

**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y TEXTURAL DE ZEOLITAS
PRESENTES EN BASALTOS TERCIARIOS DE LA ISLA DE SKYE (ESCOCIA)**

**JAVIER FRANCISCO HERRERA RÍOS CÓDIGO 1993404
JUAN MANUEL TRIANA RAMÍREZ CÓDIGO 2020088**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2010

**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y TEXTURAL DE ZEOLITAS
PRESENTES EN BASALTOS TERCIARIOS DE LA ISLA DE SKYE (ESCOCIA)**

**JAVIER FRANCISCO HERRERA RÍOS CÓDIGO 1993404
JUAN MANUEL TRIANA RAMÍREZ CÓDIGO 2020088**

Trabajo de tesis de grado para optar el título de Geólogo

Director

Geólogo PhD Carlos Alberto Ríos Reyes

Codirectores

Geólogo MSc Oscar Mauricio Castellanos Alarcón

Químico PhD José Antonio Henao Martínez

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2010

AGRADECIMIENTOS

A los químicos Jesús Andelfo Pinilla (candidato a doctor) y José Luís Pinto (candidato a magister) del Grupo de Investigación en Química Estructural de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander por su colaboración y asistencia en la toma de datos de difracción de rayos X.

A los doctores Craig D. Williams y Clive L. Roberts de la Escuela de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Wolverhampton por su colaboración en el trabajo de campo.

A la señora Bárbara Hodson por su colaboración y asistencia en la toma de microfotografías de zeolitas.

Al señor Luís Eduardo Garrido Palencia, técnico del laboratorio de muestras de la Universidad Industrial de Santander, por su colaboración y asistencia en la realización de secciones delgadas.

A la litoteca del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), por su colaboración en la realización de secciones delgadas.

DEDICATORIA

Juan Manuel Triana Ramírez

Este logro es dedicado a mis padres, Alvaro Triana y Adelaida Ramírez de Triana, por su amor y apoyo incondicional. A mis abuelos y hermanos. A las reinas María Juliana, Samantha Lucía y al bebé en camino. A todas las personas que en algún momento de este camino fueron motivación en momentos difíciles y a las que lo seguirán siendo.

Javier francisco Herrera Ríos

*A mis padres, Eduardo Herrera y Flor María Ríos por su bondad infinita.
Para Sandra Herrera, mi hermana, por su generosidad y coraje.
A mi hermano Aníbal Herrera (Q.E.P.D).
Sandra Patricia Gómez, ¿A quién, sino a ti?*

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	2
1.1. PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA O PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE NECESIDADES Y PERTINENCIA	3
1.1.1. Justificación del problema	4
1.2. ALCANCES Y OBJETIVOS	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivos específicos	5
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	6
2.1. PROPIEDADES Y TIPOS DE ZEOLITAS NATURALES	6
2.2. ZEOLITAS NATURALES A NIVEL MUNDIAL	10
2.3. ZEOLITAS NATURALES EN COLOMBIA	12
CAPITULO 3. METODOLOGÍA	15
3.1. REVISIÓN Y DISCUSIÓN DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
3.2. TRABAJO DE CAMPO	15
3.3. PROCESAMIENTO DE DATOS DE CAMPO	15
3.4. PREPARACIÓN DE MUESTRAS	16
3.5. ANÁLISIS EN MICROSCOPIO DE LUZ TRANSMITIDA	16
3.6. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y TEXTURAL	17
CAPITULO 4. GEOLOGÍA DE LA ISLA DE SKYE	18

