



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**

**“MINERALES ACCESORIOS PRESENTES EN IGNIMBRITAS, COMO
RESULTADO DE LA METEORIZACIÓN”**

TESIS

***QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL***

PRESENTA:

SANDRA DEL CARMEN ARGÜELLO HERNÁNDEZ

ASESOR DE TESIS:

DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

MORELIA, MICHOACÁN, JUNIO DE 2010



RESUMEN

Conocer los mecanismos de deterioro, naturales y antropogénicos en las ignimbritas, para prevenir daños a las mismas, así como proponer técnicas de restauración y conservación con estas rocas, con las cuales están construidos los monumentos Patrimonio de la Humanidad del Centro Histórico de Morelia, así como Monumentos Históricos de la Ciudad de Pátzcuaro, ciudad considerada como pueblo mágico. Las ignimbritas alteradas son muestras de algunos de los monumentos de ambas ciudades, de la Ciudad de Morelia: Catedral, Casa de la Cultura, Templo de Capuchinas, Templo de San Agustín, y Primitivo y Nacional Colegio de San Nicolás de Hidalgo; y de la Ciudad de Pátzcuaro de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud. De la misma forma se recolectaron muestras de ignimbritas sanas de algunos de los bancos de materiales cercanos: Jamaica, Cointzio y Tlalpujahua. La caracterización microestructural se realizó con técnicas como la difracción de rayos X en el Difractómetro Siemens del IIM; se compararon la composición mineralógica de las ignimbritas sanas con los resultados obtenidos de las ignimbritas alteradas de los monumentos mencionados con anterioridad. La composición principal de las ignimbritas estudiadas está formada por: compuestos de silicio: cuarzo y cristobalita; feldespatos: albita; plagioclasas: sanidina; y micas como la moscovita. Se descubrió la presencia de minerales secundarios o accesorios pertenecientes al grupo de las Zeolitas, como la Mordenita y la Clinoptilolita; y minerales con estructura laminar como las arcillas montmorilloníticas. La presencia de los minerales accesorios augura devitrificación, al no ser de origen volcánico, se originaron a partir de una roca ígnea ácida de composición riolítica. El porcentaje de Zeolitas y/o Arcillas, como materiales productos de meteorización es mínimo y no ocurre en tiempos humanos, así como tampoco está sujeto a evitar su progresión, sí existe influencia de las condiciones meteóricas y de los contaminantes atmosféricos.

SUMMARY

Study the stone decay mechanisms, form natural and anthropogenic origin in the ignimbrites, to prevent damages to the stones, as well as to propose techniques of restoration and conservation with these rocks, with which are built almost all the architectural monuments listed in the Human inheritance list from Unesco in the Historical Center of Morelia, and one Historical Monument in the City of Pátzcuaro, this city is listed as a magical town. The damaged ignimbrites are samples provided from monuments of both cities, from Morelia: Cathedral, the Culture House, Capuchinas Temple, San Agustín Temple, and Primitive and National School of San Nicholas de Hidalgo; and in Patzcuaro, the Basilica of Our Lady of the Health. To compare the results, we also studied samples from the surrounding quarry stones: Jamaica, Cointzio and Tlalpujahua. The microstructural characterization was made with techniques like the X-ray Diffraction in the Siemens equipment of the IIM; we compared the mineral composition of the healthy ignimbrites with the obtained results of the altered ignimbrites. The main composition of the characterized ignimbrites is constituted by: silicon compounds: quartz and cristobalite; feldspars: albite; plagioclases: sanidine; and micas like the muscovite. The secondary or accessory minerals present belonged to the group of the Zeolites, like the Mordenite and the Clinoptilolite; and minerals with laminar structure like montmorillonite clay. The presence of accessory minerals mean the devitrification of the vitreous matrix, the secondary minerals are not from volcanic origin, they came from environment activity, and they are present in acid composition stones. The percentage of Zeolites and/or Clays, as material products of damage activity, is low, and it does not happen in human times. Their occurrence is due to geological damage and it could not be stopped by humans.

DEDICATORIAS:

A Dios

Por darme la fuerza necesaria en los momentos en que más lo necesité y bendecirme con la posibilidad de caminar a su lado durante toda mi vida.

A mis padres

José y Antonieta: Por sus consejos y la educación brindada, permitiéndome un desarrollo integral en todos los ámbitos de mi vida.

A mis hermanos:

José Alfredo: Por su ayuda económica, consejos y apoyo incondicional.

María Mercedes y María Concepción. Por su apoyo moral, y paciencia.

Y en general a todos los miembros de mi familia por su crítica constructiva, que me permitió vencer todos los obstáculos de este caminar.

A él, por su paciencia, consejos e ideas, que han enriquecido mi concepto de la vida y me han permitido verla desde otro enfoque.

AGRADECIMIENTOS

A las siguientes instituciones:

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Rúelas”, Sección de Resistencia de Materiales; Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Coordinación de la Investigación Científica de la misma Universidad.

A mi asesora de tesis: Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por su apoyo incondicional en la realización del presente trabajo, su paciencia, esmero y dedicación; su tiempo, constancia, esfuerzo y sugerencias en la dirección de la elaboración del mismo. Le agradezco infinitamente...

Al M. A. Ing. Wilfrido Martínez Molina. Por el apoyo académico, técnico y metodológico e información que mejoró la presentación del tema Zeolitas y Arcillas, síntoma de devitrificación en Ignimbritas de Michoacán, México, relacionado con la presente investigación.

Al C. José Jesús Zauno Zamudio y a la M. I. Cindy Lara Gómez. Por el apoyo y comprensión durante el desarrollo de la investigación. A don Rubén Hernández Guzmán y a mis compañeros de trabajo del Laboratorio de Materiales: Marco Antonio Mondragón Órnelas, Marco Antonio Navarrete Seras, Daniel Luna Ortiz, José Alberto Guzmán Torres, Noel Díaz González y Nayeli de Jesús Alvarado Alcaráz.

Al Dr. Juan Zárate Serrano, Dra. M. Sandra L. Bribiesca Vázquez, entre otros, organizadores del curso: Introducción a la microscopía, impartido en Octubre del 2009, en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas dependiente de la U.M.S.N.H. En particular a la Sra. Vicky por la realización de las pruebas de difracción de rayos X en el Microscopio Electrónico de Barrido.

Al CONACYT: Por el valioso apoyo económico para la realización del presente trabajo. A través del proyecto No. 59999 “Daño Antropogénico en Ignimbritas de los Monumentos Históricos, caso Morelia, Michoacán, México, Tecnología Histórica en Mamposterías para Esculpir Rocas y Elaborar Morteros de Cal”.

ÍNDICE

Contenido	Págs.
Resumen.....	i
Summary.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice.....	v
Índice de cuadros.....	viii
Índice de figuras.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MATERIALES.....	3
II.1. Michoacán.....	3
II.2. Datos generales.....	4
II.2.1. Morelia.....	4
II.2.2. Pátzcuaro.....	6
II.3. Monumentos Históricos.....	7
II.3.1. Catedral de Morelia.....	7
II.3.2. Templo de Capuchinas.....	8
II.3.3. Colegio de San Nicolás Obispo.....	8
II.3.4. Templo San Agustín.....	9
II.3.5. Basílica de Nuestra Señora de la Salud en Pátzcuaro.....	10
II.4. Estudio de las Rocas.....	10
II.5. Rocas Ígneas.....	12
II.5.1. Composición y constitución de los magmas.....	12
II.5.2. Clasificación de las rocas Ígneas.....	12
II.5.3. Minerales en las rocas ígneas.....	21
II.5.3.1. Los feldespatos.....	21

II.5.3.2. Los silicatos.....	23
II.5.4. Las riolitas.....	29
II.5.5. Las ignimbritas.....	29
III.	
PRUEBAS.....	31
III.1. La cristalografía de rayos X.....	31
III.1.1. Difracción de rayos X.....	31
III.1.2. Métodos de difracción de rayos X.....	32
III.1.3. Celda unidad.....	33
III.2. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	34
III.2.1. Antecedentes Históricos.....	34
III.2.2. Antecedentes del Microscopio Electrónico.....	34
III.2.3. Manejo de Microscopio Electrónico de Barrido	35
III.2.4. Descripción de los componentes del MEB.....	37
III.2.5. Preparación de muestras para observación en el MEB.....	38
IV. RESULTADOS.....	41
IV.1. Resultados de los Difractogramas de las pruebas realizadas en el Difractómetro de Rayos X.....	41
IV.2. Análisis general de los resultados obtenidos en el Difractómetro de Rayos X, Equipo Siemens del IIM-UMSNH, en muestras pulverizadas que pasan malla 400 ASTM.....	48
V. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.....	50
V.1. Alteración de los monumentos.....	50
V.2. Causas externas del deterioro de las rocas.....	51
V.3. Causas internas o propias de las rocas.....	52
V.4. Combinación de causas externas e internas.....	52
V.4.1. Efectos que implican la pérdida del material constructivo.....	52
V.4.2. Cambios en la coloración.....	53

V.4.3. Fracturaciones.....	54
V.5. Granitos.....	55
V.6. Conclusiones.....	57
VI. REFERENCIAS.....	59

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción:	Página:
II-1	Centro Histórico de Morelia.	6
II-2	Composición de la roca ígnea promedio en porcentaje de elementos y en la forma de óxidos.	13
II-3	Composición de las rocas ígneas por su índice de color y reconocimiento de minerales.	19
IV-1	Minerales encontrados en las ignimbritas alteradas o de los monumentos estudiados.	48
IV-2	Minerales encontrados en las ignimbritas sanas o de los bancos en explotación.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.	Descripción:	Página:
II-1	Depresión de Atécuaro.	4
II-2	Centro Histórico de Morelia.	5
II-3	Clasificación Geológica de las Rocas y los Ciclos Geológicos.	11
II-4	Clasificación de las rocas ígneas según su origen.	13
II-5	Texturas de las rocas según su tamaño.	16
II-6	Grado de cristalinidad: a) Textura holohialina, b) Textura hialocristalina y c) Textura holocristalina.	17
II-7	Serie de cristalización de Bowen	18
II-8	Diagrama de Streckeinsen o QAPF.	20
II-9	Serie de las plagioclasas.	22
II-10	Ordenamiento de los tetraedros de sílice: (a) isla de ortosilicato, (b) isla de piroxilicato, (c) cadena, (d) anillo. Los iones positivos son atraídos a los grupos de silicato.	23
II-11	La estructura laminar de los silicatos que conforman la base de las arcillas: (a) arcilla caolinita y (b) arcilla montmorillonita.	24
II-12	Diagrama de fases presión - temperatura para el SiO ₂	25
II-13	Dilatación o expansión del cuarzo. Además de la expansión regular casi lineal, una gran súbita dilatación acompaña a la transformación de fases. Sin embargo, los vidrios se expanden uniformemente.	25
II-14	Estructura típica de la zeolitas: (a) atómica, (b) tetraédrica, (c) cristalina.	26
II-15	Hornblenda.	27
II-16	Piroxeno.	28
II-17	Diagrama de Streckeinsen, rocas volcánicas.	29

Figura.	Descripción:	Página:
III-01	Ley de Bragg.	31
III-02	Microscopio Electrónico de Barrido.	35
III-03	Operación del Microscopio Electrónico de Barrido.	36
III-04	Diagrama esquemático del cañón electrónico.	37
III-05	Imagen de un Microscopio Óptico y de un Microscopio Electrónico de Barrido.	40
IV- 01	Difractograma Casa de la Cultura, Morelia.	41
IV- 02	Difractograma Catedral, Morelia.	42
IV- 03	Difractograma Templo de Capuchinas, Morelia.	42
IV- 04	Difractograma Templo de San Agustín, Morelia.	43
IV- 05	Difractograma Colegio de San Nicolás, Morelia.	43
IV- 06	Difractograma Basílica de Nuestra Señora de la Salud, Pátzcuaro.	44
IV- 07	Difractograma Tlalpujahua 1	44
IV- 08	Difractograma Tlalpujahua 2	45
IV- 09	Difractograma Jamaica 2	45
IV- 10	Difractograma Cointzio 1	46
IV-11	Difractograma Minerales accesorios de ignimbritas sanas y deterioradas.	46
IV-12	Basílica de Nuestra Señora de la Salud de Pátzcuaro. Identificación de minerales accesorios.	47
IV-13	Catedral de Morelia. Identificación de minerales accesorios.	47
IV- 14	Jamaica 2. Identificación de minerales accesorios.	48

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo consiste en el estudio de tres bancos de ignimbritas sanas: Jamaica, Cointzio y Tlalpujahua. Se pretende realizar una comparación con las ignimbritas con las cuales están contruidos algunos monumentos de las Ciudades de Morelia y Pátzcuaro. La primera de ellas declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, título condicionado a restaurar y preservar los monumentos para su exposición futura, la segunda citada como uno de los 37 pueblos Mágicos de México, declarada por la UNESCO también.

Anteriormente los monumentos de la Ciudad de Morelia estaban recubiertos con un mortero de cal (Ramírez, 1985), y pintados; pero la ciudadanía, el Gobierno y los turistas no aceptaron esta solución.

Se pretende hacer una investigación exhaustiva para encontrar los minerales que componen dichas rocas y a partir de esta comparación entre rocas sanas y alteradas, encontrar algún consolidante o recubrimiento químico que además de proteger a las rocas les permite respirar o ventilarse, y así mismo sea capaz de conservar su belleza, específicamente el color característico.

Lo idóneo sería encontrar dentro de las rocas sanas el banco de materiales, que nos permitiera restaurar los sitios y monumentos históricos, además de reponer las piezas faltantes. Dicho banco debe tener un comportamiento semejante al ideal, sugerido por la UNESCO. Uno de los principios de restauración es que debe usarse material similar, pero que permita su identificación como nuevo (Kozlowski, 1990 y Alessandrini, 1978).

La autenticidad es uno de los principios básicos en el campo de la conservación y uno de los indicadores más importantes en las evaluaciones para la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO. Ha estado presente en la teoría de la restauración desde los escritos del inglés John Ruskin y manifiestan en documentos internacionales como la carta de Atenas de 1931 y la carta de Venecia de 1964, las cuales rigen la actividad restauratoria a nivel internacional. La carta de San Antonio, documento reciente, explora aún más este tema relacionándolo con aspectos tales como la identidad, la Historia, los materiales, los valores sociales y la economía, entre otros para llegar a una serie de recomendaciones. (Paredes, 2001).

La Arquitectura de los últimos años de la Ciudad de Morelia, se salvó de la incrustación de rascacielos y de grandes paramentos de vidrio que llegaron a fragmentar otros centros históricos; estos se debió a la preocupación de la población con respecto a la conservación, manifiesta en la normatividad desde 1930, siendo Gobernador del Estado Lázaro Cárdenas, que decretó: “de utilidad Pública, la vigilancia y conservación de los inmuebles cuyo valor histórico se determina”. Esta legislación fue seguida en 1956 por el Reglamento para la Conservación del Aspecto Típico y Colonial de la Ciudad de Morelia, que además de incluir una lista puntual de inmuebles intocables, marca pautas con respecto a la infraestructura, uso del suelo y anuncios dentro de la zona central de la Ciudad.

Los principales problemas de deterioro en los monumentos arquitectónicos son: faltantes (ausencia de bloques completos o partes), eflorescencias (manchas blancas de salitre por humedad, que se presentan por la falta de impermeabilización de las cimentaciones en el momento de la construcción, y por ende permiten que el agua del subsuelo suba por capilaridad a los muros o elementos constructivos verticales, llevando consigo sales del suelo que reaccionan con las rocas formando los cristales del sal mencionados), manchas de humedad (ídem a la anterior pero sin tantas sales), exfoliaciones (desprendimiento de capas de concéntricas de roca), vida vegetal (líquenes y musgos) y animal (bacterias), destrucción de bloques por usarse como soporte del cableado eléctrico, telefónico o como escaparate de los comerciantes ambulantes, grafiti con pintura de aceite, pegas de papel (Alonso, 1998).

La caracterización microestructural con técnicas como la Difracción de Rayos X y el Método de refinación de Rietveld, han descubierto la presencia de minerales secundarios o accesorios, con la identificación de estos minerales en las ignimbritas, se pretende elegir el banco de materiales que no presente minerales fácilmente alterables o aquel que no esté siendo afectado por un proceso de meteorización. Las fachadas expuestas de los monumentos arquitectónicos han mostrado daño, que puede decirse es antropogénico en tiempos humanos, pero también es diagenético en tiempos geológicos.

II. MATERIALES

II.1 Michoacán

Michoacán de Ocampo forma parte de la región Centro Occidente de México, se localiza, entre los 20°23'44 y 18°09'49 de latitud norte y los 100°04'48 y 103°44'20 de latitud oeste. Abarca una superficie de 58,836 km². Limita al norte con los estados de Jalisco y Guanajuato, al noreste con Querétaro, al este con el Estado de México, al sureste y sur con Guerrero, al oeste con Colima y al suroeste con el Océano Pacífico.

La fisiografía del territorio michoacano es una de las más accidentadas de México, con prominentes elevaciones y notables depresiones; tales características resultan de la confluencia en la entidad de cinco grandes unidades naturales: Planicie Costera, Sierra Madre del Sur, Depresión de Balsas, Sistema Volcánico Transversal y Altiplanicie Mexicana. El estado se localiza en las provincias geológicas denominadas Sierra Madre del Sur y Sistema Volcánico Transversal. Se encuentra en colindancia de las Placas Tectónicas (Holmes, 1966) de Cocos, el Cinturón de Fuego del Pacífico de Norteamérica; así como en la intersección geométrica del Eje Volcánico Mexicano y la Sierra Madre Occidental. Es una zona relativamente joven que se encuentra sujeta a continuas eyecciones magmáticas que son las promotoras de las rocas ígneas extrusivas. Los principales factores geológicos que han dado lugar al paisaje característico de la Sierra Madre del Sur son el magmatismo y el tectonismo; en la zona costera los procesos de erosión-depositación marina, además de los fenómenos tectónicos y en el Sistema Volcánico, han sido el vulcanismo y fenómenos asociados.

La ciudad de Morelia se localiza en la intersección de dos provincias geológicas. Al sur, el vulcanismo miocénico formó la sierra de mil cumbres (SMC), que formó parte de la Sierra Madre del Sur. Al norte se encuentran volcanes monogenéticos y conos de lavas pertenecientes al campo volcánico Michoacán- Guanajuato, que formó parte del Cinturón Volcánico Mexicano. Estos últimos cubren las secuencias lacustres del Mioceno-Plioceno emplazados en cuencas pertenecientes a un segmento del sistema de fallas Morelia-Acambay; las ignimbritas que se usaron en la construcción del Centro Histórico de Morelia tuvieron su origen en la depresión de Atécuaro (Garduño et al, 1999).



Fig.01. Depresión de Atécuaro.

<http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/contenidos/articulos/geografica/modelos.pdf>. Consultado el 19 de abril del 2010.

II.2. Datos generales

II.2.1. Morelia.

Capital del Estado de Michoacán, fundada el 18 de mayo de 1541 por don Juan de Alvarado, Juan de Villaseñor y Luís de León Romano, por mandato del primer Virrey de la Nueva España, don Antonio de Mendoza. Su nombre en la época prehispánica fue Guayangareo, en la época Colonial recibió el nombre de *Ciudad de Mechuacán*, que cambió de nombre el 6 de febrero de 1545 por ciudad de *Valladolid* y el 12 de septiembre de 1828, por Morelia, en honor al héroe de la Independencia de México, don José María Morelos y Pavón, quien nació en esta ciudad. Existen otros sobrenombres de Morelia; “La ciudad de la Cantera Rosa”, “La Ciudad de las Puertas Abiertas”, “La Rosa de los Vientos”, “El Jardín de la Nueva España” y religiosamente es conocido como “Morelia del Sagrado Corazón de Jesús”, cuyas fiestas se celebran en junio.

La Ciudad está situada en el Valle de Guayangareo, formada por el repliegue del Eje Neovolcánico Transversal en la región norte del Estado; se encuentra rodeado de lomas y colinas entre las que destacan al Este el Cerro del Punhuato; al Oeste el Pico del Quinceo; al Sur la Loma de Santa María y el Pico de El Águila. Morelia colinda al Norte

En el cuadro siguiente se indican los nombres de los monumentos, según corresponden a la imagen anterior.

