características físicas y químicas de las rocas que conforman la construcción.

La iglesia El Señor de la Misericordia es parte de la riqueza histórica con la que cuenta el municipio de Linares, por lo tanto, es crucial mantenerla en buen estado.

Para realizar un correcto mantenimiento de la estructura, se recomienda la utilización de materiales similares a los que fueron empleados originalmente. Las posibles canteras de dónde se extrajeron dichos materiales, se mencionan en el trabajo y se encuentran dentro del mismo municipio.

Por ningún motivo se debe emplear cemento portland en la construcción, debido a la naturaleza de las rocas utilizadas originalmente, el mismo provocaría la alteración de sus propiedades y podría causar daños irreparables al edificio.

BIBLIOGRAFÍA

Alonso, F. J., Esbert, R. M., Ordaz y J., Vázquez, P., 2006, Análisis del Deterioro en los Materiales Pétreos de Edificación. Revista Electrónica 3: 23-32 p.

Arnaiz, M. y Matin, A., 1977, Alteración de materiales pétreos de obras monumentales. Acción de la contaminación ambiental. Madrid, Monografías del Inst. Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, C.S.I.C, n.º 340, 62 p.

Arnold, A. y Zehnder, K., 1989, Soluble salts and stone decay. The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. Proceed. of the 1st. Int. Symp., Barí, 31-58 p.

Binda, L. y Baronio, G., 1987, Mechanisms of masonry decay due to salt crystallization: Durability of Building Materials, 4 (3), 227-240 p.

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.

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

Eguiluz de Antuñano, S., Aranda García, M., Marrett, R., 2000, Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53, 1-26.

Esbert, R. M., Montoto y M., Ordaz, J., 1991, La piedra como material de construcción: durabilidad, deterioro y conservación. Departamento de Geología, Grupo de Petrofísica. Universidad de Oviedo, España, 61-73 p.

Espinosa, L., Sánchez García, J. y Domínguez, H., 2009, Capilla del Señor de la Misericordia. Monterrey, Nuevo León, Fondo Editorial de Nuevo León, 237 pp.

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

Goldhammer, R.K., y Johnson, C.A., 2001, Middle Jurassic-Uper Cretaceous Paleogeographic evolution and sequence stratigraphic framework of the northwest Gulf of Mexico rim: in C. Bartolini, T. Buffler, and A. Cantú-Chapa, eds., The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins and petroleum systems: American Association of Petroleum Geologists Memoir 75, 45-81 p.

González Sámano, P. S., 2012, La Formación Cantera; Su Utilización, Durabilidad, y Deterioro como Roca Natural de Construcción. Ejemplos en Edificios Históricos de la Ciudad de San Luis Potosí. San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis, 124 pp.

Imlay, R. W., 1944. Correlation of the Jurassic formation of North America, exclusive of Canada: Geol. Soc. Am. Bull., 63: 953-992 p.

Jeffreys, G., 1910, Reporte Geológico de la American Gulf Oil Company: Reporte no publicado.

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

King, J. L., 2001, La Arquitectura Vernácula del Noreste de México. Universidad de Monterrey, 24 p.

Klopfer, H., 1974, Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. 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.

Krumbein, W. E., 1988, Biotransformations in monuments: A sociobiological study. Durability of Building Materials, Vol. 5, 359-382 p.

López Doncel, R., Wedekind, W., Leiser, T., Molina Maldonado, S., Velasco Sánchez, A., Dohrmann, R., Kral, A., Wittenborn, A., Aguillón Robles, A., Siegesmund, S., 2016, Salt bursting test on volcanic tuff rocks from Mexico: Environ Earth Sci, 75 (212), 22 p.

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 Feuchtetransportvorgängen. Aachener Beitr Bauforsch 3:1-71.

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

Monjo Carrió, J., 1998, Tratado de rehabilitación. Madrid, Elementos estructurales. Munilla-Lería, Tomo 3, 89 p.

Muir, J. M., 1936, Geology of the Tampico Region, Mexico: The American Association of Petroleum Geologists, Special Volume 8, 280 p.

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

Padilla y Sanchez, R.J., 1986, Post-Paleozoic tectonics of Northeast Mexico and its role In the evolution of the Gulf Of Mexico: Geofisica Internacional, V. 25, No. 1, 157-206 p.

Padilla y Sánchez, R. J., 2007, Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 59 (1), 157-206 p.

Palmer, R.H., 1927, Geology of eastern Hidalgo and adjacent parts of Vera Cruz, Mexico: American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 11(12), 1173-1220.

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

Pettijohn, F., Potter, P. y Siever, R., 1987, Sand and sandstone, Springer – Verlag, New York, Segunda edición.

Polanco Madrazo, J. A., Diego Cavia, S., Thomas Garcia, C., N. A., Materiales de Construcción. La piedra natural. España, Dpto. de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria, 28 p.

- Rosvall, J., 1988**, Air pollution and conservation: Durability of Building Materials,5 (3-4), 209-237 p.
- 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.
- Ruedrich J., Seidel, M., Kirchner, D., y Siegesmund, S., 2005**, Salzverwitterung, hygri sche und thermische Dehnung als auslôsende Schadensquantitâten. Z dtsch geol Ges 156/1:59-74.
- 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.
- Secretaría de Gobernación, 2015**, Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. México. <www.gob.mx/inafed>, consulta: marzo de 2016.
- Seibertz, E., 1988**, El desarrollo Cretácico del Archipiélago de Tamaulipas. I. Litofacies paleogeografía y datación bioestratigráfica de la Formación San Felipe por medio de inoceramidos en el estado de Nuevo León (Turoniano, NE México): Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, 3, 9-29 p.
- Serrano Alcudia, F., 1998**, Patología de la edificación. Madrid, El lenguaje de las grietas. Fundación Escuela de la Construcción, 58 p.
- 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.
- Snethlage, R., 2005**, Leitfaden zur Steinkonservierung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Steindlberger, E., 2003**, Vulkanische Gesteine aus Hessen und ihre Eigenschaften als Naturwerksteine. Geol 46:378-390.
- UNAM, 2011**, Atlas Climático Digital de México. <www.atlasclimatico.unam.mx/atlas/>, consulta: marzo de 2016.

Valentín, N., 1990, Biodeterioro en rocas monumentales. (Documento interno). ICRBC, Ministerio de Cultura, Madrid, 26 p.

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

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

Wedekin, W., López Dóncel, R., Dohrmann, R., Kocher, M., Siegesmund, S., 2013, Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansión. Eviron Earth Sci 69: 1203-1224.

Weiss, G., 1992, Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter. MünchnerGeowiss 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.