4.1. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	18
4.2. GEOMORFOLOGÍA	22
4.2.1. Península Duirinish	22
4.2.2. Península Waternish	25
4.2.3. Península Trotternish	28
4.2.4. Península de Sleat	32
4.2.5. El Cuillin	33
4.3. SECUENCIA VOLCÁNICA CON PRESENCIA DE ZEOLITAS NATURALES	37
4.4 OCURRENCIA DE CAMPO DE ZEOLITAS NATURALES	41
4.4.1 Zeolitas en amígdalas	44
4.4.2 Zeolitas en venas	48
CAPITULO 5. CARACTERIZACIÓN MINERALÒGICA Y TEXTURAL	52
5.1 MICROSCOPIÀ DE LUZ TRANSMITIDA	52
5.2 MICROSCOPIÀ ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)	56
5.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X	59
CAPITULO.6. ZEOTIPOS Y ASOCIACIONES	67
6.1. TIPOS DE ZEOLITAS NATURALES	67
6.2. ASOCIACIONES ZEOLÍTICAS	68
CAPITULO 7. CONCLUSIONES	69
CAPITULO 8. RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y TEXTURAL DE ZEOLITAS PRESENTES EN BASALTOS TERCIARIOS DE LA ISLA DE SKYE (ESCOCIA).¹

**AUTORES: JAVIER FRANCISCO HERRERA RÍOS
JUAN MANUEL TRIANA RAMÍREZ**

PALABRAS CLAVES: zeolitas, basaltos, Skye, Escocia, análisis, amígdalas, venas.

Esta investigación plantea la caracterización mineralógica y textural de zeolitas presentes en rocas basálticas de edad Terciaria de la Isla de Skye (Noroeste de Escocia). Las zeolitas identificadas podrían representar un primer paso en el camino del conocimiento de las zeolitas que junto con estudios futuros permitirán establecer de que manera y donde se pueden ubicar yacimientos de este tipo en nuestro territorio.

Se ha reportado la presencia de basaltos de edad Terciaria en la Isla de Skye, estos basaltos contienen amígdalas y venas con zeolitas y en este trabajo se describen sus características en afloramiento, muestra de mano, morfología, mineralogía y sus respectivas asociaciones.

Los diferentes estudios realizados a las muestras recolectadas por el Dr. Carlos Alberto Ríos durante el trabajo de campo en la Isla de Skye, confirmaron la existencia de zeolitas como relleno de las amígdalas o venas acompañadas ocasionalmente por otros minerales. Estas zeolitas varían en formas y tamaños y en algunos casos presentan zonaciones, que fueron observadas mediante análisis de microscopía de luz transmitida, microscopía electrónica de barrido (MEB) y análisis mineralógico por difracción de rayos x.

17 tipos de zeolitas fueron identificadas durante el estudio de amígdalas y venas presentes en los basaltos de la Isla de Skye. Las fases zeolíticas son analcima y su variedad magnesiana, wairakita, chabazita y sus variedades cálcica y sódica, natrolita, thompsonita y su variedad cálcica, estellerita y su variedad sódica, estilbita y su variedad cálcica, filipsita y su variedad sódica y levina. Es común la ocurrencia de nontronita en más del 70% de las muestras analizadas, así como de cuarzo, sodalita, hematita, diópsido y carbonatos (calcita, dolomita y calcita magnesiana).

*Proyecto de Grado

*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Carlos Alberto Ríos Reyes.

SUMMARY

TÍTULO: MINERALOGICAL AND TEXTURAL CHARACTERIZATION OF ZEOLITES PRESENT IN TERTIARY BASALTS OF THE ISLE OF SKYE (SCOTLAND).²

AUTORES: JAVIER FRANCISCO HERRERA RIOS
JUAN MANUEL TRIANA RAMIREZ

PALABRAS CLAVES: zeolite, basalts, Skye, Scotland, analysis, amygdals, veins .

This investigation shows the mineralogical and textural characterization of zeolites presented in tertiary basalts of the Isle of Skye. (North-West of Scotland). This investigation pretend to be the first of many investigations on this subject what could identify the exploration targets that helps us in discovering new deposits in our country.

Many authors have reported the presence of zeolites in tertiary basalts in the Isle of Skye, this basalts contains amygdals and veins with zeolites, this investigation described the outcrop, hand samples, morphology and mineralogy characteristics and mineralogical associations.