Centro Histórico de Morelia	
1. Catedral	20. Ex-convento de Capuchinas
2. Palacio de Gobierno	21. Cámara de Diputados
4. Plaza de Armas	22. Antigua Casa del Diezmo (banco)
5. Palacio de Justicia	23. Casa de García Obeso (banco)
6. Museo Michoacano	24. Antiguo Hospital San Juan de Dios (hotel)
7. Palacio Municipal	25. Plaza Melchor Ocampo
8. Templo de La Merced	26. Museo de Arte Colonial
9. Tesorería de la Universidad	34. Palacio Federal
10. Templo de Las Rosas	35. Templo de las Monjas
11. Conservatorio de Música	36. Templo de San José
12. Jardín de Las Rosas	37. Casa de la Cultura
13. Palacio Clavijero	50. Teatro Melchor Ocampo
14. Colegio de San Nicolás	63. Central Camionera
15. Biblioteca Pública	66. Hotel Virrey de Mendoza
16. Casa Natal de Morelos	67. Escuela P. de Bellas Artes
17. Ex-Convento de San Agustín	68. Centro Cultural Universitario
18. Casa Museo José Ma. Morelos	70. Mercado Independencia
19. Palacio del Artesano (Casa de las Artesanías)	71. Museo del Estado

Cuadro 1. Centro Histórico de Morelia, <http://www.mapasmexico.net/mapa-michoacan.html> Consultado 19 de abril del 2010.

II.2.2. Pátzcuaro

Una de las ciudades con mayor tradición y personalidad Arquitectónica en la república Mexicana es Pátzcuaro. Situada en las orillas del lago, del cual lleva su nombre, fue desde la época prehispánica un lugar propio para el asentamiento humano.

La ciudad de Pátzcuaro está ubicada en el centro del Estado de Michoacán en el occidente del país, en un sitio estratégico en medio de la cordillera volcánica que sirve de parteaguas a las zonas conocidas como Tierra Caliente y la Altiplanicie Mexicana situada en el paralelo 19° de latitud norte y la zona tórrida terrestre, la altura de 2150 metros. Su clima es templado húmedo con una temperatura media anual de 16.4 °C.

Inicialmente Don Vasco de Quiroga, primer Obispo de Michoacán, escogió este sitio para Capital del Estado, incluso ahí comenzó a edificarse la Catedral, hoy Santuario de Nuestra Señora de la Salud, pero por problemas políticos, hubo de trasladarse a Morelia (Correa, 1974).

En la actualidad conserva una riqueza arquitectónica que ha surgido a través de su historia centenaria y que incluye edificios religiosos que van desde la Basílica de Nuestra Señora de la Salud, hasta las humildes Capillas de barrio, pasando por las Iglesias y conventos de diversas órdenes religiosas (Silva, 2005).

II.3. Monumentos Históricos

A continuación se realiza una breve descripción de los monumentos en los cuales se tomaron las muestras de ignimbritas alteradas, a las cuales se les realizó el análisis por Difracción de Rayos X y Microscopia Electrónica de Barrido.

II.3.1 Catedral de Morelia

Catedral de Morelia (de 1660 a 1744) este edificio fue construido en el siglo XVIII, en la época de la Colonia Española, de estilo Barroco y está realizado en cantera rosa que le da un color peculiar y característico. Impresionante monumento con 2 torres gemelas de 66.8 metros, dentro del estilo Barroco, las más altas del continente Americano. Es un recinto religioso, sede de la Arquidiócesis de Morelia de la Iglesia católica en México. Este recinto está dedicado a la Transfiguración y en su interior alberga 2 imágenes muy veneradas, Sagrado Corazón de Jesús que es el Santo Patrono de la Ciudad, y el Señor de las Sacristía, un Cristo muy antiguo realizado en el siglo XVI en pasta de caña de maíz. Su iluminación escénica es de singular belleza y los fines de semana ofrecen un espectáculo de luz, sonido y fuegos artificiales. Entre los tesoros que guarda están el manifestador de plata estilo barroco del siglo XVIII; la pila bautismal de plata, estilo neoclásico también del siglo XVIII, el órgano monumental de principios del siglo XX que consta de 4600 flautas o voces. Relieves y esculturas, labrados en cantera blanca, contrastan armoniosamente con la cantera rosa y violácea empleada en el edificio (Mandujano, 1995).

Conservación y restauración de la Catedral. En 1983 se intentó restaurar el color de la cantera, pero finalmente se obtuvo un color más oscuro que fácilmente salta a la vista. Entre 2007 y 2008 se restauró una parte del atrio oriental, así como en 2009 se cambió el suelo del atrio frontal.

Para la preservación de los monumentos y edificios históricos es necesario conocer los materiales con los cuales se construyeron; el conocimiento de ellos se basa en identificar la composición mineralógica, los rasgos geoquímicos y la petrografía de estos

materiales. En cada caso se debe hacer un estudio minucioso y detallado para explicarnos los mecanismos y particularidades del intemperismo natural y/o urbano y de esta forma proponer las metodologías adecuadas para su mejoramiento, restauración y conservación de dichos monumentos que forman parte esencial del patrimonio histórico de la ciudad de Morelia.

II.3.2. Templo de Capuchinas

En la década de los treinta, del siglo XVIII, se construyó el conjunto arquitectónico llamado Templo de Capuchinas, a partir de extramuros de una pequeña capilla en donde se veneraba la imagen de la Virgen de Cosamaloapan. La construcción del Templo la empezó a construir Don Mateo de la Cerda y la continuó su hijo Don Antonio, ambos caciques de Pátzcuaro, pero a su muerte, los sucesores, carecieron de medios para proseguir e hicieron donación y traspaso a Marcos Muñoz de la Sanabria, quien costeó las obras del Templo y convento hasta su conclusión en 1737.

El 24 de febrero de 1737 fue ocupado por las monjas para el servicio religioso y fue habitado por indígenas nobles e hijas de caciques. El barroco de la fachada de este templo, de finas columnas corintias, es evidencia de un fuerte acento popular; la torre resultó la más barroca de la ciudad, con un efecto vibratorio y dinámico derivado de la copiosa molduración en sus cornisas y columnas, destacándose el uso de la columna salomónica del segundo cuerpo, uno de los rasgos de estilo de esa época. El interior se enriqueció con retablos de madera dorado (Silva, 1995).

El inmueble se ubica en la calle Juan de Ortega y Montañez, marcado con el número 290, del sector Nueva España y su orientación es de Norte a Sur.

II.3.3 Colegio de San Nicolás Obispo

El Colegio de San Nicolás fue fundado en el año de 1540, en la Ciudad de Pátzcuaro, por el humanista Vasco de Quiroga, quien le dió el nombre de Real Colegio de San Nicolás de Obispo. En 1580 se traslada a Valladolid, hoy Morelia. Es clausurado en 1810 debido al movimiento de Independencia. El 17 de enero de 1847, siendo Gobernador del Estado, Melchor Ocampo, lo reabre y seculariza dándole el nombre de Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo.

En el 1882 el Colegio es reconstruido por el Ing. Belga Guillermo Wodon de Sorinne. No se tienen datos precisos del número de Maestros y Estudiantes con que dió inicio el Colegio de San Nicolás de Obispo en 1540 en la Ciudad de Pátzcuaro, ya que su principal encomiendo era formar Clérigos para evangelizar e instruir a los hijos naturales en la cultura Europea. Su crecimiento más destacado sucedió cuando se trasladó en 1580 a Valladolid, hoy Morelia.

En octubre de 1917, el Ing. Don Pascual Ortiz Rubio, fundó la Universidad Michoacana, de la que el Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo es su Alma Máter.

Su construcción consta de tres patios, cuyas dimensiones disminuyen jerárquicamente. El principal o patio de honor, cuenta en sus dos niveles con arquería apoyada en esbeltos pilares. Tableros guardamalletas y sobria ornamentación geométrica muestran el carácter racional, moderado, del barroco local. En la fachada principal se advierte un ritmo barroco que conjuga la simetría visual del conjunto con la distribución desigual de los elementos, como las pilastras. Está elaborado en sillería lo que permite el lucimiento de la cantera labrada y pulida, cuyo juego de luces y sombras, por medio de una rica molduración, se plasma en el eje central de la portada, el balcón principal y el imafronte que originalmente mostraba tres escudos en sus respectivos medallones. (Paredes, 2001).

II.3.4. Templo de San Agustín

Fue fundado en 1549 de tendencia Agustina que se destaca por una construcción del conjunto conventual que consta de: casa, templo, atrio y huerta. Construida por Diego de Salamanca En el altar mayor se venera la imagen de Nuestra Señora del Socorro y la imagen de San Nicolás de Tolentino. En la primera mitad del siglo XVIII, el Padre Franciscano Juan Andrete construyó al pie del presbiterio la cripta donde reposan los restos de muchos religiosos. El convento fue confiscado en la Reforma y legalmente readquirido tiempo después. En los ochentas formó parte de las Casas de Estudiante de la Coordinadora de Universitarios en Lucha dependientes de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. En consecuencia se ha iniciado una destrucción lenta pero irreversible de uno de los restos más venerables de la Arquitectura Colonial de México.

El interior del Templo contrasta de manera sorprendente con la sobriedad propia de la arquitectura conventual del siglo XVI, por adentro hay exuberancia de imágenes con escultura de los siglos XVI- XIX; pinturas del periodo barroco y altares neoclásicos de los siglos XIX y XX.

El Templo Agustino, hoy por hoy, es uno de los edificios más importantes y representativos de todo Michoacán: Probablemente sea la edificación más antigua de Morelia. El origen y el desarrollo de este Convento se ancla en la evangelización del siglo XVI

II.3.5. Basílica de Nuestra Señora de la Salud en Pátzcuaro.

Es el templo más importante de Pátzcuaro, resultado de varias reconstrucciones. Funcionó como Sede Catedralicia hasta que ésta fue trasladada a Valladolid, hoy Morelia, en 1580. En él se venera a la Virgen de la Salud, patrona de la población, modelada en pasta de caña de maíz y miel de orquídeas, mezcla usada en la fabricación de imágenes durante el siglo XVI. Aquí reposan los restos mortales de don Vasco de Quiroga. (Silva, 2005).

El proyecto original era construir una Catedral “Con planta poligonal con tramos perpendiculares unidos por otros triangulares, a semejanza de algunos Templos Bizantinos. Se había proyectado como un Templo de cinco naves radiales con un gran altar en el centro, mientras que en la actualidad el edificio muestra una fachada de sencillas líneas clásicas y escasa ornamentación, con techumbre de dos aguas y una torre inconclusa a su costado.

El edificio sufrió incontables contratiempos a lo largo de su construcción, que por una parte impidieron su total realización de acuerdo al proyecto de Vasco de Quiroga, y por la otra, debido a la destrucción por temblores y modificaciones diversas.

La Basílica de Nuestra Señora de la Salud se ubica en las calles de Lerín y Serrato en el Centro de la Ciudad Pátzcuaro.

II.4. Estudio de las Rocas

Roca: Material sólido compuesto por un agregado cohesionado de proporciones no definidas de uno o varios minerales.

Las rocas se pueden clasificar de acuerdo a la composición química, la textura, la permeabilidad, el origen, entre otros. El criterio más usado es el origen o mecanismo de su formación; y de acuerdo a este criterio se dividen en ígneas (magnéticas), sedimentarias y metamórficas. Estas clasificaciones se dan a su vez porque las rocas están sometidas a continuos cambios por las acciones de los agentes geológicos que se llevan a cabo en el interior y exterior de la estructura de la tierra por lo que son llamados los ciclos geológicos.

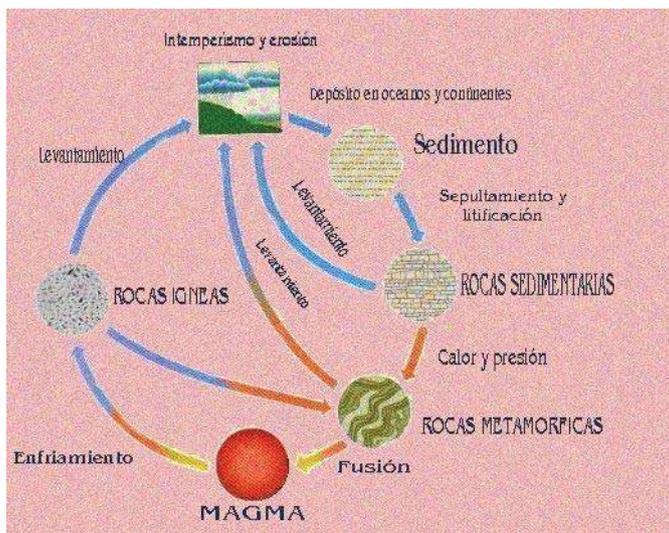


Fig. 03 Clasificación Geológica de las Rocas y los Ciclos Geológicos,

<http://www.uam.es/personal.pdi/ciencias/casado/GEORED/Endogenas/igneas.htm>, consultada el 26 mayo de 2010

Primero se originan las rocas ígneas, las cuales son formadas en el interior de la corteza terrestre con una alta presión y gases disueltos, los cuales generan una expulsión a través de las grietas hasta la superficie terrestre en forma de erupción volcánica, donde el magma y los materiales expulsados se enfrían y se cristalizan cuando hacen contacto con el agua y el anhídrido carbónico. Con el paso del tiempo estos materiales, sufren un proceso de meteorización, es decir se desintegran y descomponen; y por la acción del agua, viento, la raíces de las plantas y del hielo; son transportados y depositados en el fondo de los ríos y lagos donde con los años, se van acumulando fragmentos de material formando gruesas capas de sedimentos. Las capas más profundas, al ser aplastadas por el peso de la arena o arcilla que tienen se enciman, se sedimentan y cristalizan formando las rocas sedimentarias.

Después que las rocas ígneas y sedimentarias quedan sometidas a una alteración, se modifican en su estructura sólida por temperaturas y presiones elevadas, o bien al estar en

contacto con una masa magmática, dan lugar a la formación de las rocas metamórficas, llamadas así porque su composición química es diferente de la de la roca madre de la cual proceden.

Para clasificar una roca ya sea en ígnea, sedimentaria o metamórfica, es necesario conocer su origen y conformación; su composición química e identificar el grupo al que pertenece; definir su orden y su textura, etc. Cada roca merece un tratamiento especial de examinación, en este caso se tratará fundamentalmente de las rocas ígneas, principalmente las ígneas extrusivas de composición riolítica.

II.5 Rocas ígneas

Las rocas ígneas o magmáticas constituyen el 95% de la porción sólida de la tierra. Las rocas ígneas se forman a partir del enfriamiento y solidificación del magma.

II.5.1. Composición y constitución de los magmas

(Tyrrell, 1984), define al magma como una masa espesa, pastosa y similar al potaje. Sus elementos más comunes hasta ahora, y que constituyen el 99.5% del total son 9; oxígeno, sílice, aluminio, hierro, calcio, sodio, potasio, magnesio y titanio. No obstante existen algunos elementos raros como el hidrógeno, el flúor, el cloro y el azufre.

La forma del flujo de lava depende principalmente de la fluidez del magma, que, nuevamente depende de su composición y de la temperatura de erupción, de tal modo las lavas básicas tales como las de basalto, son altamente móviles y se mueven a través de grandes distancias; mientras que los magmas ácidos, tales como la Riolita y la Traquita al ser mas viscosos son lentos en su flujo y permanecen en masas jorobadas, frecuentemente en masas bulbosas con lados muy inclinados, con respecto al orificio de la erupción (Tyrrell, 1984).

II.5.2. Clasificación de las rocas ígneas

A). Según su origen. Las rocas ígneas se forman a partir del enfriamiento y solidificación del magma, si se cristalizan en una zona profunda de la corteza terrestre se denominan rocas *intrusivas o plutónicas*, los cuales tienden a ser de grano más grueso y no contienen inclusiones gaseosas o de vidrio. Por el contrario si la solidificación magmática se produce en la superficie de la tierra, a estas rocas se les denomina *extrusivas o volcánicas* y generalmente son de grano fino. Por último, si la solidificación magmática se

produce cerca de la superficie de la tierra de una manera relativamente rápida y el magma rellena pequeños depósitos (por ejemplo: diques, filones, sills, lacolitos, etc.), a las rocas así formadas se les denomina subvolcánicas o hipoabisales y/o filonianas.

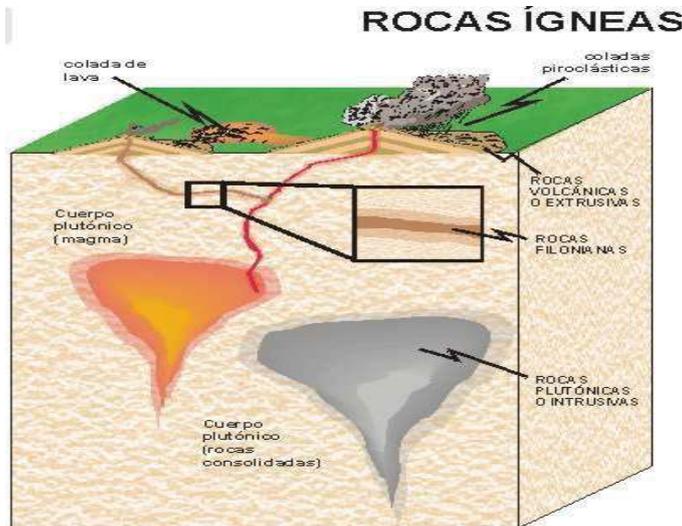


Fig. 04. Clasificación de las rocas ígneas según su origen.

http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/casado/GEORED/Endogenas/igneas.htm Consultado el 14 de enero de 2010

b). De acuerdo a su composición química. Clark, y Washington, 1924, dedujeron a partir de más de 5000 análisis, la siguiente tabla. En la columna 1 se presenta la composición de la roca ígnea promedio en porcentaje de elementos y en la columna 2 en forma de óxidos.

1		2	
ELEMENTOS	%	ÓXIDOS	%
Oxígeno	46.59	SiO ₂	59.12
Sílice	27.72	Al ₂ O ₃	15.34
Aluminio	8.13	Fe ₂ O ₃	3.08
Hierro	5.01	FeO	3.80
Calcio	3.63	MgO	3.49
Sodio	2.85	CaO	5.08
Potasio	2.60	Na ₂ O	3.84
Magnesio	2.09	K ₂ O	3.13
Titanio	0.63	H ₂ O	1.15

Fósforo	0.13	CO ₂	0.102
Hidrógeno	0.13	TiO ₂	1.050
Manganeso	0.10	ZrO ₂	0.039
Azufre	0.052	P ₂ O ₅	0.299
Bario	0.050	Cl	0.048
Cloro	0.048	F	0.030
Cromo	0.037	S	0.052
Carbono	0.032	(Ce, Y) ₂ O ₃	0.020
Flúor	0.030	Cr ₂ O ₃	0.055
Zirconio	0.026	V ₂ O ₃	0.026
Níquel	0.020	MnO	0.124
Estroncio	0.019	NiO	0.025
Vanadio	0.017	BaO	0.055
Cerio e Itrio	0.015	SrO	0.022
Cobre	0.010	Resto	0.023
Resto de los elementos	0.034		

Cuadro2. Composición de la roca ígnea promedio en porcentaje de elementos y en la forma de óxidos. Tomado del libro. Tyrrell G.W, 1984. Principios de petrología (8th Ed.). Continental, S. A. de C. V., México.

c). Según su composición mineralógica y basándose en el contenido de óxidos de Silicio o Silicatos las rocas se clasifican así:

Ácidas. Su contenido de Sílice es mayor al 65% de SiO₂. Ejemplos: Riolita, dacita, etc, contienen cuarzo.

Intermedias. Estas rocas ígneas contienen entre 52 y 65% de SiO₂. Ejemplo: andesita. Contiene feldespatos alcalinos es decir aquellos que contienen K y Na y no contiene cuarzo.

Básicas. Rocas ígneas que tienen bajo contenido de entre 45 y 52% y alto contenido de hierro- magnesio. Ejemplo: basalto. Contiene feldespato cálcico.

Ultrabásicas. Contiene menos del 45% de silicio. Ejemplos: picrita y komatita. Contiene minerales oscuros como piroxenos y olivinos.

d). Textura

Tarback, 2005, define a la textura como el tamaño de los granos, de los minerales que componen la roca, este tamaño depende de la velocidad del enfriamiento y cristalización del magma. Un grado de enfriamiento y cristalización lento origina granos grandes, por el contrario un grado de enfriamiento y cristalización rápido, origina granos pequeños. Las siguientes son las principales texturas de las rocas ígneas.

Fanerítica. Es aquella roca en la que los cristales pueden reconocerse a simple vista. Esta textura se da en rocas que han sufrido un proceso lento de enfriamiento, es decir aquellas que han perdido calor de una forma gradual y lenta. Típica de rocas intrusivas o plutónicas. Se pueden distinguir varios tamaños de grano dentro de este grupo:

Grano muy grueso. Cuando los granos tienen tamaño mayores de 30mm.

Grano grueso. Cuando los granos tienen tamaño entre 30 y 5mm.

Grano medio. Cuando los granos tienen tamaños entre 5 y 2mm.

Grano fino. Cuando los granos su tamaño es menor de 2mm, pero son visibles.

Afanítica. Es aquella en que los cristales no pueden reconocerse a simple vista y es necesario una lupa o un microscopio. El proceso de enfriamiento se produjo de una forma más o menos rápida. Esta textura es típica de las rocas volcánicas y subvolcánicas. Se pueden distinguir 2 clases dentro de este grupo.

Microcristalinas. Cuando los cristales son reconocidos con el microscopio.

Criptocristalinas. Cuando los cristales no son reconocidos con el microscopio.

Vítrea. Es una textura propia de rocas extrusivas que han tenido un enfriamiento muy rápido en la superficie, lo cual determina que se formen vidrios y no cristales.

Porfirítica. Es una textura compuesta por 2 tamaños de grano diferentes, lo que refleja un cambio brusco en la velocidad de enfriamiento en el momento en que se estaba cristalizando el magma.

Pegmatítica. Es una textura constituida por cristales de tamaños mayores a 3cm. En este grupo puede presentarse también una textura vesicular de cavidades formadas por gases que salen de la roca en el proceso de enfriamiento. El escape de los gases distiende el

material fundido con la producción de cavidades, burbujas o vesículas que pueden ser esféricas, elípticas, cilíndricas o irregulares en su forma. Se han encontrado vesículas tubulares y amígdalas.

Las amígdalas son rellenos de las vesículas por minerales secundarios y se denominan así debido a que sus formas a veces sugieren un parecido a las almendras. Los minerales de relleno pueden ser calcita, y varias formas de sílice, zeolitas o diversos silicatos ferromagnesianos hidratados denominados “tierras verdes”.



Figura 05. Texturas de las rocas según su tamaño. https://www.codelcoeduca.cl/images/proceso-productivo/exploracion/tipo_de_roca_textura.jpg. Consultado el 20 de junio de 2010.

e). Distribución de tamaños de los cristales.

Equigranular. El tamaño de todos los cristales es parecido.

Inequigranular. La roca existe una distribución de tamaños de grano muy amplia. Se pueden distinguir varios tipos de distribuciones.

Unimodal. La morfología y dimensión de los cristales es homogénea o similar.

Bimodal. Cuando se pueden distinguir 2 tipos de cristales, agrupados por su morfología y dimensión.

Seriada. La morfología y dimensión de los cristales es heterogénea, existen múltiples tamaños.

Porfírica. Cuando se observa una serie de cristales de gran tamaño englobados en una matriz compuesta por granos de un tamaño sensiblemente menor, es decir, existen 2 poblaciones distintas de cristales

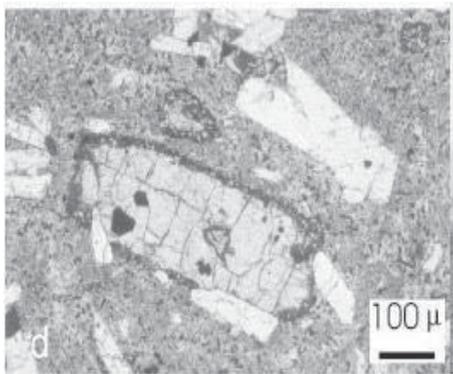
f). Grado de cristalinidad

Cuando un magma se enfría muy rápidamente, y no hay tiempo suficiente para que los átomos ni iones se agrupen formando una estructura cristalina, el resultado de la solidificación es la formación de un vidrio. En función del porcentaje de vidrio presente en una roca podemos clasificarla como:

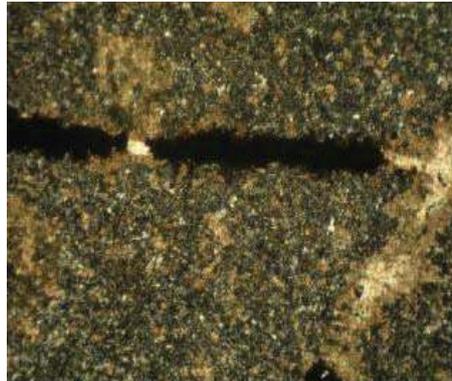
Holohialinas. Son rocas que están compuestas por más del 90% en volumen de vidrio, lo que suele ser característico de las rocas volcánicas lávicas. Se dice que presentan una textura vítrea si forman vidrios y no cristales

Hialocristalinas. Son rocas que están compuestas en parte por vidrio y en parte por cristales, sin que ninguno de estos 2 componentes supere el 90% del volumen total.

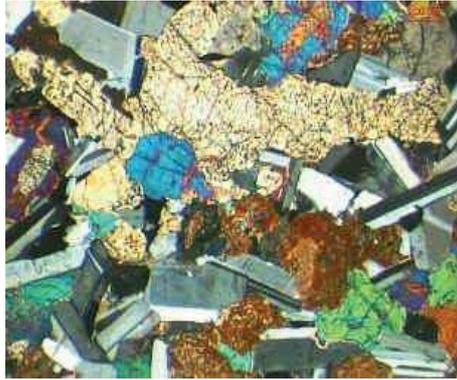
Holocristalinas. Son rocas que están compuestas por más del 90% en volumen de cristales, lo que suele ser característico de las rocas plutónicas.



a). Textura holohialina



b). Textura hialocristalina



c). Textura holocrystalina

Fig. 06. Grado de cristalinidad: a) Textura holohialina, b). Textura hialocrystalina y c). Textura holocrystalina.

<http://images.google.com/images%3Fq%3Dcristales%2Bequigranulares%26hl%3Des%26tbs%3Disch:1>, consultado del día 20 de junio de 2010

Los diferentes silicatos que constituyen las rocas ígneas, cristalizan en un orden determinado, que está condicionado por la temperatura. La Serie de Cristalización de Bowen, nos muestran el orden de cristalización de los distintos silicatos conforme disminuye la temperatura de un magma. En este esquema evolutivo se pueden distinguir 3 grupos de minerales: los ferromagnesianos, las plagioclasas y los silicatos no ferromagnesianos.

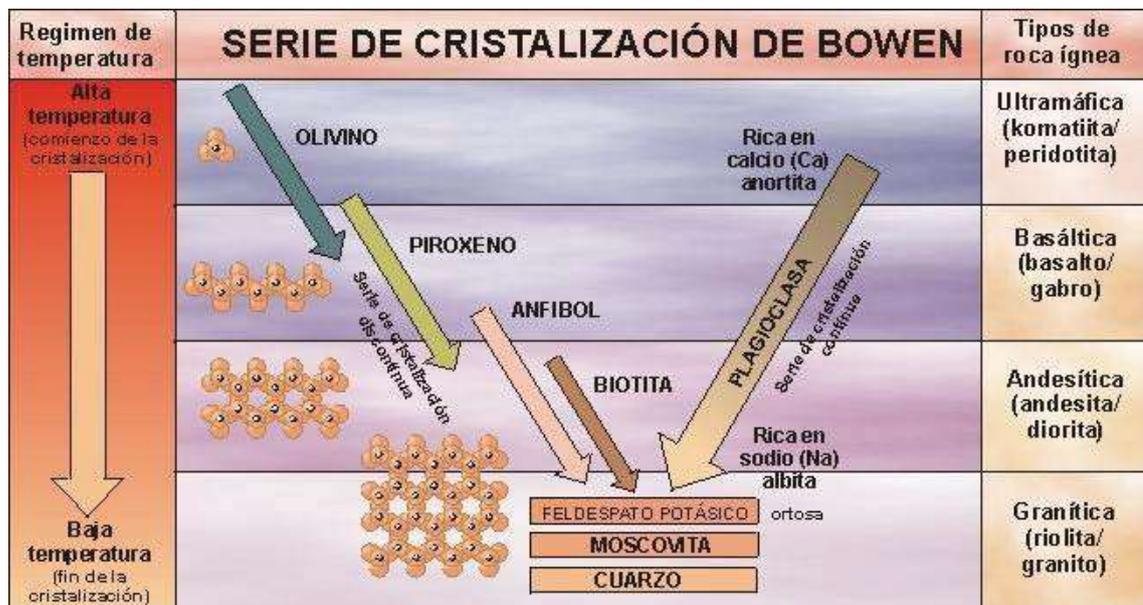


Fig. 07. Serie de cristalización de Bowen.

http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/casado/GEORED/Endogenas/igneas.htm. Consultada el 14 de enero de 2010.

g). Tarbuck, 2005 define la siguiente clasificación de los silicatos:

Los ferromagnesianos. Denominados así por su alto contenido en hierro y magnesio (olivino, piroxenos, anfíboles, biotita) debido a su composición son minerales de colores más oscuros. Forman una serie de cristalización discontinua y cristalizan en un rango de temperaturas altas. También denominadas máficas.

Las plagioclasas. Forman una serie de cristalización continua entre la anortita y la albita. Cristalizan también en un intervalo de temperatura alta-media.

Silicatos no ferromagnesianos (Cuarzo, moscovita, ortosa, plagioclasas y feldespatoides). Son los minerales que cristalizan a menor temperatura. Estos minerales contienen una mayor proporción de Aluminio (Al), Potasio (K) Calcio (Ca) y Sodio (Na), que de Hierro (Fe) y Magnesio (Mg). También denominadas félsicas. Son rocas con tonalidades claras.

h). Índice de color

Es la proporción entre minerales silicatados claros y oscuros expresados en %.

Los minerales claros están compuestos principalmente por Silicio y Aluminio y se denominan leucocratos: cuarzo, moscovita, feldespato K, plagioclasa y feldespatoides.

Los minerales oscuros están compuestos principalmente por Hierro, Magnesio y Calcio y se denominan melanocratos: olivino, piroxenos, anfíboles, biotita. Finalmente y en función de la textura y de la composición química que presentan las rocas ígneas se resume en la siguiente tabla.

COMPOSICIÓN DE LAS ROCAS ÍGNEAS POR SU ÍNDICE DE COLOR Y SU CONTENIDO DE SÍLICE				
Modo de ocurrencia.	ácido	intermedio	Básico	ultrabásico
Intrusivo	Granito	Diorita	Gabro	Peridotita
Extrusivo	Riolita	Andesita	Basalto	Komatiita

Cuadro 3. Composición de las rocas ígneas por su índice de color y reconocimiento de minerales.

http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/casado/GEORED/Endogenas/icolor.htm Consultado 14 de enero de 2010.

I). Diagrama de STRECKEISEN (Triángulo doble de STRECKEISEN):

La nomenclatura siguiente se funda en las reglas de la Unión Internacional de las Ciencias Geológicas. Dichas reglas se presenta en el triángulo doble de Streckeisen y otros diagramas (Orozco, 2004). El diagrama "STRECKEISEN" o "QAPF" es actualmente el diagrama más "oficial" en la denominación de las rocas ígneas.

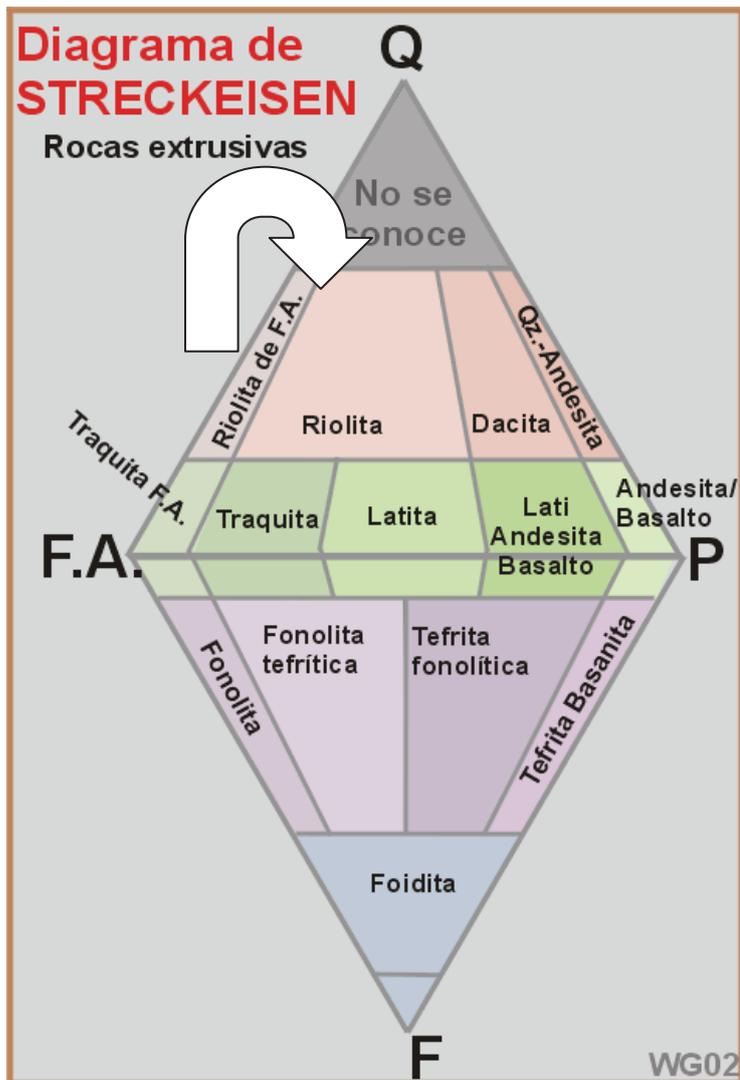


Fig. 08. Diagrama de Streckeisen o QAPF. <http://www.geovirtual.cl/geologiageneral/ggcap04a-s.htm> Consultado el 06 de junio del 2010.

Solamente el contenido modal de 4 minerales en una muestra (y la textura) definen al final el nombre de la roca. Los cuatro parámetros del triángulo doble de Streckeisen son:

1. Q = Cuarzo y otros minerales de SiO_2 (Cristobalita, Tridimita).
2. A = Feldespato alcalino (feldespato potásico incluido perfito y albita con menos de 5%

del componente anortita, sanidina).

3. P = Plagioclasa (An 5 a 100), scapolita.

4. F = Feldespatoides: leucita, nefelina y analcima y los productos de transformación de estos minerales.

Se convierten los porcentajes de volumen de feldespatos alcalinos (A), Plagioclasas (P), Cuarzo (Q) o Feldespatoides (F) a 100% y los resultados se presentan en el triángulo doble de Streckeisen. De tal modo se puede clasificar una roca magmática y se obtiene la denominación de la roca en cuestión.

II.5.3. Minerales en las rocas ígneas

Feldespatos, cuarzo, feldespatoides, olivinos, piroxenos, anfíboles y micas son los minerales más importantes que forman parte de casi todas las rocas ígneas. Otros minerales presentes se denominan minerales accesorios (Fisher, 1984)

II.5.3.1. Los feldespatos

Los feldespatos son los minerales más abundantes de la corteza terrestre y participan en ella con más de 60% de volumen, provienen de una palabra Alemana feld-campo y s-parabundancia. Los feldespatos forman un grupo de tres componentes, las cuales son: **feldespato potásico** KAlSi_3O_8 , **albita** $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, **anortita** $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. Los dos primeros grupos forman los feldespatos alcalinos y los últimos dos forman la serie de las plagioclasas. (Hurlbut, 1982).

En los extremos de este triángulo están expresados, las formulas cristaloquímicas de los tres componentes.

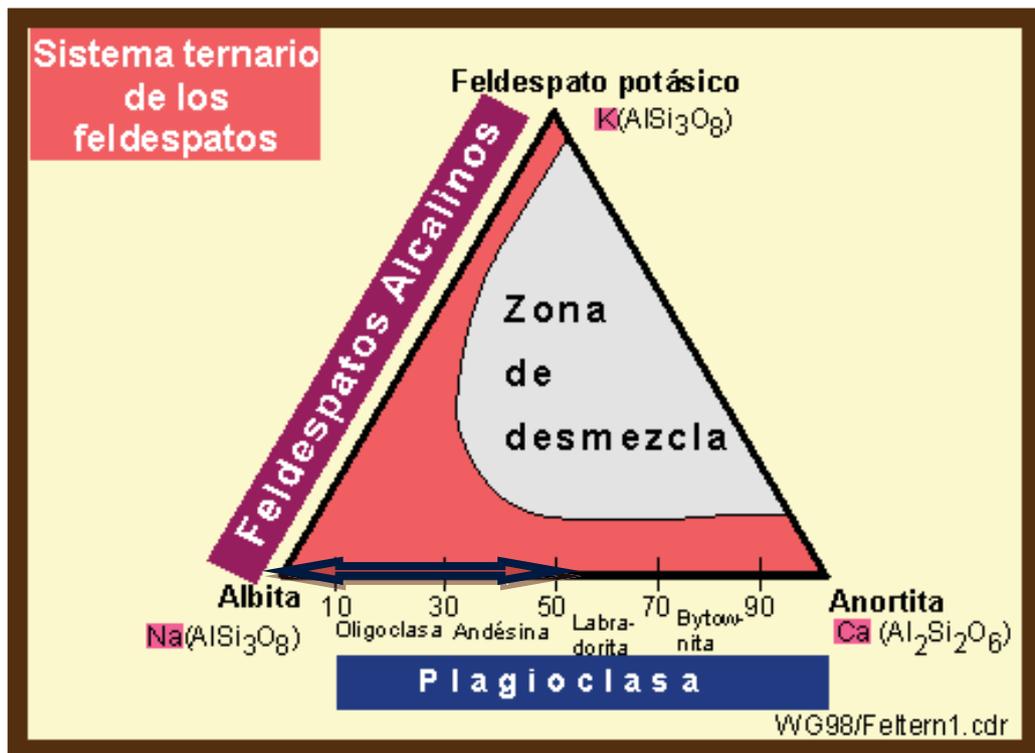


Fig. 09. Serie de las plagioclasas. Hurlbut, C.S. & Klein, C. (1982). Manual de Mineralogía de Dana. Reverté, Barcelona.

Las plagioclasas tienen distintas denominaciones, según su composición química, o según su componente: Albita si son aluminosilicatos de sodio (Ab) y Anortita (An) si son aluminosilicatos de calcio.

En las rocas ígneas magmáticas, generalmente se presentan de la serie de las plagioclasas **la albita, la oligoclasa y la andesina**. Sus características comunes son: son tectoaluminosilicatos. Sistema: triclinico. Morfología: hábito tubular. Exfoliación: buena, los planos (001) y (010) forman ángulos entre $85^{\circ}50'$ y $86^{\circ}24'$. Dureza: 6-6.5, según escala de Mohs. Brillo: Vítreo.

Ortoclasa feldespática. Es un tectosilicato perteneciente al grupo de los feldespatos potásicos. Se presentan en forma de cristales prismáticos de sección rómbica. Puede ser incoloro, blanco, gris o rosa carne; es de perfecta exfoliación. Su sistema cristalino es monoclinico.

Plagioclasa feldespática. Albita: aluminosilicato de sodio puro. Perteneció al grupo de los feldespatos y al subgrupo de las plagioclasas. Se presentan en forma de cristales tubulares o bien en forma compacta, granular o laminar. De exfoliación perfecta. Puede ser incoloro o blanco, transparente, traslúcido u opaco. Es insoluble en ácidos.

II.5.3.2. Los Silicatos

Estructuras de silicato. De acuerdo a Askeland, 1985. Las estructuras de los silicatos están basadas en el tetraedro de sílice. El citado tetraedro SiO_4^{4-} se comporta como un grupo iónico; los iones de oxígeno situados en las esquinas del tetraedro están ligados a otros iones o grupos iónicos para satisfacer el balance de cargas, como se muestra en la Fig. 8.

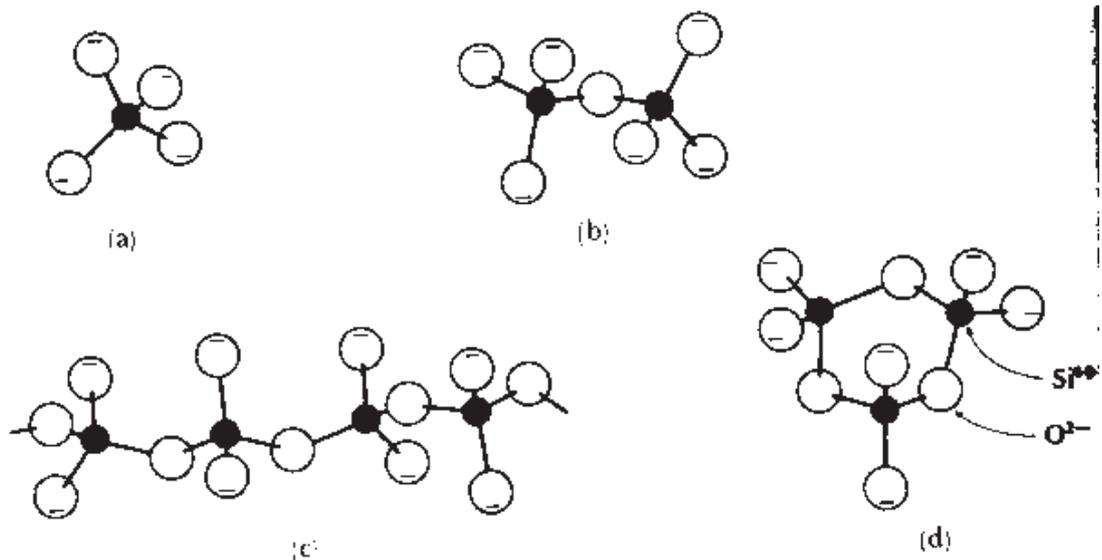


Fig. 10. Ordenamiento de los tetraedros de sílice. (a) Isla de ortosilicato, (b) isla de pirosilicato, (c) cadena y (d) anillo. Los iones positivos son atraídos a los grupos de silicato. Askeland, Donald R., 1985. *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Grupo Editorial Iberoamérica. Versión en español pp300.