Much analysis realized to the zeolites samples recollected by Ph.D. Carlos Alberto Ríos in the field job in the Isle Of Skye shows the presence of zeolites as amygdals and veins beside other minerals. This zeolites have different forms, sizes and sometimes zonations that were analyzed with transmitted light microscopy, scanning electron microscopy and x ray diffraction.

17 types of zeolites were identified during the study of amygdals and veins present in the basalts from the Isle of Skye. The phases are analcime zeolite and its magnesian variety, wairakite, chabazite and its calcium and sodium varieties, natrolite, thompsonite and its calcium variety, stellerite and its sodium variety, stilbite and its calcium variety, phylipsite and its sodium variety and levin. It is common the nontronite occurrence in more than 70% of the analyzed samples, so quartz, sodalite, hematite, diopside and carbonates (calcite, dolomite and magnesian calcite).

*Grade Project

*Faculty of Physical Chemistry. School of Geology Director Carlos Alberto Ríos Reyes

INTRODUCCIÓN

Se ha reportado la presencia de basaltos de edad Terciaria en la Isla de Skye, estos basaltos contienen amígdalas y venas con zeolitas y en este trabajo se describen sus características en afloramiento, muestra de mano, morfología, mineralogía y sus respectivas asociaciones.

Los diferentes estudios realizados a las muestras recolectadas por el Dr. Carlos Alberto Ríos durante el trabajo de campo en la Isla de Skye, confirmaron la existencia de zeolitas como relleno de las amígdalas o venas acompañadas ocasionalmente por otros minerales. Estas zeolitas varían en formas y tamaños y en algunos casos presentan zonaciones, que fueron observadas mediante análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB)

Los resultados mostrados en el presente trabajo son el producto de la aplicación de diferentes técnicas analíticas y pretenden mostrar una completa caracterización mineralógica y textural de las zeolitas naturales de la Isla Skye, así como también despertar un interés exploratorio de este tipo de material en nuestro territorio

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

El interés científico en los minerales del grupo de las zeolitas resulta principalmente de su estructura cristalina específica (la presencia de canales y cavidades) lo cual hace posible su uso como tamices moleculares. Debido a esta propiedad, este grupo mineral encuentra su aplicación en diferentes dominios, tales como purificación de gases y líquidos, retención de metales de aguas residuales, alimentación de animales, crecimiento de plantas, protección del ambiente natural, entre otros. Este amplio rango de aplicaciones resulta de las propiedades físicas y químicas del grupo de las zeolitas. La demanda de zeolitas resulta en exitosos intentos de sintetizar estos minerales (Donahoe *et al.* 1984, Gottardi 1989). Por lo tanto, la apropiada caracterización de las propiedades físicas y químicas de las zeolitas naturales conduce no solo al reconocimiento de su utilidad práctica sino también a la determinación de sus condiciones de formación. El reconocimiento de su estructura, a su vez, hace posible encontrar su aplicación más apropiada en la actividad económica.

Los materiales geológicos de interés en esta investigación son las zeolitas formadas en las rocas basálticas de edad Terciaria que afloran en la Isla de Skye (Escocia) en forma de amígdalas y venas blancas que cortan la roca basáltica, las cuales se formaron probablemente como consecuencia de actividad post-magmática de soluciones hidrotermales.

La ocurrencia de zeolitas en la Isla de Skye ha sido reportada brevemente en algunos trabajos (Ferry *et al.*, 1987), sin embargo, una detallada identificación de los minerales particulares y su relación no ha sido realizada.