Compuestos de silicato. Cuando dos iones de Mg^{2+} se encuentran disponibles para combinarse con un tetraedro, se produce un compuesto Mg_2SiO_4 , o forsterita. Los dos iones Mg^{2+} satisfacen los requisitos de carga y equilibran a los iones SiO_4^{4-} . Los grupos Mg_2SiO_4 producen una estructura cristalina tridimensional. De modo similar los iones Fe^{2+} pueden combinarse con los tetraedros de sílice para producir Fe_2SiO_4 . El Mg_2SiO_4 y el Fe_2SiO_4 forman una serie de soluciones sólidas conocidas como olivinas u ortosilicatos.

Dos tetraedros de silicato pueden combinarse para producir un doble tetraedro, o un ión $Si_2O_7^{6-}$. Este grupo iónico puede combinarse entonces con otros iones para producir pirosilicato, o compuesto de doble tetraedro.

Estructuras laminares. Cuando la relación O, si presenta la fórmula Si_2O_5 , los tetraedros se combinan para formar estructuras laminares, incluyendo la arcilla como se muestra en la Fig. 9 y la mica. La caolinita, una arcilla común, está compuesta de una lámina de silicato, enlazada iónicamente a una lámina compuesta de $\text{AlO}(\text{OH})_2$, produciendo delgadas plaquetas de arcilla con la fórmula $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. La montmorilonita, o sea $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$, contiene dos láminas de silicatos emparejadas a una capa central de $\text{AlO}(\text{OH})_2$. Las plaquetas están unidas entre sí por enlaces débiles de Van der Waals.

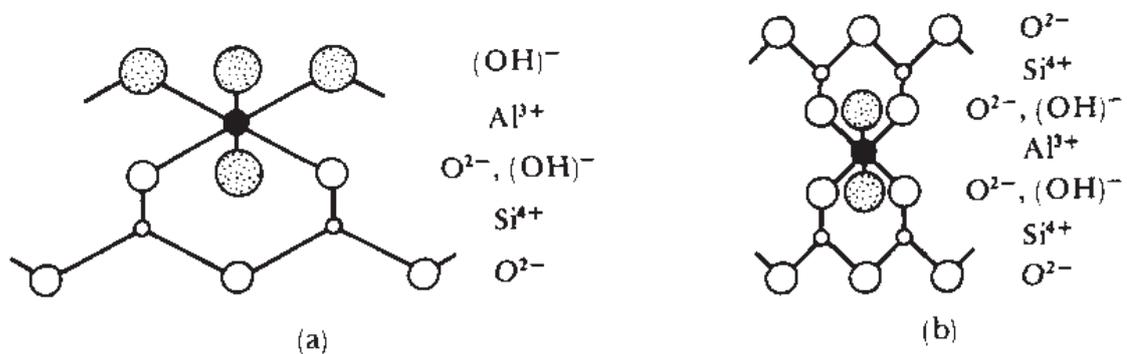


Fig. 11 La estructura laminar de los silicatos que conforma la base de las arcillas. (a) arcilla caolinita y (b) arcilla montmorilonita. Askeland, Donald R., 1985. La Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Grupo Editorial Iberoamérica. Versión en español.pp300

Sílice. Finalmente cuando se comparten los cuatro vértices del tetraedro, se obtiene la sílice o SiO_2 . Este material puede existir en muchas formas alotrópicas. Cuando se incrementa la temperatura, la sílice cambia de cuarzo α ($\text{Q}\alpha$) cuarzo β ($\text{Q}\beta$), de tridimita β ($\text{T}\beta$), a cristobalita β ($\text{C}\beta$), a líquido. El diagrama de equilibrio presión - temperatura de la Figura 10 muestra las formas estables de la sílice. Hay un cambio brusco en las dimensiones del cristal cerámico durante las transformaciones de fase. Tales variaciones se muestran en la Figura 11 para el cuarzo. Altos esfuerzos, e incluso agrietamiento, acompañan a estos grandes cambios volumétricos en la sílice.

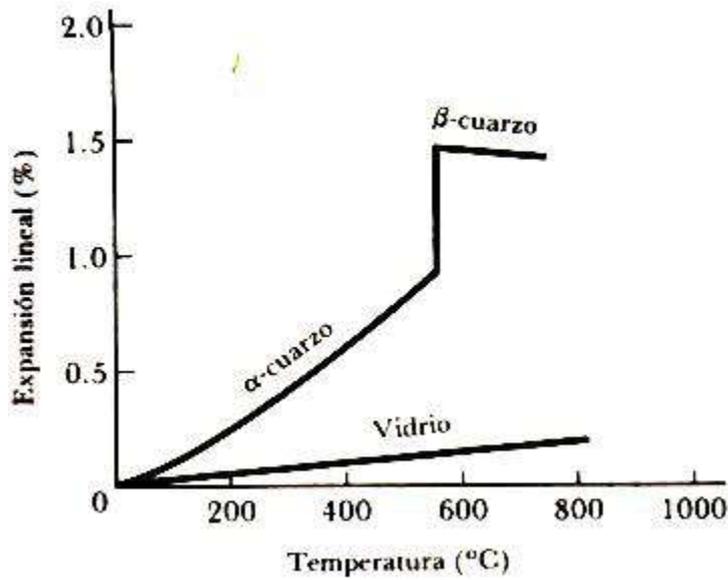


Fig. 12. Diagrama de fases presión-temperatura para el SiO₂. Askeland, Donald R., 1985. La Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Grupo Editorial Iberoamérica. Versión en español pp301.

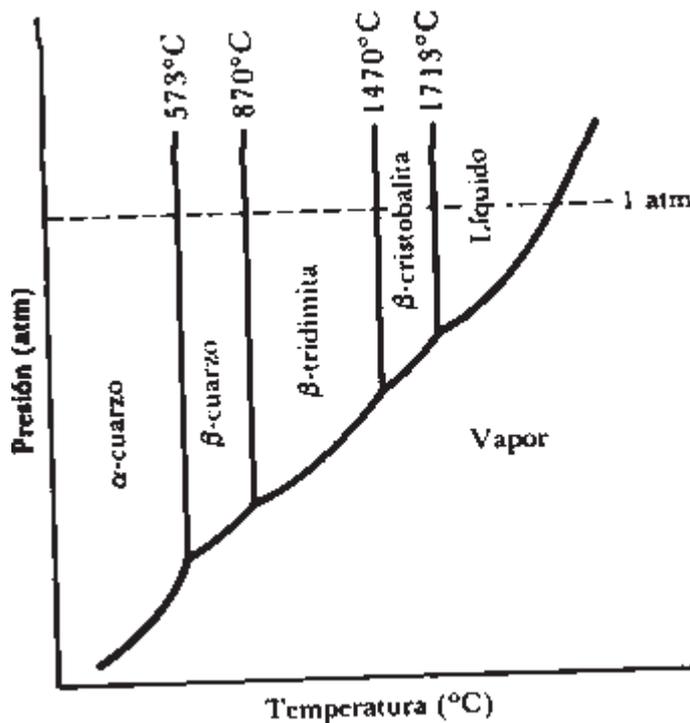


Fig. 13. Dilatación o expansión del cuarzo. Además de la expansión regular casi lineal, una gran súbita dilatación acompaña a la transformación de fases. Sin embargo, los vidrios se expanden uniformemente. Askeland, Donald R., 1985. La Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Grupo Editorial Iberoamérica pp301

Cuarzo. Óxido de silicio. Por su aspecto se asemeja a trozos de vidrio. Es después, de feldespato, el principal componente de la corteza terrestre. Puro es incoloro, puede ser

castaño, negro, violeta, amarillo, rosa, azul, etc. Su sistema cristalino es hexagonal bipiramidal. Entre las variedades más conocidas están la amatista y el cristal de roca.

Las Zeolitas. Las zeolitas pertenecen a la familia de los tectosilicatos y son aluminosilicatos cristalinos sintéticos y naturales, hidratados de cationes alcalinos y alcalinotérreos (Tyrrell, 1984). Consisten en un armazón de tetraedros de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ y $[\text{AlO}_4]^{5-}$ conectados el uno al otro en las esquinas, por medio de átomos de oxígeno.

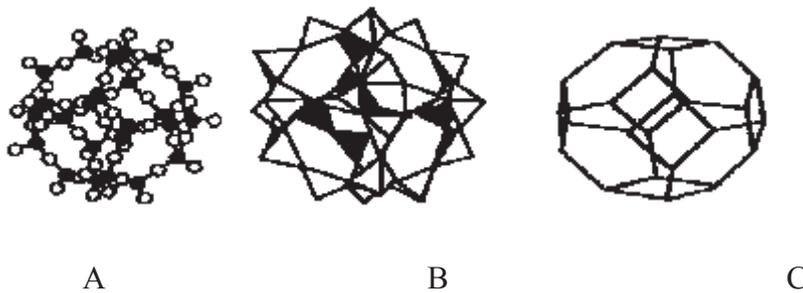


Fig. 14. Estructura típica de las zeolitas. A. Atómica, B. Tetraédrica y C. Cristalina. Artículo publicado en México D. F. por Olgún Gutiérrez María Teresa, Zeolitas características y propiedades. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Depto. de Química, A. P. 18-1027.

Principales Zeolitas naturales: Clinoptilolita, Mordenita, Chabacita, Erionita, Faujasita, Ferrierita, Huelandita, Laumantita y Filipsita. La Clinoptilolita está formada por la desvitrificación de ceniza volcánica en lagos o aguas marinas desde hace millones de años; su estructura consiste en tetraedros de SiO_4 y AlO_4 unidos por átomos de oxígeno compartidos que permiten el intercambio de cationes de Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio y Hierro (Bosh, 2003).

Las Micas. Una mica es un silicato primario de alúmina, alcalífero y ácido. Se presenta en delgadas láminas flexibles y elásticas de gran brillo. En la industria se utiliza como aislante térmico y eléctrico. Su color puede variar de acuerdo a su composición, va desde un transparente hasta un translúcido. Su sistema cristalino es monoclinico. Existe una gran variedad pero las principales son moscovita y biotita.

Moscovita. Contiene potasio y aluminio. Su color puede ser amarillo, pardo, verde o rojo claro.

Biotita. Contiene potasio, magnesio, hierro y aluminio. Su color varía de verde oscuro, pardo o negro aunque también puede ser amarillo pálido.

Los Anfíboles. Químicamente son silicatos que contienen los mismos elementos que los piroxenos; pero también contiene grupos hidroxilo (OH)⁻. Generalmente son alargados o aciculares. Según el sistema de cristalización se clasifican en:

Monoclínicos. Hornblenda, tremolita, arfredsonita.

Variedades fibrosas. Cartón, cuero, lino, y corcho de montaña, uralita, entre otros.

Rómbicos. Antofilita, gedrita, entre otros.



Fig. 15. Hornblenda. <http://Archivo:Amphibole.jpg> Consultado el 10 de febrero del 2010.

Robinson, 1990. La Hornblenda u Hornablenda es el nombre de un grupo de minerales perteneciente a los silicatos ó aluminosilicatos. Su fórmula genérica es $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Al,Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$. El nombre deriva del alemán *Horn* (Cuerno) y *Blende* (de *blenden* = relucir) y se refiere al brillo del mineral.

Su estructura es una red cristalina, los iones de hierro, magnesio y aluminio pueden sustituirse mutuamente sin problema y, por lo tanto, es difícil distinguir o incluso separar los diferentes minerales que se denominan magnesio-hornblenda, ferro-hornblenda y colores más oscuros.

Dentro de sus principales características se encuentran su color generalmente de oscuro a verde oscuro, transparencia opaca, en los minerales con mayor contenido en hierro su sistema cristalino es monoclinico, presenta cristales que pueden ser hexagonales

y raras veces son simétricos de ruptura imperfecta y fractura irregular, su dureza según Mohs es de 5 a 6 y su densidad de 2.9 a 3.4 g/ml. Crece en forma de agujas prismáticas largas. Es insoluble en ácidos.

Piroxenos. Estructuralmente, son uniones en forma de tetraedros por medio de átomos de hierro y magnesio; cadenas sencillas.



Fig. 16. Piroxeno. http://Archivo:Peridot_in_basalt.jpg Consultado el 24 de enero del 2010.

Según Robinson, 1990, los piroxenos son silicatos monoclinicos de hierro, magnesio y calcio. De brillo vítreo, son inalterables por el ácido clorhídrico. Los piroxenos con hierro son oscuros, los que carecen de este elemento suelen ser blancuzcos, grises o de color verde claro. Se encuentran presentes como constituyentes principales de muchas rocas ígneas. Químicamente tienen un parecido a los anfíboles pero se diferencian de estos por tener un plano de exfoliación de 90° . Su fórmula general es $(Ca,Mg,Fe)SiO_3$.

Los piroxenos rómbicos, así llamados porque cristalizan en el sistema ortorrómbico, carecen de Aluminio; entre ellos figuran la broncita, la enstatita y la hiperstena.

Los piroxenos propiamente dichos, o clinopiroxenos, cristalizan en el sistema clinorrómbico y pueden contener aluminio. Pertenecen a esta clase la augita, el diópsido y la espodumena.

II.5.4. Las Riolitas

La riolita por su afinidad puede tratarse de rocas riolíticas, dacíticas, o andesíticas. Contienen aproximadamente 70% de sílice. La Riolita tienen la misma composición mineralógica que el granito, pero su grano es fino: 2 partes de feldespatos ortoclasa + 1 parte cuarzo + 1 parte de feldespatos plagioclasa + 1 parte de ferromagnesianos (Alonso, 1995).

La Riolita tiene una textura micro-criptocristalina, algunas veces con textura porfídica. Se compone de cuarzo, plagioclasa, feldespatos alcalinos y biotita (en general poco máficos). Vidrio volcánico y textura fluidal son comunes. El diagrama permite en una manera bastante fácil la denominación de rocas plutónicas y volcánicas.

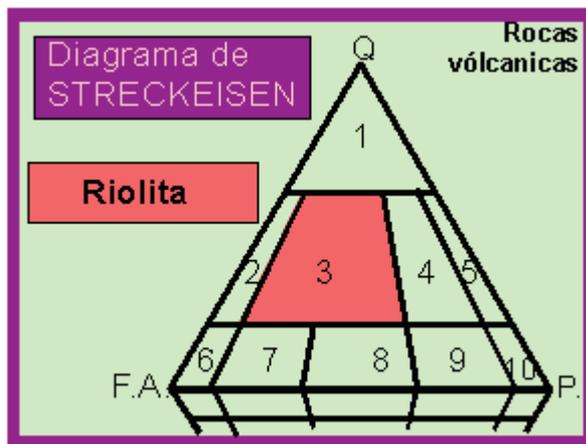


Fig. 17 Diagrama de Streckeisen o QAPF, rocas volcánicas.

<http://www.geovirtual.cl/geologiageneral/imagenes/streckvol-gr1.gif>. Consultado 05 junio de 2010

II.5.5. Las Ígnimbritas.

Pasquare, et al., 1990, en su carta geológica, realizaron una datación de bancos de ignimbritas que arrojó como resultado: Cointzio y Jamaica, edad aproximada de cuatro millones de años y el Tejocote, edad aproximada de dieciocho millones de años. Inicialmente se creía que los tres tenían la misma edad geológica, pero a partir de esta investigación se pudo complementar lo anterior, aunque se puede esperar que los bancos de Cointzio y Jamaica, pudieran corresponder al estrato superior del mismo flujo piroclástico que formó el banco de El Tejocote.

La ígnimbritas es un tipo de roca volcánica, ácida y compacta, con grado de cristalización holovítrea. En los depósitos de ignimbritas frecuentemente existen fragmentos de obsidiana, más o menos alterados y aplastados, de forma alargada que se denominan flamas. Se encuentran en extensas coladas producidas por la efusión de la lava,

no ya por un cráter, sino por largas fisuras del terreno volcánico. Consisten en una toba formada por cenizas y partículas de silicatos procedentes de la espuma de lavas viscosas producidas en una erupción volcánica. Por compresión o aglomeración en caliente puede volverse tan compacta como la obsidiana.

III. PRUEBAS

III.1. La cristalografía de rayos X

Es una técnica consistente en hacer pasar un haz de rayos X a través de un cristal de la sustancia sujeta a estudio, y por difracción, dá lugar a un patrón de intensidades, que se interpreta aplicando la ley de Bragg. No es aplicable a sistemas biológicos o vivos, a disoluciones o a sistemas amorfos ni gases. Es posible trabajar con monocristales o con polvo microcristalino. Para la resolución de los parámetros de la celda unidad (la porción más simple de la estructura cristalina que al repetirse mediante traslación reproduce todo el cristal); puede ser suficiente la difracción de rayos X en polvo. Mientras que para una dilucidación precisa de las posiciones atómicas es conveniente la difracción de rayos X en monocristales.

III.1.1. Difracción de rayos X

Se utiliza para obtener información sobre la estructura cristalina de un material. Cuando un haz monocromático (de una sola longitud de onda) del mismo orden de magnitud que el espaciamiento atómico del material lo golpea, los rayos X se dispersan en todas direcciones. La mayor parte de la radiación dispersa por átomo, anula la dispersada por otros. Sin embargo, los rayos X que inciden sobre ciertos planos cristalográficos en ángulos específicos se ven reforzados en vez de eliminados. Éste fenómeno se conoce como difracción. Los rayos X han sido difractados o el haz ha sido reforzado, cuando las condiciones satisfacen la **ley de Bragg**,

$$\text{Sen } \theta = \lambda / 2d_{hkl}$$

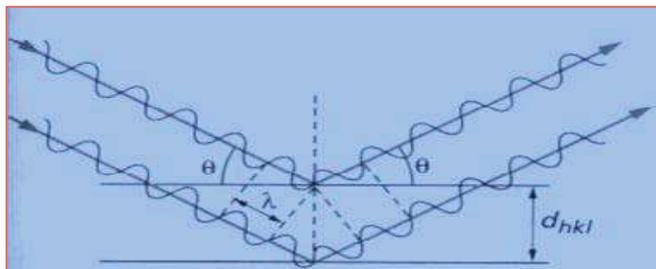


Fig. 01. Ley de Bragg. <http://personales.upv.es/.../curso/unidad3/fig3-39.jpg> Consultado 12 de marzo de 2010.

Donde el ángulo θ es la mitad del ángulo entre el haz difractado y la dirección original del haz, λ es la longitud de los rayos X y d_{hkl} es la distancia interplanar entre los planos que causan el refuerzo constructivo del haz (Askeland, 1998). La fórmula de Bragg permite calcular la longitud de onda de los rayos X a partir de la constante reticular d , o

inversamente, esta última, si se conoce la longitud de onda, y de aquí su doble aplicación al estudio de los rayos X y de la estructura de los cristales.

La difracción de rayos X en una muestra policristalina permite abordar la identificación de fases cristalinas (puesto que todos los sólidos cristalinos poseen su difractograma característico) tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo. Los estudios de polimorfismo, transiciones de fase y soluciones sólidas, medidas del tamaño de las partículas, determinación de diagramas de fases, etc., se realizan habitualmente por difracción de rayos X.

La selección del tipo de radiación depende de la composición de la muestra y el objetivo del estudio. Para el análisis de difracción por rayos X normalmente se utilizan radiaciones de Cu, Co, Fe y Cr, cada uno de ellos tiene diferente poder de difracción al poseer longitudes de ondas características, donde las de Cu son las más utilizadas en análisis de arcillas (Brindley y Brown, 1980). Los minerales de arcillas generalmente tienen una forma plana y pueden ser fácilmente orientadas. El método de difracción de Rietveld es el más utilizado en estructuras cristalinas de los materiales.

III.1.2. Métodos de difracción de rayos X.

a). Método de Rietveld

Este método se emplea en el refinamiento de estructuras cristalinas de patrones de difracción de neutrones y difracción de rayos X. Para realizar el análisis se utiliza una muestra de polvo homogénea y el tamaño de los cristales pequeños debe estar entre $1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$ además previamente se deben identificar las fases cristalinas presentes en la muestra, y de cada una de ellas conocer; el grupo espacial, posición de los átomos, tipo estructura cristalina, parámetros de red, etc. También se debe contar con un programa (Software) para realizar el refinamiento y con una función instrumental del difractómetro de rayos X.

La base de método de Rietveld consiste en utilizar los datos del perfil de intensidad de cada reflexión, en vez de su área integrada, en el proceso de refinamiento, lo que permite extraer la máxima cantidad de información contenida en el diagrama de polvo (Rietveld, 1967). Determina con mayor precisión parámetros de red, posiciones atómicas, tamaño de cristal, microdeformaciones, cuantifica las fases cristalinas de la muestra

aunque los picos de difracción estén superpuestos, etc. Algunos de los “softwares” que emplea son: DBWS, Fullprof, Rietan, etc.

b). Método de Laue

Consiste en hacer coincidir en un cristal un espectro continuo de rayos X, de tal manera que para cada longitud de onda, existirá un determinado ángulo. El método de transmisión de Laue consiste en colocar una película detrás de un cristal, la cual posee un agujero que deja pasar los haces de rayos X.

c). Método de rotación de cristal.

Se hace incidir un haz de rayos X monocromático sobre un cristal. Para detectar los haces difractados, la película es envuelta de forma cilíndrica de tal manera que rodea al cristal. El cristal se hace girar sobre el eje perpendicular al haz incidente, el cual coincide con el eje de cilindro. Para encontrar el ángulo el cual se cumple la ley de Bragg, el giro del cristal se hace sucesivamente de 0 a 90°, hasta encontrar el patrón de difracción.

d). Método Powder.

El cristal a analizar es reducido a polvo de tal manera que forme un conjunto de pequeños cristales. Si se tuviese un cristal y en él se hiciera incidir un haz monocromático el haz se difractaría a un ángulo en particular. Al hacer girar este cristal de 0 a 360°, el haz formará un cono cuyo eje coincide con el del haz incidente.

III.1.3. Celda unidad.

Es la porción más simple de la estructura cristalina que al repetirse mediante traslación reproduce todo el cristal. Todos los materiales cristalinos adoptan una distribución regular de átomos en el espacio. Este arreglo espacial de átomos, se caracterizan por 3 vectores, que definen las tres direcciones independientes del sistema de coordenadas de la celda. Esto se traduce en 6 parámetros de red, que son los módulos a, b y c, de los 3 vectores, y los ángulos α , β y γ que forman entre sí. Estos 3 vectores forman una base del espacio tridimensional, de tal manera que las coordenadas de cada uno de los puntos de la red se puedan obtener a partir de ellos por combinación lineal con los coeficientes enteros. La simetría traslacional de una estructura cristalina se caracteriza mediante la red de Bravais. Dentro de las 14 redes cristalinas existentes se encuentran todas las estructuras cristalinas de los minerales que existen.

Las redes de Bravais son una disposición infinita de puntos discretos cuya estructura es invariante bajo cierto grupo de traslaciones. Los puntos de una red de Bravais son equivalentes.

III.2. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

III.2.1. Antecedentes históricos

El primer microscopio electrónico de Barrido fue desarrollado y descrito en 1942 por Zworykin, et al. El instrumento consistía de una columna invertida (cañón electrónico en la base), tres lentes electrostáticas, una bobina deflectora electromagnética con un tubo fotomultiplicador y una pantalla con fósforo.

En la universidad de Cambridge en 1948, C. W. Oatley construyó un MEB, describiendo este trabajo en su tesis doctoral obteniendo una resolución de 500 angstroms.

En 1956, K.C.A. Smith introduce el pensamiento no lineal de las señales y corrige el astigmatismo.

En 1960, T. E. Everhart y R. F. M. Thornley desarrollan el detector que se usa aún en estos días y fue la antesala de la salida del MEB al mercado.

En la Universidad de Cambridge, R.F.W. Pease y W. C. Nixon, crearon el MEB, utilizando la columna invertida, lentes electromagnéticas, doble deflexión, sistema de barrido, bobinas para el astigmatismo y el detector Everhart-Thornley. Este instrumento fue la base del primer MEB comercial: the Cambridge Scientific Instruments Mark I, disponible en 1965.

III.2.2. Antecedentes del Microscopio Electrónico

Un microscopio es un sistema óptico que transforma un objeto en una imagen, la cual amplifica las características del objeto ha sido diseñado principalmente para estudiar la superficie de los sólidos a grandes aumentos, que si se comparara con el microscopio óptico el MEB posee una resolución y profundidad de focos mas grandes.

En el microscopio electrónico se pueden resolver objetos del orden de los Ångstrom. En el microscopio electrónico, un haz de electrones incide sobre una muestra y de la interacción de estos electrones con los átomos de la misma, surgen señales que son captadas por algún detector o bien proyectadas directamente sobre una pantalla

Dentro de la familia de microscopios electrónicos, se encuentran el Microscopio Electrónico de Transmisión (MET) y el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). El Microscopio Electrónico de Barrido provee información sobre morfología y características de la superficie mientras en MET podemos observar la estructura interna y detalles estructurales de la muestra.

En las muestras que se analizaron únicamente se trabajó en el MEB el cual emplea un haz de electrones de muy corta longitud de onda que permite obtener una mayor resolución, si lo comparamos con el microscopio de luz, el cual utiliza un haz de luz en el rango de las longitudes de onda visible (Hawkes, 1972).

III.2.3. Manejo del Microscopio Electrónico de Barrido

Iphorski y Marrapodi, (1973), realizan una comparación entre el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y su similar el Microscopio Electrónico de Transmisión. Ambos tienen ciertas características tales como un cañón de electrones donde se genera el haz de electrones, lentes condensadores y objetivo, y sistema de vacío. La diferencia principal entre ellos es la manera en que forman y aumentan la imagen. Esto hace que la información que se obtenga de cada uno sea distinta. Mientras que en el MET permite el estudio de la estructura de muestras delgadas, en el microscopio electrónico de barrido es posible conocer la morfología superficial.



Fig. 02. Microscopio Electrónico de Barrido. Ortiz, et al. 2009, curso: introducción a la microscopía. UMSNH.

En el MEB, el haz electrónico, atraviesa la columna y llega a la muestra. Un generador de Barrido es el responsable de producir el movimiento del haz, de manera que barra la muestra punto a punto.

De la interacción entre los electrones incidentes con los átomos que componen la muestra se generan señales, las cuales pueden ser captadas, con detectores adecuados para cada uno de ellas.

El detector capta una señal y convierte en una señal de electrónica que es proyectada en un tubo de rayos catódicos (TRC).

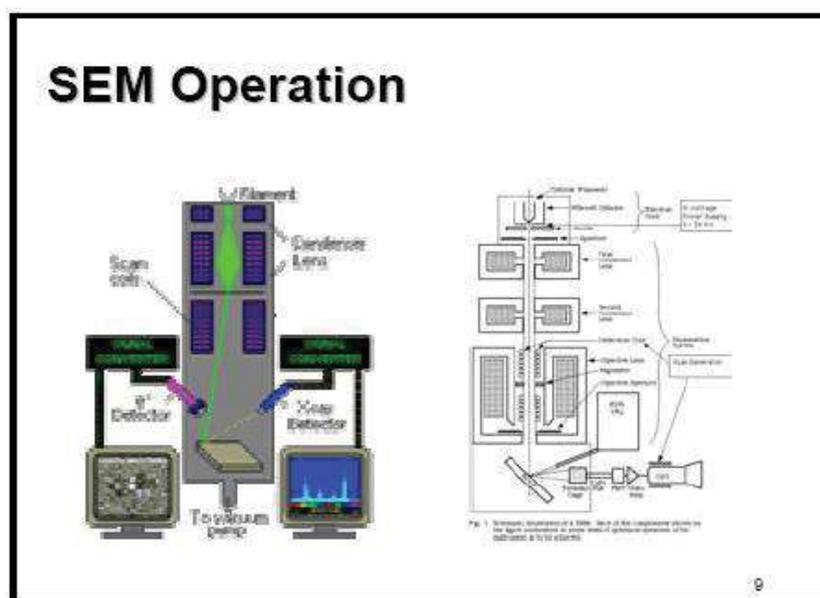


Fig. 03. Operación del Microscopio Electrónico de Barrido. Ortiz, et al. 2009, curso: introducción a la microscopía. UMSNH

En la figura se muestra la operación de un típico MEB, que consiste en un haz primario de electrones proveniente de un cañón electrónico el cual es enfocado sobre la muestra por medio de las lentes condensadoras, este fino haz de electrones puede barrer las muestras, con las bobinas deflectoras, las señales derivadas de la acción del haz primario de electrones sobre la muestra son colectadas por un detector y luego procesadas y usadas para modular la brillantez de la pantalla del tubo de rayos catódicos (TRC) el cual también es barrido en sincronismo con el haz electrónico que barre la muestra, al mismo tiempo se

obtiene una imagen de su superficie sobre la pantalla del TRC, ya que la corriente recibida desde cualquier punto está determinada por las características de su superficie.

III.2.4. Descripción de los componentes del MEB

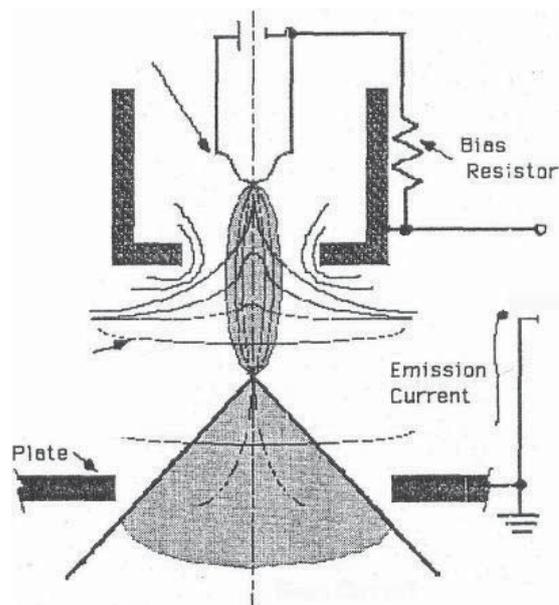


Fig. 04. Diagrama esquemático del cañón electrónico. Ortiz, et al. 2009, curso: introducción a la microscopía. UMSNH

Cañón Electrónico. Consiste en una fuente emisora de electrones que generalmente es un filamento de Tungsteno que sirve de cátodo de cubierta de metal para el filamento, y un ánodo. Los electrones que salen del filamento son acelerados a gran velocidad por el par de electrones, a los que les aplica diferente potencial de hasta 50 kv. La diferencia entre potencial entre el filamento y el ánodo es igual al voltaje de aceleración.

Sistema de Lentes Electrónicas. Los electrones del cañón electrónico al salir se hacen como un fino haz divergente. El propósito del sistema de lentes es formar una electrosonda tan pequeña como sea posible. Inicialmente pueden disminuir el diámetro del haz de 250-100 Å al incidir sobre la muestra. Regularmente estas lentes son magnéticas ya que son más resistentes, difíciles de desalinearse y fáciles de limpiar además produce menos aberraciones que las electrostáticas.

Sistema de Barrido. Consiste en unas bobinas deflectores que hacen barrer el haz electrónico sobre la superficie de la muestra en las direcciones X y Y. la misma señal que se aplica a las bobinas se usa para barrer en forma sincronizada el haz de TRC produciéndose así una correspondencia, punto a punto, entre las superficies de la muestra que es barrida por el haz en la pantalla donde se observa la imagen.

Platina. Las muestras se colocan en un portamuestras el cual a su vez se pone en la platina, esta debe ser rígidamente estable, proveer movimientos en 3 direcciones perpendiculares entre si par poder observar diferentes áreas de la muestra, y proveer de movimiento de rotación e inclinación ya que estos afectan el contraste de la imagen.

Sistema de Detección. Es una combinación de un centellador y un fotomultiplicador. El primero emite fotones al llegarle los electrones provenientes de la muestra, estos fotones son una guía-luz al fotomultiplicador el cual los convierte en una señal electrónica que será amplificada posteriormente.

Sistema de Proyección de Imágenes. Las imágenes se proyectan en dos tubos catódicos de alta resolución, que funcionan en sincronización con el barrido electrónico de la muestra; uno de ellos está adecuado para impresión de fotografías y el otro para escrutinio visual.

Sistema de Vacío. Los electrones para viajar a distancias razonables en el vacío se necesitan presiones del orden de 10, 000 a 1,000, 000 Torr, de ahí que la columna por donde tienen que viajar los electrones debe ser evacuada, y especialmente donde esta la platina, ya que ese lugar frecuentemente es abierto a la atmósfera. El vacío se mantiene por medio de 3 bombas, una rotatoria y 2 difusoras.

III.2.5. Preparación de muestras para observación en el MEB

Las ventajas en la preparación de muestras para el MEB es que no necesitan ser muy especiales ni tan delgadas como el MET y si sobrepasa las medidas de los portamuestras se pueden hacer réplicas; lo que sí se debe cumplir es que sea capaz de tolerar los extremadamente altos vacíos que hay dentro del instrumento, además debe aceptar la corriente de electrones incidentes sin cargarse ya que así lo hiciera causaría efectos muy serios y a veces impredecibles sobre la trayectoria del haz incidente y de los electrones secundarios; para evitar todo esto la muestra debe ser conductora.

Si la muestra no es electrónicamente conductora, se le puede cubrir con una capa conductora por lo general se puede usar una delgada capa de metal, los metales que más se usan son: Al, Au, Pb-Pd, Au-Pd, esta capa se deposita por evaporación para que sea lo mas delgada posible. Para un recubrimiento perfecto la muestra se sombrea primero con carbono, ya que con solo 10Å de esta película de carbono se tiene una coherencia completa, con la cual se tiene la seguridad de que al evaporarse el metal no queden sitios sin recubrir en la muestra.

Para hacer las réplicas se aplica un derivado celulósico que puede ser barniz nitrocelulósico, etc. sobre la superficie a replicar se deja secar y luego se retira, procediéndose luego a metalizar la réplica obtenida para hacerla conductora.

Ya lista la muestra o la réplica debe ser adherida al portamuestras por medio de un adhesivo adecuado, que nos asegure que la muestra no quede aislada eléctricamente entre las muestras y el portamuestras; este adhesivo también sirve para que las muestras no se puedan mover (bajo el haz de electrones).

Los requisitos para las muestras son: Limpieza, rigidez mecánica, estabilidad en vacío y conductividad eléctrica.

Existen otras técnicas especiales para preparar las muestras las cuales dependerán del tipo de trabajo que se está haciendo, por ejemplo, si solamente se desean ver fronteras de grano, la muestra puede pulirse electrolíticamente. Otro método muy especial puede ser el de las líneas fiduciales, el cual consiste en dibujar sobre la muestra una rejilla a nivel microscópico sobre platinas que pueden producir a las muestras de formaciones en caliente bajo tensión dentro del MEB.

En síntesis la obtención de una buena micrografía tiene su origen en una adecuada preparación de la muestra, si la muestra en polvo se debe suspender en un solvente y después tomar una gota de esta suspensión depositarla en el portamuestra, una vez evaporado el solvente se procede a la observación de esta.

Las muestras biológicas requieren de una preparación especial, existen varios métodos para prepararlas, que pueden ser físicos, químicos o bien una combinación de ambos. Si la muestra es un polvo puede montarse sin tratamiento, si las muestras son mas grandes deben contarse en cubo de 5 mm. Y posteriormente son lavadas en ultrasonido y

enseguida preparadas. Las sustancias que se usan para fijarlas al portamuestras son gluteraldehido o tetróxido de osmio.

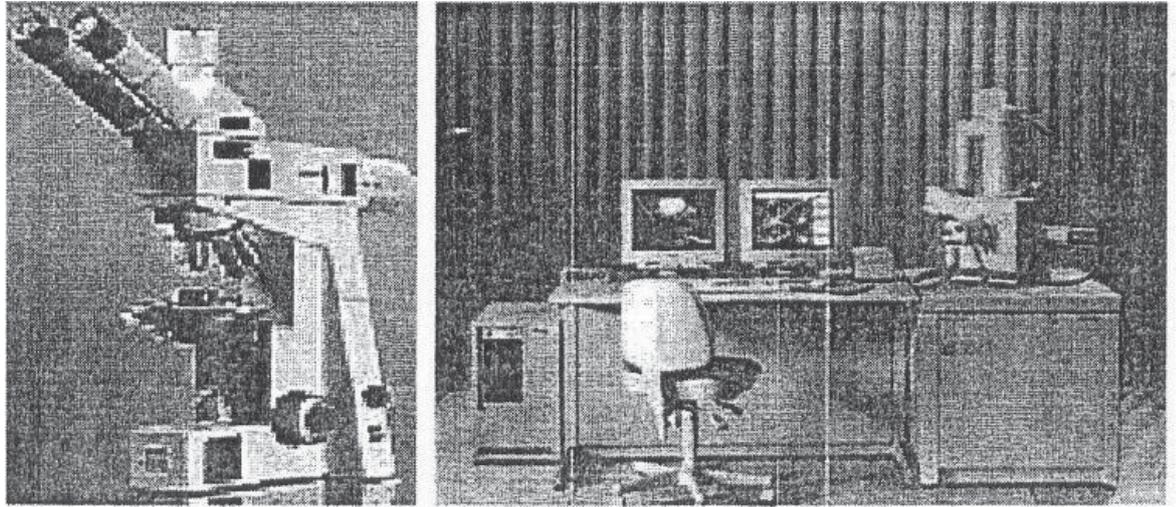


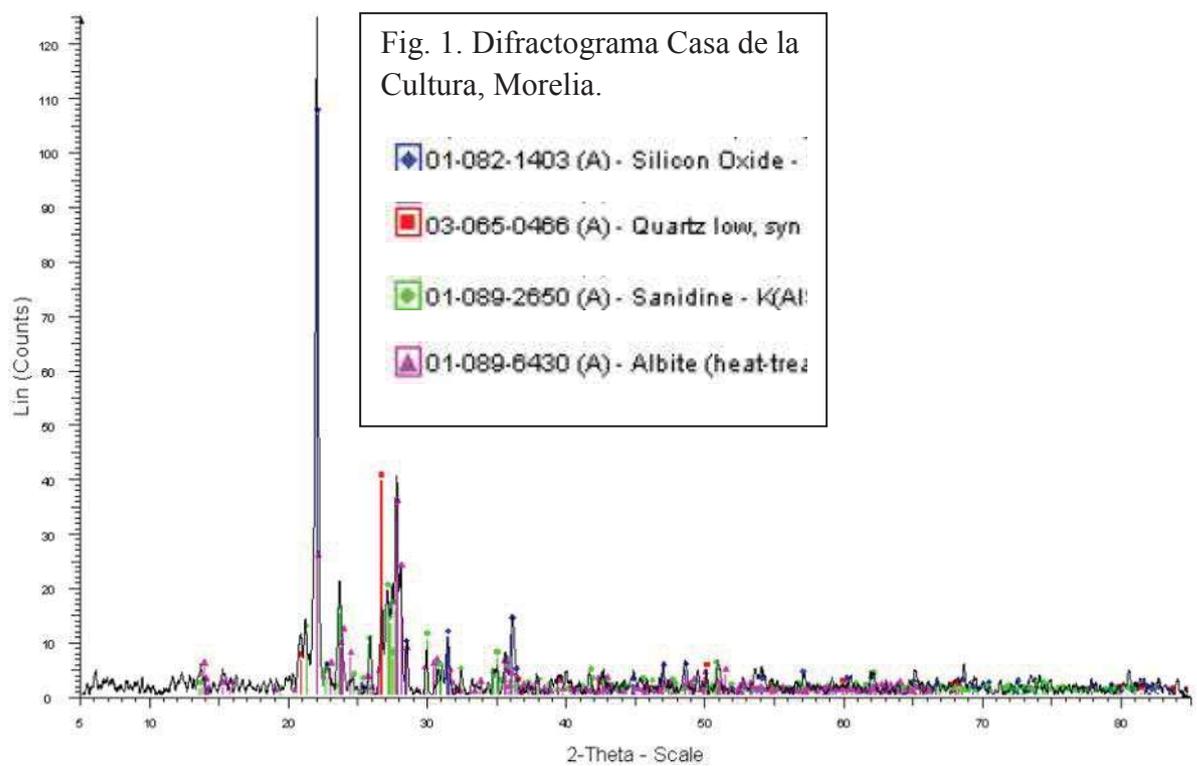
Fig. 05. Imagen de un Microscopio Óptico y de un Microscopio Electrónico de Barrido.