1.1. PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA O PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE NECESIDADES Y PERTINENCIA

Desde hace años atrás los yacimientos de zeolitas naturales a nivel mundial se han venido utilizando en diversas aplicaciones industriales (Bastidas, 2002). Sin embargo, en nuestro país existe un desconocimiento de distintos tipos de depósitos minerales, llegando en algunos casos, a la indiferencia con relación a la exploración de recursos minerales estratégicos para la economía Colombiana. Lo anterior puede ser una de las causas de los relativos pocos hallazgos en relación al gran potencial de yacimientos minerales que debemos tener, dada la riqueza natural de nuestro territorio Colombiano. Aunque se sabe de su existencia, las zeolitas no han adquirido en nuestro país la importancia que en los últimos años le han dado a nivel mundial en diversos campos, por ejemplo, en la mitigación de problemas ambientales. Sin embargo, en Colombia apenas se plantea la necesidad de encontrar yacimientos de zeolitas naturales, mientras que en el campo de la síntesis se han logrado avances importantes. Conscientes de la problemática nacional en el tratamiento de residuos, es importante promover la búsqueda de alternativas para minimizar el volumen de residuos y desarrollar tecnologías limpias que permitan minimizar el impacto ambiental generado por su disposición. El uso de zeolitas permitirá reducir los costos y tamaño de las plantas de tratamiento, lo cual le brindaría grandes beneficios al sector industrial de nuestro país.

Esta investigación plantea la caracterización mineralógica y textural de zeolitas presentes en rocas basálticas de edad Terciaria de la Isla de Skye (Noroeste de Escocia). Las zeolitas identificadas podrían representar un primer paso en el camino del conocimiento de las zeolitas que junto con estudios futuros permitirán establecer de que manera y donde se pueden ubicar yacimientos de este tipo en nuestro territorio. Las diversas propiedades de las zeolitas han hecho que muchos países muestren un gran interés en su exploración. Sin embargo, a pesar de la

amplia variedad de ambientes geológicos que existen en nuestro país, algunos de los cuales podrían presentar condiciones apropiadas para dar origen a este tipo de depósitos, existen pocos estudios pertinentes a este mineral. Una exploración no exitosa en Colombia no necesariamente indica que los depósitos de zeolitas naturales no existan. Esto puede ser como consecuencia de incorrecta exploración, esfuerzo insuficiente o tecnología antigua incapaz de localizar estos depósitos.

1.1.1. Justificación del problema

Años después de que el petróleo, considerado el “oro negro”, marcara el *boom* del siglo XX en todo el mundo, las zeolitas prometían convertirse en el “mineral del siglo” debido a sus propiedades y aplicaciones. El interés económico de las zeolitas y la importancia de su estudio radica en que, gracias a sus particularidades excepcionales, se convierten en los únicos minerales en la naturaleza que poseen cinco propiedades: adsorción, intercambio catiónico, tamiz molecular, actividad catalítica y estimulación biológica. Esto hace que las zeolitas tengan una amplia gama de aplicaciones en la industria, la agricultura, la descontaminación ambiental, medicina y otras.

Debido a las múltiples propiedades y usos de las zeolitas, estas se han hecho merecedoras de ser llamadas el mineral del futuro; diferentes países de todo el mundo, incluyendo varios de Latinoamérica, han hecho importantes avances en la exploración y explotación de este mineral. En contraste a estos países, Colombia no ha desarrollado estudios que lo mantengan a la vanguardia en el campo de las zeolitas naturales. Por lo tanto, se hace prioritario realizar un estudio de las zeolitas naturales en un contexto geológico como el de la Isla de Skye (Noroeste de Escocia), el cual sirve de modelo comparativo (geología, modo de ocurrencia y cristalografía) con un contexto geológico colombiano en el que posiblemente

futuros estudios de exploración determinen la presencia de zeolitas de origen similar.

1.2. ALCANCES Y OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Realizar una caracterización mineralógica y textural de zeolitas presentes en rocas basálticas Terciarias de la Isla de Skye (Escocia).

1.2.2. Objetivos específicos

Procesar la información recolectada en la fase de campo.

Reconocer al microscopio de luz transmitida las propiedades ópticas de las zeolitas presentes en amígdalas y venas de las rocas volcánicas de la Isla de Skye.