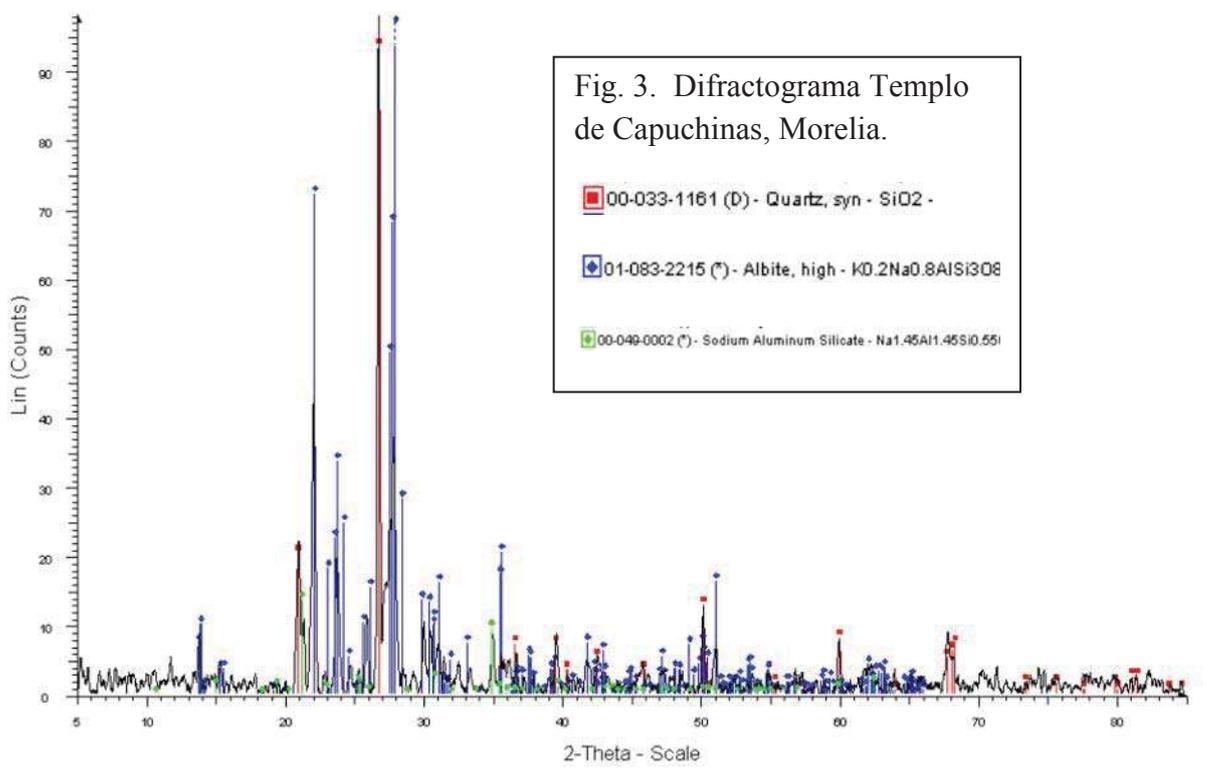
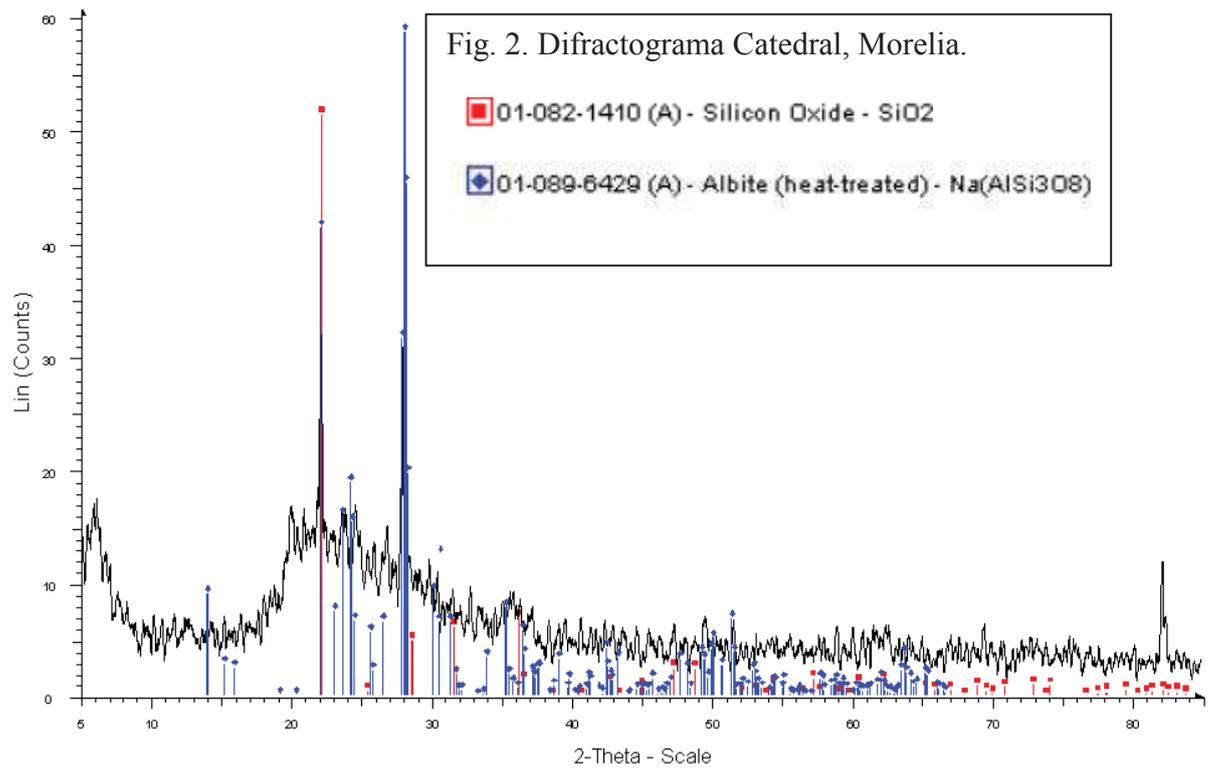
Ortiz, et al. 2009, curso: introducción a la microscopía. UMSNH

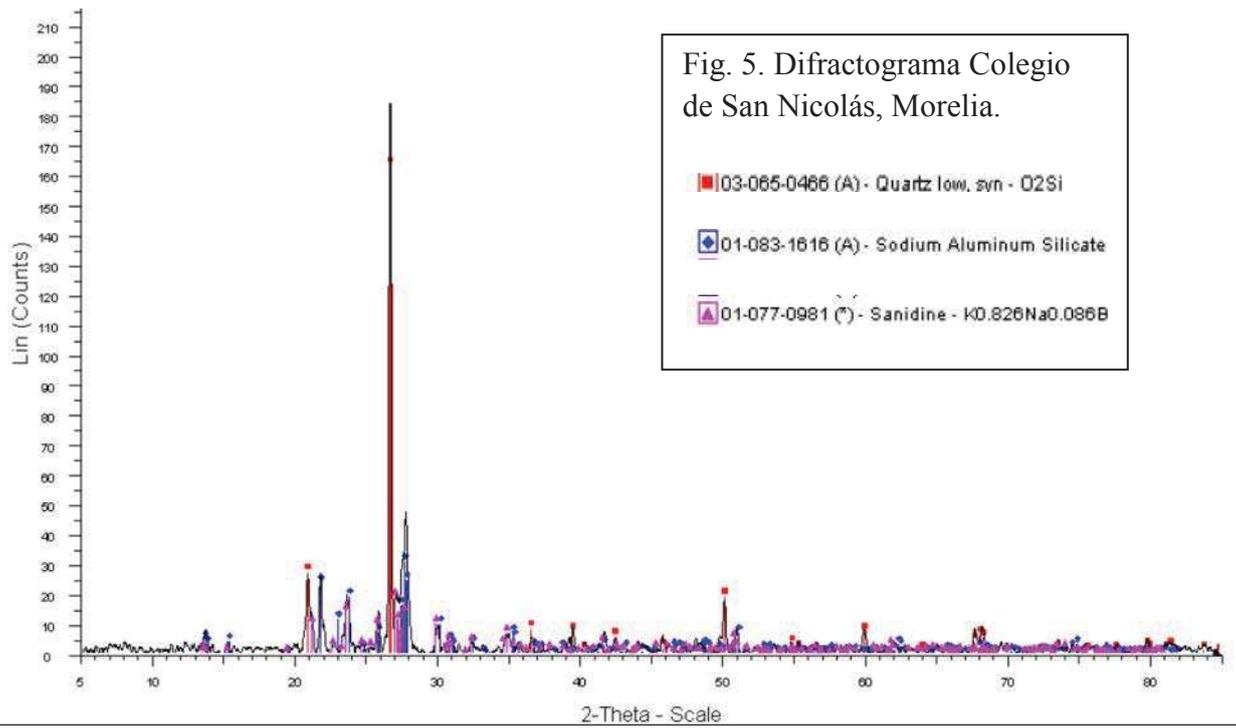
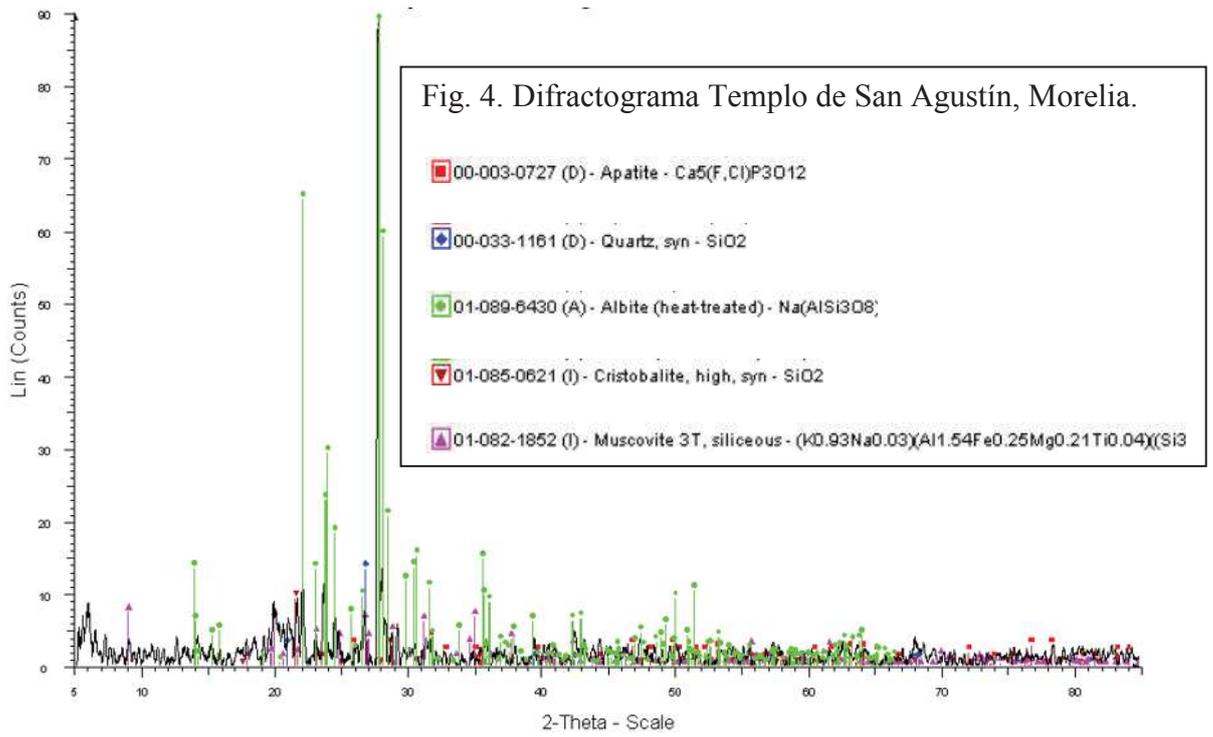
IV. RESULTADOS

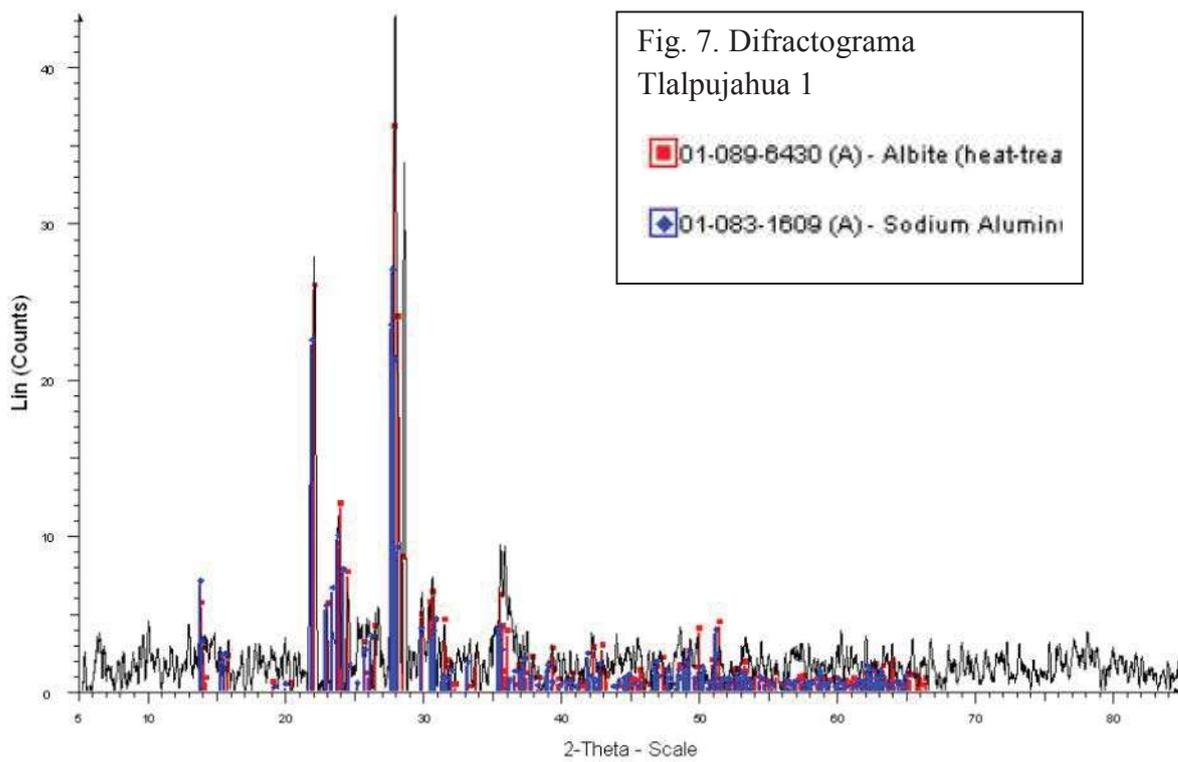
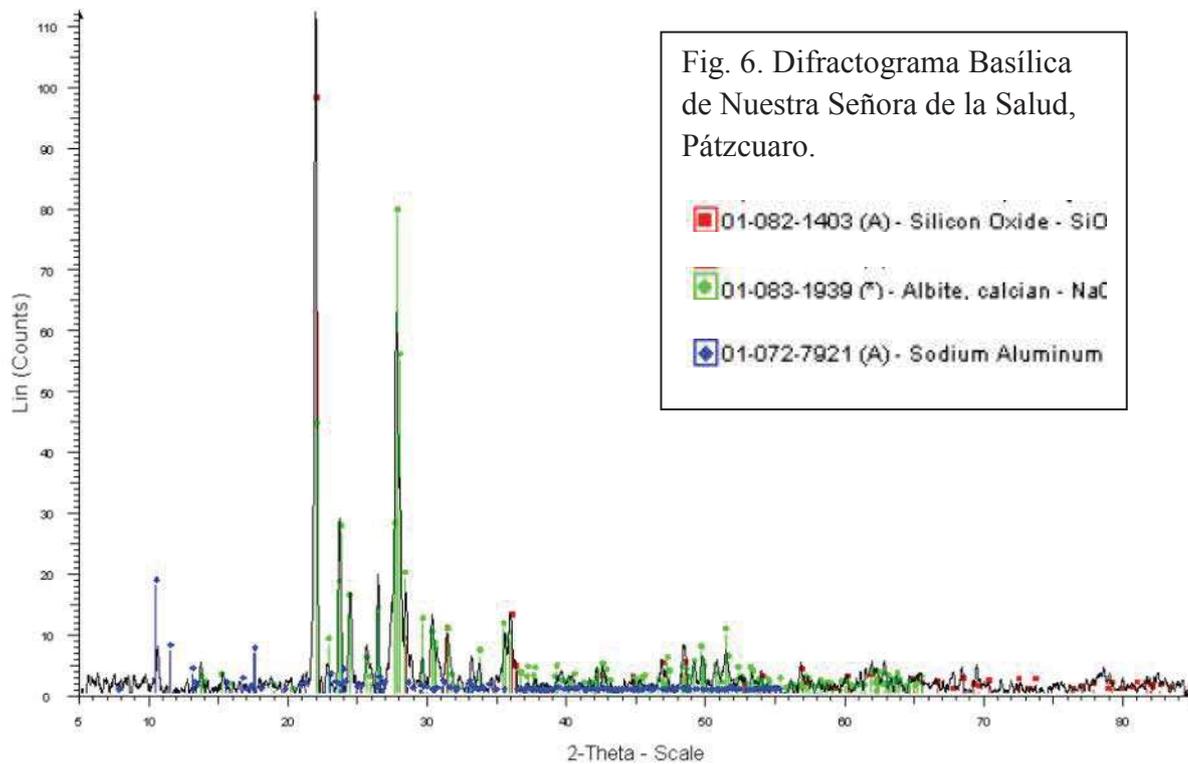
Al realizar la difracción de rayos x en el microscopio electrónico de Barrido, se obtuvo lo siguiente:

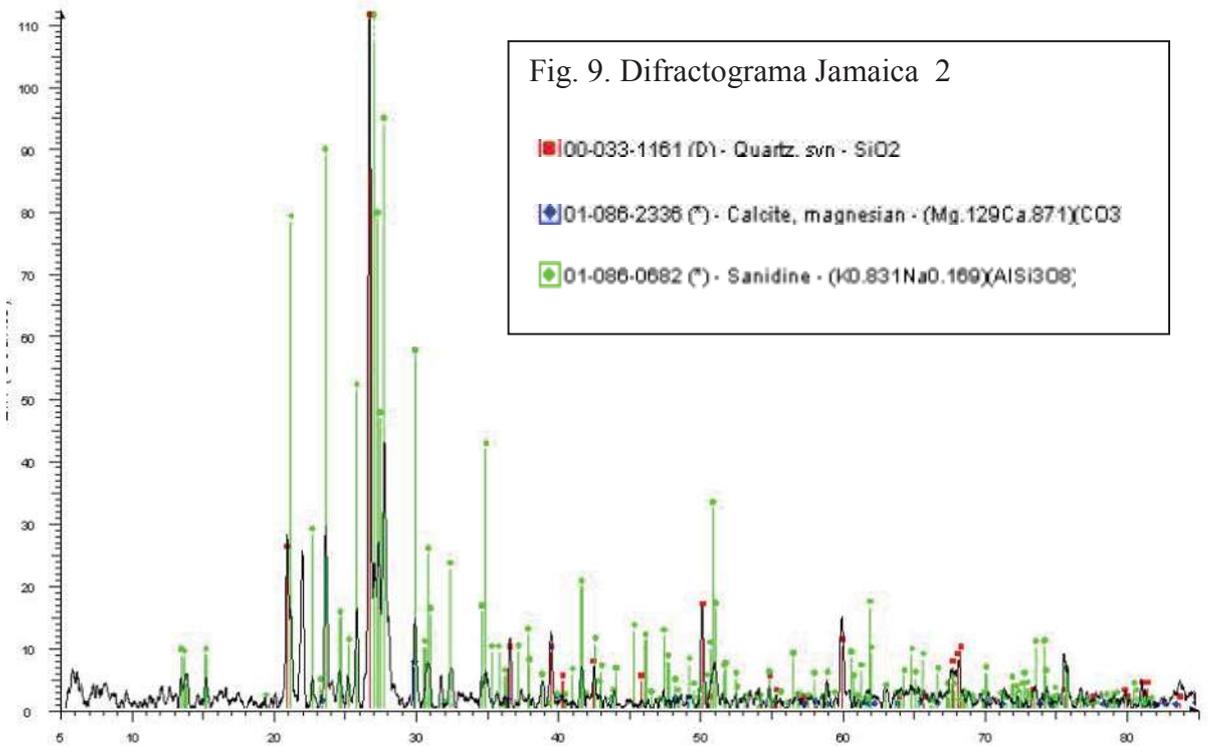
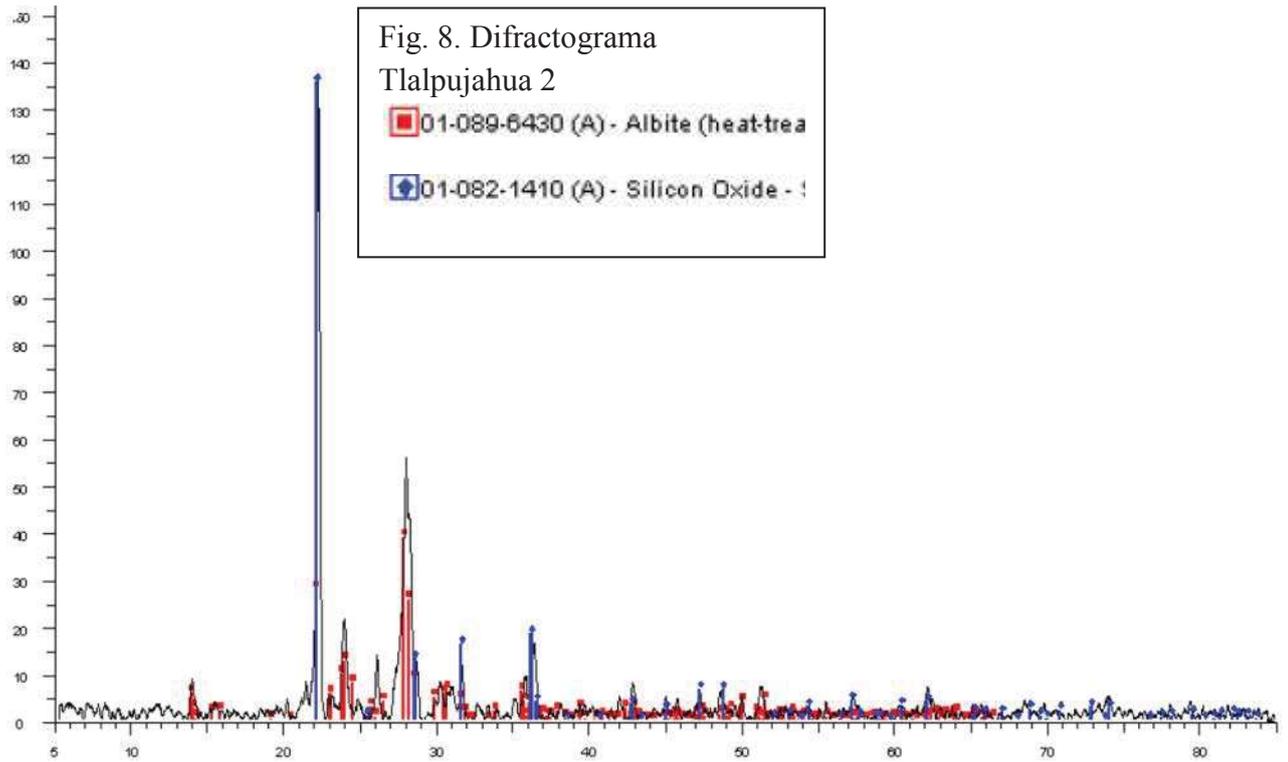
IV.1. Resultados de los Difractogramas de las pruebas realizadas en el Difractómetro de rayos X.