Llevar a cabo un estudio de los rasgos morfológicos de las zeolitas por microscopía electrónica de barrido (MEB)

Establecer la composición mineralógica de las amígdalas y venas estudiadas por difracción de rayos X (DRX) con el fin definir las fases zeolíticas presentes.

Integrar los datos obtenidos a partir de las técnicas analíticas utilizadas con el fin de conocer la mineralogía y rasgos texturales de las zeolitas analizadas.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. PROPIEDADES Y TIPOS DE ZEOLITAS NATURALES

Las zeolitas pertenecen a la familia de los tectosilicatos y son aluminosilicatos cristalinos, con elementos de los grupos I y II como cationes. 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 (Figura 1).



Atómica Tetraédrica Cristalina.

Figura 1. Estructura típica de las zeolitas. Tomado de Zeolitas Características y Propiedades. Olgún, M. Pdf.

Las zeolitas se forman por la reacción en los poros de materiales sólidos con agua. El reactante común es vidrio volcánico, pero otros reactantes son arcilla, montmorillonita, plagioclasa nefelina, sílice biogénico y cuarzo. Minerales arcillosos y zeolitas pueden formarse o no a partir de iguales materiales, esto depende del ambiente físico-químico y particularmente de la actividad de especies disolventes existentes tales como H^+ , H_4SiO_4 y $\text{Al}(\text{OH})_4^-$.

La estructura presenta canales y cavidades de dimensiones moleculares en los cuales se encuentran los cationes de compensación, moléculas de agua u otros

adsorbatos y sales. Este tipo de estructura microscópica hace que las zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande, entre 500 y 1000 m²/g, con relación a su superficie externa. Sin embargo esta superficie es poco accesible para los contaminantes de tipo macromolecular.

La microporosidad de estos sólidos es abierta y la estructura permite la transferencia de materia entre el espacio intracrystalino y el medio que lo rodea. Esta transferencia está limitada por el diámetro de los poros de la zeolita, ya que sólo podrán ingresar o salir del espacio intracrystalino aquellas moléculas cuyas dimensiones sean inferiores a un cierto valor, el cual varía de una zeolita a otra. En la Tabla 1 se muestran algunas propiedades importantes de las zeolitas.

Tabla 1. Características generales de las zeolitas. Tomado de Zeolitas Características y Propiedades. Olgún, M. Pdf.

Propiedad	Valor
Diámetro de poro	2 a 12 Å
Diámetro de cavidades	6 a 12 Å
Superficie interna	500-1000 m ² /g ⁽⁵⁾
Capacidad de intercambio catiónico	0 a 650 meq/100g
Capacidad de adsorción	<0.35 cm ³ /g
Estabilidad térmica	Desde 200°C hasta más de 1000°C

La principal característica de las zeolitas es que su contenido en agua es variable. La pérdida de agua por calentamiento es progresiva, sin que varíe esencialmente la estructura, sin embargo, las propiedades ópticas varían con la cantidad de agua.

Entre otras características físicas y químicas de las zeolitas se encuentran: las variadas coloraciones que presentan dependiendo de la presencia de pequeñas cantidades de óxidos de Fe y de otros metales. Aparecen en la naturaleza desde blancas hasta colores tenues (proporcionalmente a la deshidratación) con brillo sedoso a nacarado; densidad = 2.0 y 2.3 g/cm³; índice de refracción bajos (1.47-1.52); birrefringencia débil (menor que 0.015), con frecuentes anomalías ópticas; funden fácilmente al soplete; son menos duras que otros silicatos hidratados y son atacadas por ácidos en mayor o menor grado.

CLASIFICACIÓN

Si se considera el número de átomos de oxígeno que forman los anillos o poros por los cuales se penetra al espacio intracristalino, las zeolitas se clasifican de la manera como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las zeolitas respecto al tamaño de los poros. Tomado de Zeolitas Características y Propiedades. Olguín, M. Pdf.