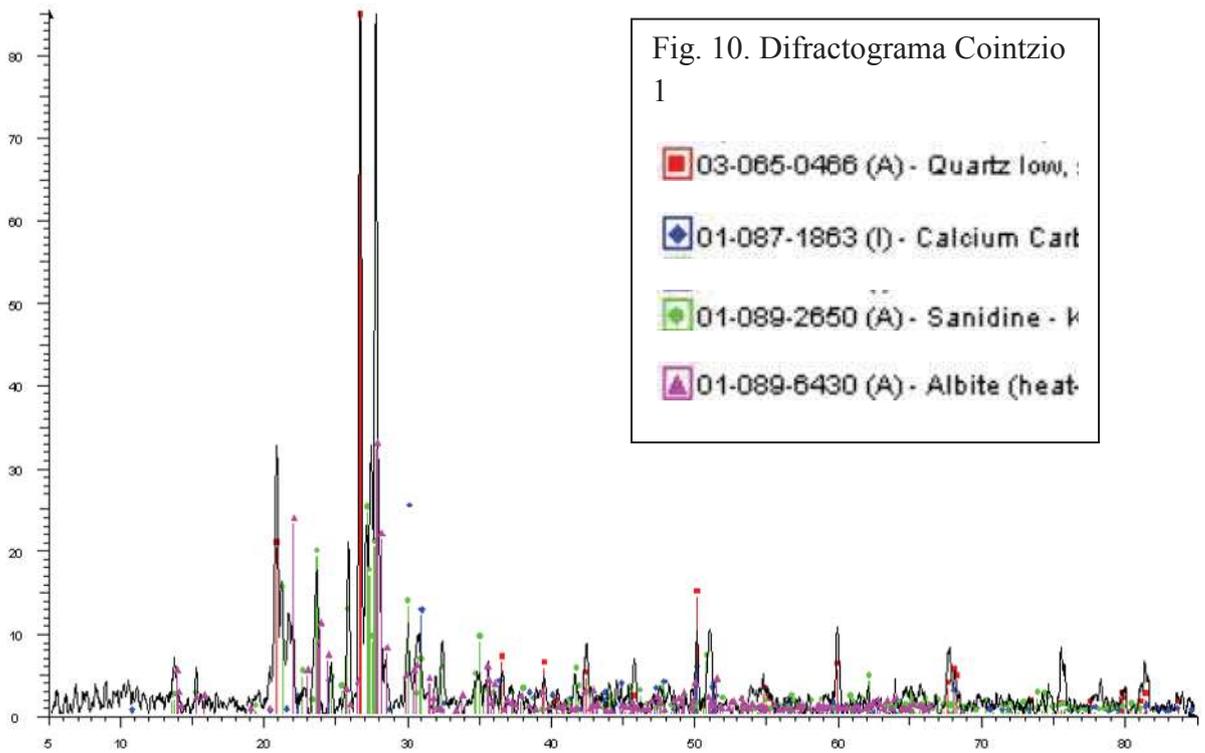


Fig. 10. Difractograma Cointzio 1

- 03-065-0466 (A) - Quartz low,
- 01-087-1863 (I) - Calcium Carb
- 01-089-2650 (A) - Sanidine - k
- 01-089-6430 (A) - Albite (heat

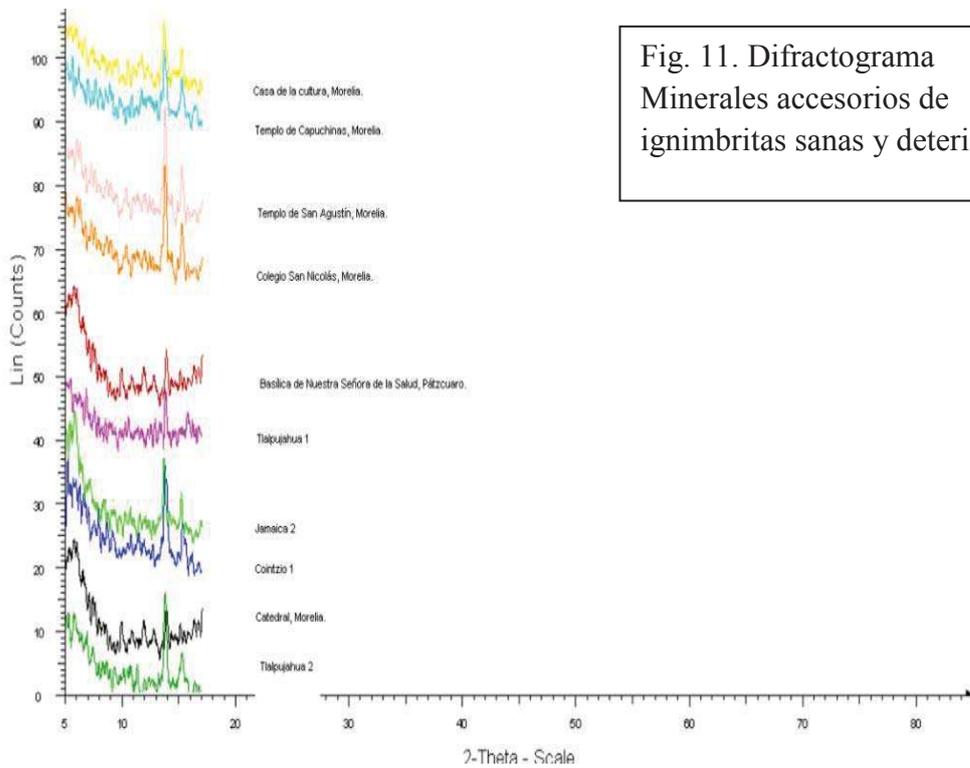


Fig. 11. Difractograma Minerales accesorios de ignimbritas sanas y deterioradas.

Fig. 12.

Fig. 12. Basílica de Nuestra Señora de la Salud de Pátzcuaro. Identificación de minerales accesorios.

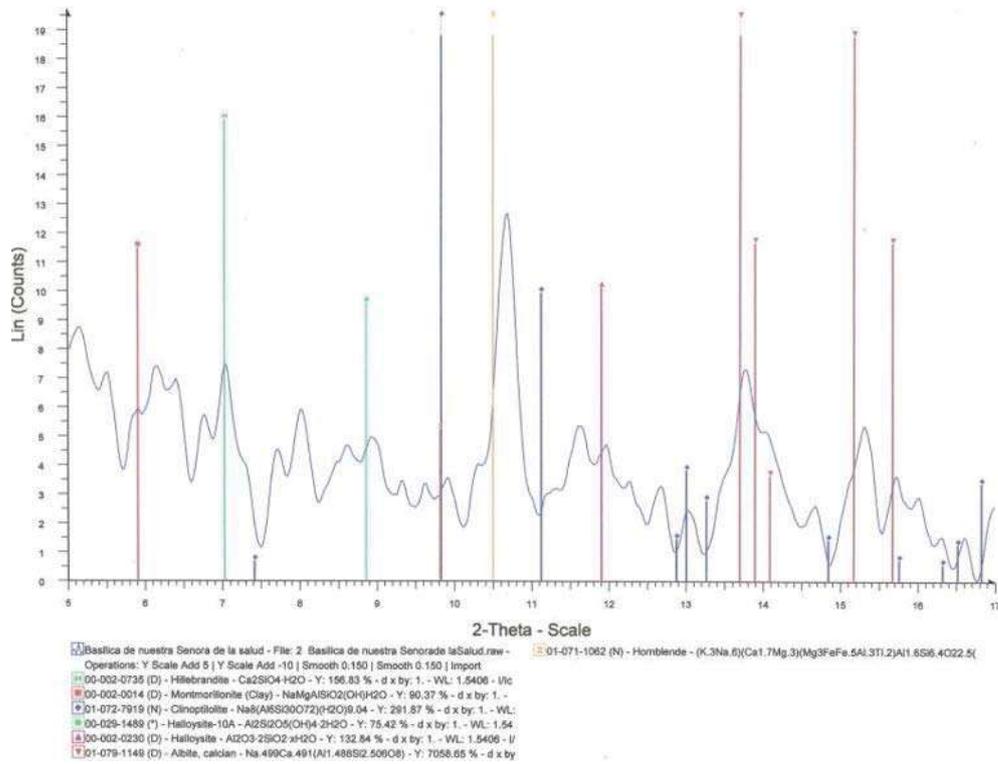


Fig. 13. Catedral de Morelia. Identificación de minerales accesorios.

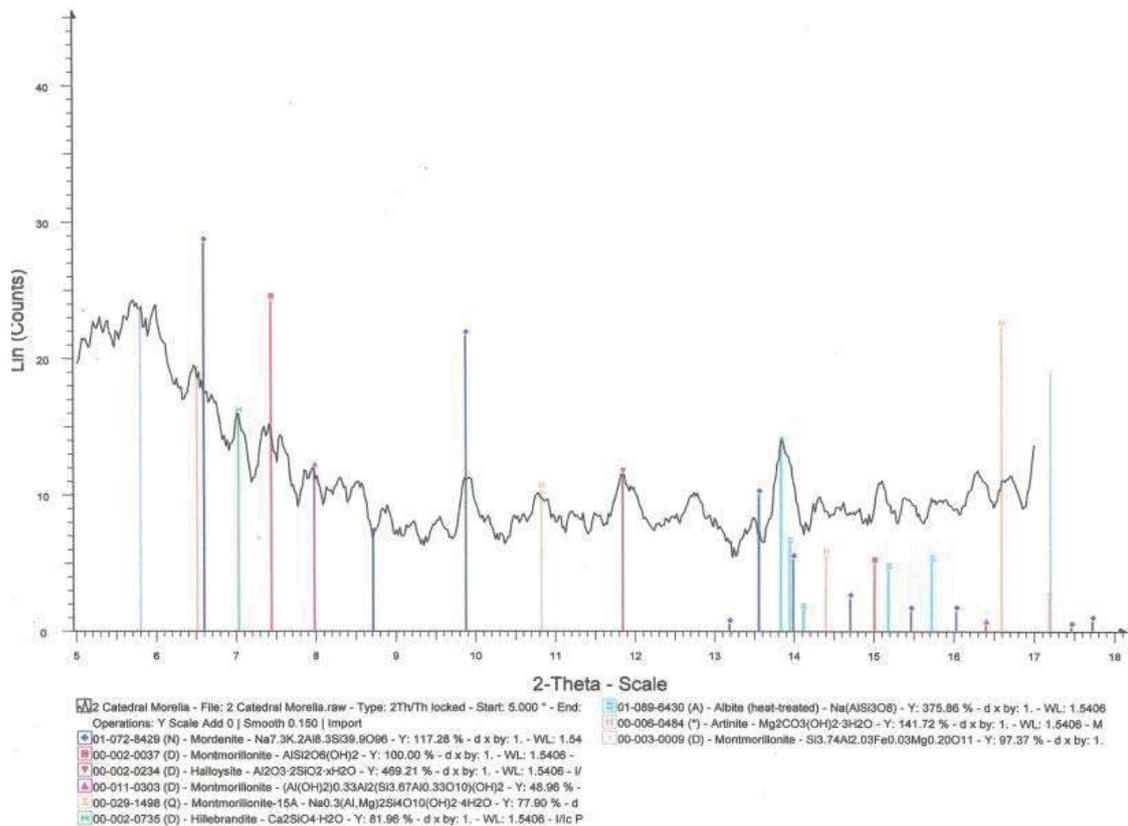
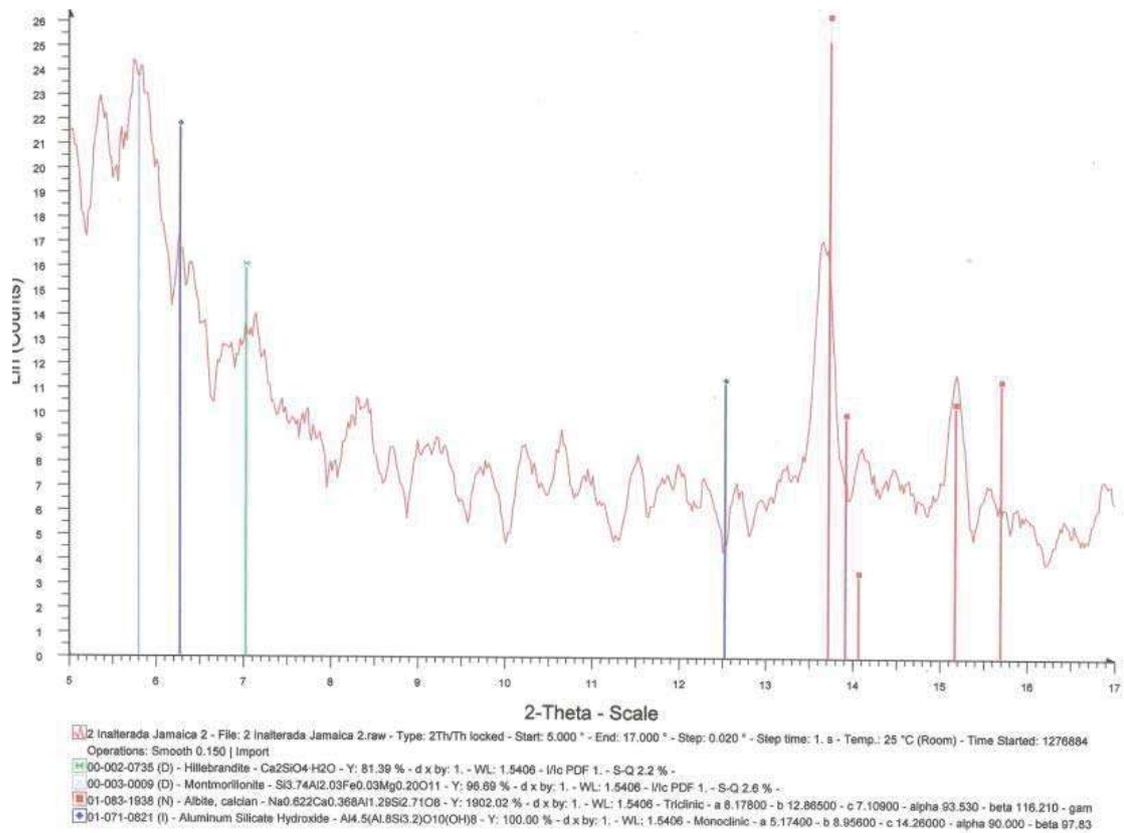


Fig. 14. Jamaica 2. Identificación de minerales accesorios.



IV.2. Análisis general de los resultados obtenidos en el Difractómetro de Rayos X, Equipo Siemens del IIM-UMSNH, en muestras pulverizadas que pasan malla 400 ASTM.

Igimbritas alteradas	Silicon Oxide	Albite	Sodium Aluminum Silicate	Quartz	Sanidine	Apatite	Cristobalite	Muscovite	Calcite Magnesian	Calcium Carbonate
NSSP	X	X	X	X						
TCM		X	X	X						
CCM	X	X		X	X					
CSNM			X	X	X					
CM	X	X								
TSAM		X		X		X	X	X		

Cuadro 1. Minerales encontrados en las ignimbritas alteradas o de los monumentos estudiados.

Igmimbritas sanas o de los bancos	Silicon Oxide	Albite	Sodium Aluminum Silicate	Quartz	Sanidine	Apatite	Cristobalite	Muscovite	Calcite Magnesian	Calcium Carbonate
C1		X		X	X					X
J2				X	X				X	
T1		X	X							
T2	X	X								

Cuadro 2. Minerales encontrados en las ignimbritas sanas o de los bancos en explotación.

Simbología:

NSSP= Basílica de Nuestra Señora de la Salud, Pátzcuaro.

TCM= Templo de Capuchinas, Morelia.

CCM= Casa de la Cultura, Morelia.

CSNM= Primitivo y Nacional Colegio de San Nicolás, Morelia.

CM= Catedral, Balastrado superior de la torre, Morelia.

TSAM= Templo de San Agustín, costillas de la cúpula, Morelia.

C1= Cointzio 1

J2= Jamaica 2

T1= Tlalpujahuá 1

T2= Tlalpujahuá 2

La composición principal de las ignimbritas estudiadas está formada por: Minerales de sílice: cuarzo y cristobalita, feldespatos: albita, plagioclasas: sanidina, y micas como la moscovita. Se descubrió la presencia de minerales secundarios o accesorios pertenecientes al grupo de las Zeolitas, como la Mordenita y la Clinoptilolita; y minerales con estructura laminar como las Arcillas montmorilloníticas.

V. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

V.1. Alteración de los monumentos.

La alteración de los monumentos está causada por un conjunto de procesos que tiene lugar bajo la acción de los agentes meteorológicos, e implican un cambio del aspecto externo, de la forma, o incluso de la estabilidad mecánica de un componente arquitectónico o escultórico. Estos procesos tienen lugar bajo diversas condiciones: la naturaleza de los minerales contenidos en el elemento arquitectónico afectado, la climatología, el crecimiento de líquenes, entre otros. En el ámbito urbano: la agresividad de la atmósfera en contacto con el material en cuestión, que puede llegar a ser muy alta debido a la presencia de altas concentraciones de gases contaminantes (monóxido de carbono, bióxido de carbono y óxido de azufre), capaces de reaccionar con el agua, formar ácidos y atacar a los minerales.

La meteorización consiste en la alteración que experimentan las rocas en contacto con el agua, el aire y los seres vivos con el medio ambiente en general. Es una acción geológica de la atmósfera que produce una degradación, fragmentación y oxidación. Si existe desintegración es meteorización física, pero si hay descomposición de los materiales rocosos se clasifica como química.