Zeolita	Átomos de O que forman la abertura	Diámetro de poro θ (Å)	Ejemplos
Poro extragrande	18	$\theta > 9$	MCM-9, VPI-5
Poro grande	12	$6 < \theta < 9$	Y, β , Ω
Poro mediano	10	$5 < \theta < 6$	ZSM-5, ZSM-11
Poro pequeño	8	$3 < \theta < 5$	Erionita, A

Meier (1968), apoyándose en estudios cristalográficos, propuso una clasificación estructural de las zeolitas (Tabla 3) basada en la existencia de ocho unidades secundarias de construcción, las cuales se muestran en la Figura 3.

Tabla 3. Clasificación estructural de las zeolitas según Meier, (1968).

GRUPO C4 (GRUPO DE LA FILIPSITA)			GRUPO C8-T1 (GRUPO DE LA MORDENITA)			GRUPO C6-C6 (GRUPO DE LA FAUJASITA)		
ZEOLITA	TO ₄	Si/Al	ZEOLITA	TO ₄	Si/Al	ZEOLITA	TO ₄	Si/Al
Li-ABW	8		Bikitaita	9		Linde	24	
Filipsita	16		Deschiardita	24		Rho	46	
Harmotoma	16		Epistilbita	24		ZK5	96	1-3
Gismondita	16		Ferrierita	36	4-7	Faujasita	192	
Na-P	16		Mordenita	48		Paulingita	672	
Amicita	16	1-3	ZSM-5	96	<20	Linde N	768	
Garronita	16		ZSM-11	96				
Yugawaralita	16							
Merlionita	32							
GRUPO C4-C4 (GRUPO DE LA ANALCITA)			GRUPO C6 (GRUPO DE LA CHABAZITA)			GRUPO C4-C4- T1 (GRUPO DE LA HEULANDITA)		
Analcita	48		Sodalita	12		Brewsterita	16	
Leucita	48	1-3	Cancrinita	12		Heulandita	36	2.5- 5.0
Wairakita	48		Ofrerita	18		Stilbita	72	
A	48		Losod	24	2.5- 4.0	Stellerita	72	
Grupo C4-T1 (GRUPO DE LA NATROLITA)	192		Gmelinita	24		Barretita	72	
Edingtonita	10		Liotita	36		GRUPO C8 (GRUPO DE LA LAUMONTITA)		
Gonnardita	20		Chabazita	36		Laumontita	24	1-2
Thomsonita	40	1-2	Mazzita	36				
Natrolita	40		Erionita	36				
Scolecita	40		Aghanita	48				
Mesolita	120		Levynita	54				

TO₄: Número de tetraedros por celda unitari
Si/Al: relación Si/Al en el grupo estructural

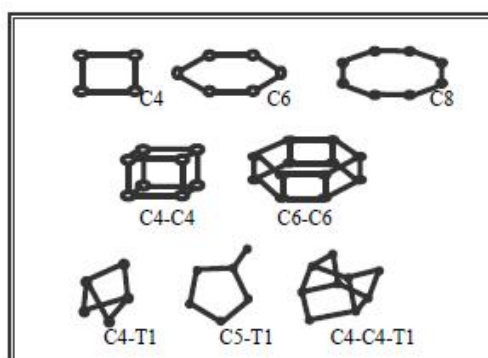


Figura 3. Unidades secundarias de construcción. Tomado de Meier, (1968).

2.2. ZEOLITAS NATURALES A NIVEL MUNDIAL

Según el U.S. Geological Survey, a nivel mundial, se ha reportado la ocurrencia de zeolitas naturales en Estados Unidos, Japón, Corea, Bulgaria, Checoslovaquia, Rumania, Hungría, Rusia, Yugoslavia, Sudáfrica, Italia, Alemania, Turquía y China, este último con la mayor producción mundial de material zeolítico, con alrededor de 1.5-2 Mt anuales. En Ibero América se reportan depósitos en España, México, Cuba, Chile y Ecuador. De los cuales Cuba sobresale con una producción de 37.500 toneladas anuales (Figura 4).



Figura 4. Distribución de yacimientos de zeolitas naturales de interés económico a nivel mundial. Modificada de: <http://www.educima.com/es>

Las zeolitas se encuentran en la naturaleza en rocas de varios tipos, edades y ambientes geológicos, principalmente en rocas sedimentarias y son particularmente abundantes en estratos vulcanoclásticos. Las especies y variedades de zeolitas varían en función de la textura y composición de la roca huésped, composición del agua intersticial, edad y temperatura. Se forman durante y después de la deposición y enterramiento, generalmente por la reacción

de los poros con agua y material aluminosilicatado. (Ej; el vidrio volcánico, feldespatos, sílice biogénico y minerales de arcilla).

Según Sand-Mumton (1973), los yacimientos de zeolitas en función del criterio geológico y genético se pueden clasificar en seis tipos. Un primer tipo serían los que se dan en lagos salinos alcalinos, que suelen ser de poco espesor (algunos centímetros a metros); se forman en regiones áridas y semiáridas con un pH cercano a 9.5 producto de la disolución de carbonato de sodio. El segundo tipo corresponde a los depósitos en suelos y superficies pantanosas salinas y alcalinas, que dan origen a cuatro tipos de zeolitas que son: pedogénicas en suelos salinos alcalinos de origen no volcánico; pedogénicas en suelos salinos alcalinos de origen volcánico; litogénicas en suelos de residuos volcánicos de materiales madres; litogénicas en suelos de adición eólica o deposición fluvial; y zeolitas en otros ambientes de suelos.

El tercer tipo de yacimiento se da en sedimentos del suelo oceánico, las zeolitas son particularmente abundantes en sedimentos volcanoclásticos, especialmente en ceniza vítrea y de este sedimento se forma, como mucho, un 80% de los depósitos de tefra alterada. Otro ambiente en que se dan las zeolitas y que constituyen el cuarto tipo son los sistemas hidrológicos abiertos, en estos, las secuencias de tefra muestran comúnmente mayor o menor zonación vertical de zeolitas y otros minerales autógenos que reflejan el cambio químico en aguas meteóricas moviéndose a través del sistema.

Minerales de arcilla, más comúnmente esmectitas, son formados por hidrólisis de ceniza volcánica en la parte superior del sistema, incrementándose el pH y disolviendo sólidos en el punto donde el vidrio se altera en zeolita. El espesor de acumulaciones no marinas de tefra silícea puede contener una zona más elevada, 200 a 500 m de espesor, conteniendo vidrio nuevo, montmorillonita y ópalo. La zona más baja alcanza como mucho 500 o más metros de espesor, es

generalmente caracterizada por zeolita silíceas como clinoptilolita. En la zona más baja se encuentra analcima con feldespatos y cuarzo. Un quinto tipo de yacimiento son las zeolitas hidrotermales, las cuales son difundidas en áreas de alteración hidrotermal y pueden exhibir un patrón de zonación. Esta zonación mineralógica representa primariamente una deshidratación progresiva con incremento de la temperatura. Un último tipo de yacimiento según Sand-Mumton, (1973), son las zeolitas metamórficas. Los yacimientos de este tipo se descubrieron en formaciones piroclásticas gruesas, localizadas en zonas de fuerte gradiente térmico (USA, Nueva Zelanda, Japón). Estas zeolitas son generalmente consideradas de mala calidad. La analcima, la clinoptilolita y la heulandita son comunes en las zonas superficiales, donde la laumontita y los feldespatos predominan en profundidad.