Meteorización física o mecánica: es aquella que se produce cuando, al bajar las temperaturas que se encuentran en las grietas de las rocas, se congelan con ella, aumenta su volumen y provoca la fractura de las rocas, sin alterar su estructura química. Hay dos tipos principales de esta intemperización mecánica: Desintegración en bloque, que se da por la formación de grietas; y desintegración granular, que resulta de la pérdida de cohesión entre las partículas individuales de los minerales.

Algunas causas para la meteorización física son: Variación de la temperatura; acción de plantas y animales; expansiones térmicas de los minerales; congelación; desgaste, impacto y trituración; exfoliación esferoidal; mezclado mecánico y agentes físicos; insolación; gelivación o fragmentación de las rocas por ciclos repetidos- deshielo; palpitación acción de las raíces y crecimiento cristalino.

Meteorización química: es aquella que se producen cuando los materiales rocosos reaccionan con el agua o con las sustancias disueltas en ella. Causa la desintegración de las rocas. Las formas del intemperismo químico son:

Disolución. Disociación de moléculas de rocas por ácidos como el carbónico y el húmico.

Hidratación. Fragmentación de la roca como consecuencia del aumento de volumen producido por el agua de cristalización.

Hidrólisis. Consiste en la incorporación de iones de H^+ y OH^- a la red estructural de los minerales.

Oxidación. Se da al reaccionar el oxígeno disuelto en el agua con las rocas.

Carbonatación. Fijación del bióxido de carbono.

Reducción. Al perder oxígeno, las rocas se alteran.

Los factores del intemperismo químico son: intemperismo mecánico, composición mineralógica, profundidad de los materiales y variaciones de temperatura y humedad. (González 2003).

V.2.Causas externas del deterioro de las rocas

Agua. Origina procesos tanto físicos (acción en cuña de ciclos hielo-deshielo), como químicos: disolución e hidrólisis de minerales.

Atmósfera. Los componentes atmosféricos pueden ser muy variados y en algunos casos actúan directamente sobre los minerales (caso del ozono), y en otros aportan agentes que el agua o el vapor del agua de la atmósfera pueden incorporar actuando sobre las rocas en forma líquida. Los principales contaminantes atmosféricos son: los óxidos de Nitrógeno, Carbono y Azufre procedentes de la combustión de hidrocarburos, el gas metano emitido por los fertilizantes y la quema de bosques y los gases de combustión liberados en la incineración de residuos sólidos.

Organismos vivos (biodeterioro). Pueden ser fenómenos físicos como la acción de las raíces de plantas que se introducen por las grietas o por las juntas de las edificaciones, o afectar a las cimentaciones; o físico-químicos como los excrementos de las aves o la acción de líquenes o bacterias.

Antropogénicos: son los factores relacionados con la acción del hombre, ya sea previamente a la instalación del material, o durante la misma (tipo de labra, tratamientos

que reciba, carga estructural que se le apliquen, posición geométrica en que se dispongan, tipo de elemento arquitectónico). Por otra parte el tráfico favorece la presencia de contaminantes en la atmósfera, que resultan especialmente agresivos en el ámbito urbano; así mismo el tráfico pesado puede afectar la estabilidad de las construcciones próximas. Las calefacciones que utilizan calderas al carbón y las refinerías de petróleo también afectan los núcleos urbanos.

V.3. Causas internas o propias de las rocas:

Mineralogía: La composición mineralógica del material de construcción es siempre fundamental para explicar las transformaciones que puedan sufrir las rocas, cada mineral presenta distintas susceptibilidades a los agentes externos descritos: unos son fácilmente solubles o hidrolizables, o sufren más la acción de los agentes atmosféricos, o se desgastan con mayor facilidad por presentar menor dureza.

Textura. Afecta a su comportamiento frente a la meteorización. Por ejemplo, las rocas de grano más grueso, se degradan por lo general más rápidamente que las de grano más fino.

Tectónica. Implica la aparición de diaclasas o microfracturas en una roca aunque estas son prácticamente invisibles. Sin embargo, bajo la acción de cargas se manifiestan por fenómenos de rotura, que a su vez favorecen la acción de otros agentes externos, como la infiltración de soluciones. Estas causas actúan siempre combinadas entre sí, produciendo los efectos que veremos a continuación, los cuales se dividen en 3 grandes grupos:

V.4. Combinación de causas externas e internas.

V.4.1. Efectos que implican la pérdida del material constructivo

Alveolización. Es originada por un proceso de hidrólisis seguido por disolución de determinados minerales como pueden ser calcita o yeso o por la acción del viento cargado de partículas, o bien por las raíces de las plantas. Es relativamente común en rocas porosas en general.

Excavaciones y cavernas. Consiste en la aparición de huecos individualizados de ciertas dimensiones (centimétricas como mínimo) pueden tener el mismo origen que la alveolización, pero suele ocurrir en rocas fundamentalmente no porosas, que sin embargo poseen nódulos de minerales solubles.

Erosiones superficiales. Son pérdidas de material rocoso de superficies expuestas, es decir, de aquellas que se encuentran en el exterior de las construcciones. Suele ocurrir sobre rocas de carácter masivo. La erosión consiste en el desgaste y fragmentación de los materiales de la superficie terrestre por acción del agua, el viento, etc. Los fragmentos que se desprenden reciben el nombre de detritos.

Arenización. Es un proceso superficial. Característico de los granitos y se debe a la meteorización de los feldespatos para dar minerales arcillosos, que son eliminados con facilidad, quedando sueltos los granos de cuarzo.

Disgregación. Es un proceso superficial. Típico de las areniscas, se debe a la disolución del cemento carbonatado o de pérdidas de la matriz arcillosa lo que libera los granos.

Pérdidas de material. En algunos casos llegan a ser generalizadas, perdiéndose completamente determinadas piezas arquitectónicas, normalmente por evolución de algunos de los efectos anteriores (Davis, 1980).

V.4.2. Cambios en la coloración

Pátinas. Son delgadas películas superficiales, que pueden tener diversas causas y tipologías.

Pátinas de envejecimiento. Causadas por el propio paso del tiempo y exposición a la intemperie.

Pátinas de suciedad. Ennegrecimiento causado por la contaminación ambiental inducida por los hollines residuales dejados por la combustión incompleta de carbonos (calefacciones) o del diesel de camiones o autobuses.

Pátinas de lavado. Producidas por escorrentía diferencial del agua.

Pátinas de decoloración. Variación de la tonalidad natural de la piedra. También es llamada “noble pátina”

Pátinas biogénicas. La superficie de la roca está recubierta por organismos, como pueden ser líquenes.

Eflorescencias. Son manchas blancas producidas por la precipitación de sales solubles al migrar y evaporarse el agua en la superficie de las rocas porosas. Se pueden encontrar en excrementos de aves, en el suelo o en las aguas subterráneas así como en algunos tratamientos antiguos o bien en morteros utilizados. También pueden proceder de la roca original o de la cercanía al mar. Las sales más comunes que se encuentran son los sulfatos, cloruros, carbonatos y nitratos. Si la formación de sales tiene lugar bajo la superficie de la piedra reciben el nombre de subeflorescencias y si se forman en el interior criptoeflorescencias. Su efecto destructor está en función de:

- a) Tipo de sal formada y lugar de cristalización de la misma
- b) Condiciones ambientales: humedad y temperatura
- c) Presencia de fracturas o cavidades en la roca, provocan un aumento de volumen que tiende a incrementar el grado de fracturación o aumenta el tamaño de las cavidades.

Costras. Son láminas de material endurecido que resultan de la transformación superficial del sustrato pétreo. Estas costras se desarrollan en capas, presentando una morfología, dureza y color determinados. Su naturaleza físico-química no tiene nada que ver con la del sustrato.

Depósitos superficiales. Son acumulaciones del material extraño a la roca sobre su superficie. Pueden ser excrementos, o simplemente polvo, sobre el que a su vez puede crecer musgo.

V.4.3. Fracturaciones

Fragmentación. Presencia de fracturas no visibles por la acción de cargas estructurales que pueden fragmentar una roca longitudinal o transversalmente.

Exfoliación. Es una fisuración de la roca característica de aquellas que presentan esquistosidad o foliación metamórfica. Consiste en la separación a la escala milimétrica y menor, que normalmente es favorecida por la propia naturaleza de la roca, depende de la estructura interna del cristal y es constante para cada mineral. Los planos de exfoliación están orientados en el sentido de la menor cohesión, es decir en el sentido de las uniones más débiles entre cada unidad de la estructura cristalina. Un mineral se exfolia de acuerdo a un ángulo, por ejemplo la ortosa se exfolia en ángulo recto, las plagioclasas lo hace

oblicuamente, mientras que la euclasa tiene una buena exfoliación. Determinando de forma aproximada el ángulo de los planos de exfoliación, es posible distinguir algunos minerales parecidos tales como los anfíboles (120°) de los piroxenos (90°).

En la práctica se distinguen los siguientes grados de exfoliación:

Excelente. El mineral se exfolia en finas láminas en un solo sentido. Ej. Grafito, yeso, clorita, moscovita.

Perfecta. En mineral se exfolia en formas regulares delimitadas por los planos de exfoliación. Ej. Cubos-galena, halita; romboedros-calcita.

Buena. Los planos de exfoliación son menos visibles y no siempre son perfectamente rectos. Ej. Feldespato, anfíbol, piroxeno.

Imperfecta. Los planos de separación presentan una superficie irregular. Ej. Azufre, apatito.

Muy imperfecta. No existe exfoliación pero si fractura. Se habla de fractura concoidea (Ópalo y cuarzo); desigual (pirita); rugosa (plata y oro); desmenuzable (granate); terrosa (caolinita) (Susaeta, 1984).

Separación en placas. Es un exfoliación grosera, normalmente paralela a la superficie de exposición. Pueden tener su origen en la meteorización diferencial, de forma que la parte más externa se altera más rápidamente, y llega a separarse físicamente del resto de la roca.

Las alteraciones de los monumentos pueden llegar a ser tan peligrosas, ocasionándole a los elementos arquitectónicos el riesgo de desmoronamiento. Ello se debe a que la composición mineralógica de las rocas ha sufrido una meteorización física o química que implica cambios en su comportamiento mecánico, modificando con ello la del conjunto.

V.5. Granitos

Los granitos, son rocas de elevada dureza y resistencia física, siempre y cuando no contengan minerales fácilmente alterables que estén siendo afectados por proceso de meteorización. Los principales factores que condicionan las propiedades mecánicas del granito son los siguientes:

Alterabilidad de los feldespatos. Los feldespatos son los minerales más fácilmente alterables en las rocas graníticas. Cuando están sanos son minerales de alta dureza, muy aptos para un buen pulido y con muy baja capacidad de absorción de agua. Sin embargo, su alteración genera minerales arcillosos (caolín, illita), que presentan caracteres diametralmente opuestos: baja dureza, no aptos para el pulido, y con muy alta capacidad de absorción de agua. Frente a la intemperie de un granito la diferencia del comportamiento mecánico y la durabilidad es alterada enormemente.

Los feldespatos, heredados o residuales de la roca sobre la que se forma el suelo, pues son metaestables en medio atmosférico, tendiendo a transformarse en minerales de la arcilla. Al igual que el cuarzo, conforman la fracción arenosa del suelo, si bien en este caso le confieren una cierta reactividad

Alterabilidad de las micas. El granito contiene micas, siendo la biotita más típica que la moscovita. Ambos minerales son mucho más blandos que el cuarzo y los feldespatos, y tan alterables como los feldespatos, dando también origen a filosilicatos: clorita por parte de la biotita e illita por parte de la moscovita. Por tanto la presencia de mica en el granito en grandes cantidades implica un cierto riesgo de que la roca presente problemas de estabilidad mecánica.

Alterabilidad de los anfíboles. Los anfíboles son metaestables en condiciones atmosféricas y tienden a alterarse con relativo a facilidad.

Alterabilidad de los sulfuros. La roca graníticas contienen a los sulfuros como minerales secundarios, los más comunes son los de hierro (pirita, marcasita, pirrotina). En determinados casos y bajo ambientes atmosféricos agresivos estos minerales pueden alterarse, generando sulfatos y óxidos, dando origen a mancha marrón-rojizas. Esta es una evidencia clara del proceso de oxidación de los sulfuros cuyo producto final es la goethita:

Textura. No presenta una influencia clara en la alterabilidad de material, salvo en el sentido general de que las rocas de tamaño de grano más grueso resultan más alterables que las de grano más fino.

Minerales de la arcilla. Son muy abundantes en el suelo, constituyen la matriz general del mismo, la componente intergranular entre la fracción arenosa y entre los fragmentos de roca. Proceden de la alteración de los componentes de una roca meteorizada y en función de ello pueden ser muy variados:

1. *La illita*. (equivalente arcilloso de la mica blanca, moscovita), que se forma a partir de feldespatos y micas de rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas;
2. *La clorita*. Se forma a partir de los minerales ferromagnesianos que pueda contener la roca: biotita, anfíbol, piroxeno, olivino;
3. *La pirofilita*. Se forma a partir de minerales ricos en Aluminio en la roca original.
4. *Menos comunes son los filosilicatos del grupo de las arcillas especiales (esmectita-bentonita, sepiolita, palygorskita)*, se forman bajo condiciones climáticas muy específicas, o a partir de rocas de composición muy determinada, y que por sus características especiales confieren al suelo propiedades mecánicas diferentes a las habituales (suelos expansivos, suelos inestables). Los minerales de este grupo juegan un papel muy importante en la textura y en la físico-química del suelo, pues le confieren plasticidad, impermeabilidad, así como otras propiedades mecánicas y de relación entre el suelo y el agua que contiene, en especial en cuanto a la capacidad de absorción e intercambio iónico que pueda presentar.

Carbonatos. Los carbonatos son minerales frecuentemente formados por el proceso de edafogénesis, aunque debido a su alta solubilidad su acumulación no suele producirse en el horizonte más superficial. Las aguas subterráneas ricas en carbonatos ascienden hasta la superficie del terreno por capilaridad o por gradiente de humedad, depositándose ahí los carbonatos y originando los denominados “caliches”, auténticos escudos de color blanco que recubren la superficie del suelo.

Sulfatos. La presencia del sulfato en el suelo suele tener la doble vertiente de que pueden ser minerales relativamente comunes, pero al ser compuesto de solubilidad relativamente alta, su acumulación efectiva solo puede producirse bajo condiciones muy determinadas: abundancia de sulfatos (ej. Yesos) en el entorno inmediato, y clima árido o semiárido. Los sulfatos se acumulan en forma de costras o eflorescencias.

V.6. Conclusiones

Las zeolitas ocurren en la naturaleza como minerales, y pertenecen al grupo de los tectosilicatos. Las Zeolitas constituyen un grupo de silicatos con una gran capacidad de intercambio iónico y debido a que se encuentran “descompensadas eléctricamente,

necesitan incorporar cationes del tipo: N^+ y K^+ . La capacidad de intercambio iónico de una Zeolita esta directamente relacionada con la cantidad de Aluminio(Al) presente en su red cristalina y depende directamente de su composición química: Una alta capacidad de intercambio iónico corresponde a las zeolitas con baja relación SiO_2/Al_2O_3 .

Arcilla es un filosilicato de grano fino producto de la meteorización de otros minerales silicatados; en su acepción mas amplia, se refiere a todos los minerales, silicatados o no, que se forman como consecuencia de estos procesos y que simplemente tienen tamaño de grano inferior a 2 micras. Cuando hablamos de arcillas un componente fundamental van a ser siempre los filosilicatos que se forman en los procesos de alteración, cuya composición mineralógica puede ser muy variada en relación a que siempre van a ir acompañados de otros minerales.

La presencia de los minerales accesorios augura devitrificación, al no ser de origen volcánico, ya que se originaron a partir de una roca ígnea ácida de composición riolítica. El porcentaje de Zeolitas y/o Arcillas, como materiales productos de meteorización es mínimo y no ocurre en tiempos humanos, así como tampoco está sujeto a evitar su progresión, si existe influencia de las condiciones meteóricas y de los contaminantes atmosféricos.

Los resultados aquí obtenidos forman parte de un macroproyecto, el objetivo aquí no fue determinar la resistencia mecánica ni la durabilidad, sin embargo se observa que las rocas sanas procedentes de los bancos de Jamaica y Cointzio, no son las opciones idóneas para reposiciones, pues el frente de extracción de Jamaica ha dado por resultado material muy pulverulento con poca cohesión, y el banco de Cointzio suele ser el más reactivo a los compuestos de azufre medioambiental. El Banco de Tlapujahua, si tiene una elevada resistencia mecánica como los bloques provenientes de algunos monumentos histórico-arquitectónicos sin embargo, es un material con mucha discrepancia ornamental.

Se observó que en los casos donde existe mayor determinación de minerales secundarios como arcillas jóvenes y zeolitas, es coincidente con la menor cohesión de la matriz de las ignimbritas y por ende, resulta en menores resistencias mecánicas bajo diferentes sollicitaciones de carga (Alonso, 2010).

REFERENCIAS

Susaeta, 1984, Atlas ilustrado de los minerales. Susaeta ediciones S. A, España. pp12.

Tyrrell G.W, 1984. Principios de petrología, 8th Ed. Continental, S. A. de C. V., México.

Clarck y Washington, 1924. Composition of the Earth's Crust, Prof. Paper 127, U. S. Geol., Surv pp 6-16.

Davis, N, 1980, Where pipes freeze. *Alaska Science Forum*, Article 443 (Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks), <http://www.gi.alaska.edu/ScienceForum/ASF4/443.html>.

La Iglesia, A., González, V., López-Acebedo, V. and C. Viedma, 1996, Salt crystallization in porous construction materials I: estimation of crystallization pressure. *Journal of Crystal Growth* **177**, 111-118.

Askeland, Donald R., 1985. La Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Grupo Editorial Iberoamérica. México, pp 299.

Fisher, R.V.& Schmincke H. –U., 1984. Pyroclastic Rocks, Berlin, Springer- Verlag.

Tarbuck, E.J. & Lutgens, F.K. 2005. Ciencias de la tierra, Octava Edición. Pearson Educación S.A., Madrid. ISBN 84- 205- 4400- 0

Silva Mandujano, Gabriel, 1995. El templo de Capuchinas y el Ex-Hospicio”, en Morelia, Patrimonio Cultural de la Humanidad, Silvia Figueroa Zamudio (Editora), Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gobierno del Estado de Michoacán, Ayuntamiento de Morelia, pp. 231 y 232.

Silva Mandujano, Gabriel, 1995. la Catedral, en Morelia, Patrimonio Cultural de la Humanidad, Silvia Figueroa Zamudio (Editora), Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gobierno del Estado de Michoacán, Ayuntamiento de Morelia, pp 68.

Paredes Carlos, 2001. U.M.S.N.H/Coordinación de la Investigación Científica, Morelia y su Historia, primer foro sobre el Centro Histórico de Morelia.

Garduño Monroy, V.H., Corona Chávez P., Israde Alcántara I., Mennella L., Arreygue Rocha E., Bigioggero B., Chiesa S. 1999. Carta Geológica de Michoacán, escala 1:250000: Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Pp111

Robinson, E.S., 1990. *Geología Física Básica*. México, Limusa-Noriega. Sección 1.

Pasquare G. Garduño V. H, et al., 1990 “Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacán, Mexico”, *Geological Society of America*, pp. 1-20.

Ipohorski .M., Marrapodi. M.R. 1973 *Microscopia Electrónica de Barrido*, C.N.E.A. Buenos Aires.

Orozco, M., Azañon, J, Azor, A. Alonso-Chavez, 2004: *Geología Física*.- 302 pp., 2da. Edición; Thomson Editores, Madrid, España.

Hurlbut, C.S. & Klein, C. 1982. *Manual de Mineralogía de Dana*. Reverté, Barcelona.

Olguín Gutiérrez María Teresa, *Zeolitas características y propiedades*. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Depto. de Química, A. P. 18-1027. Artículo publicado en México D. F.

Alonso, G. E.M. 1995. Tesis de Maestría. *Propiedades físicas y mecánicas de ignimbritas del Municipio de Morelia*. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Morelia, Michoacán.

Ramírez, R. E., 1985. *Catálogo de la ciudad de Morelia*. Gob. del Edo de Mich.

Alessandrini, G. et al, 1978. *Investigation of the Degradation of Stone: Working Effects and Conservation Problems*, International Symposium in Paris. Centro “Gino Bozza” per lo studio delle cause di deperimento e dei metodi di conservazione delle opera d’ arte- Piazza L. da Vinci 32 Milano (Italia).

Franceschi, V. R. y H. T. Horner Jr. *The Botanical Review* 46 (1980), pp. 361- 427

Brindley, G. W. y Brown, G, 1980, *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray*.

González, V. L.I., 2003, *Ingeniería Geológica*, Editorial autorizado de Pearson Educación S. A.

Hawkes, P. W. 1972. *Electron Optic and Electron Microscopy*. Taylor y Franciss.