Según Bastidas Gaibor (2002), entre más de 40 zeolitas naturales conocidas, las más comunes son: clinoptilolita, mordenita, heulandita, heroinita, chabazita, phillipsita, y laumontita, las cuales se encuentran en cantidades y pureza razonablemente altas. Las zeolitas (clinoptilolita y fillipsita), son comúnmente precursoras de otras zeolitas (heulandita, analcima y laumontita). En el atlas de asociaciones minerales en lamina delgada (Melgarejo y Draper, 2003), se menciona un estudio sobre el mecanismo de crecimiento de analcima a partir de clinoptilolita en depósitos tipo Kuroko realizado por Abe y Aoiki en el año 1976.

2.3. ZEOLITAS NATURALES EN COLOMBIA

Se diría que en nuestro país existe un desconocimiento de distintos tipos de depósitos minerales, llegando en algunos casos, a cierta apatía en cuanto a la exploración de nuevos materiales que de a poco van adquiriendo gran interés a nivel mundial. Lo anterior puede ser una de las causas de los relativos pocos hallazgos encontrados en relación al gran potencial de yacimientos minerales que debemos tener, dada la riqueza natural de nuestro territorio Colombiano. Aunque

se sabe de su existencia, las zeolitas no han adquirido en nuestro país la importancia que en los últimos años le han dado a nivel mundial en diversos campos, por ejemplo; en la mitigación de problemas ambientales.

Entre varios estudios que reportan la presencia de zeolitas en nuestro país, Villabona (1994) menciona el hallazgo de zeolitas como mineral deutérico en conglomerados correspondientes a una diabasa verde oscura y de cristales bastante fracturados, que hacen parte de la Formación Confines (Hubach y Alvarado, 1934), al sur-oeste del municipio de Vijes, en el departamento del Valle del Cauca; sin embargo, este material zeolítico no llegó a despertar interés económico en cuanto a explotación. Otros reportes de zeolitas mencionados en el departamento del Cauca corresponden a basaltos y diabasas de edad Cretácica pertenecientes al Grupo Diabásico (Ingeominas, 1979). González (1996), reporta la existencia de zeolitas en varios cuerpos pertenecientes a las Vulcanitas Básicas (Kiv) en el departamento de Antioquia. Las Vulcanitas de Segovia (Kivs) contienen localmente pequeñas vesículas rellenas por zeolitas y sílice amorfa; los Metabasaltos de San Pablo (Kivsp) presentan amígdalas locales rellenas por clorita y zeolitas, algunas veces con núcleos de calcita; las Vulcanitas del Complejo Quebradagrande (Kivqg), aunque no reportan zeolitas como tal, si manifiestan la existencia de lavas, brechas y tobas básicas vítreas con amígdalas; el conjunto volcánico de la Formación Barroso (Ksvb), perteneciente al Grupo Cañasgordas, también reporta la presencia de zeolitas (laumontita?) en cavidades, al igual que el cuerpo volcánico de Uramita (Ksvu). En las rocas Ígneas volcánicas del flanco occidental de la Cordillera Occidental, en el departamento de Antioquía, los denominados basaltos olivínicos (Álvarez y González, 1978), Formación Santa Cecilia (Calle y Salinas, 1986) y andesitas de la Formación La Equis (Calle y Salinas, 1986), reportan la existencia de vesículas rellenas con zeolitas tanto en las tobas como en los flujos basálticos con los cuales están asociados (González, 1996).

En Colombia en muchas ocasiones se desperdicia material de interés económico o de investigación debido al desconocimiento total o parcial en la materia, como ocurre con potenciales yacimientos de oro usados como rebebo. Es posible que ocurra lo mismo con potenciales yacimientos de zeolitas por lo cual investigaciones, aun con muestras alóctonas, buscan despertar los intereses exploratorios y económicos en nuestro país.

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

3.1. REVISIÓN Y DISCUSIÓN DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Con el fin de lograr una conceptualización sobre el mundo de las zeolitas, sus propiedades y aplicaciones, se recurrió a las diferentes bases de datos, recursos electrónicos, imágenes digitales, mapas impresos, libros y revistas.

Con base en la información recolectada y su correspondiente análisis, se incorporaron los conceptos necesarios para el desarrollo óptimo del proyecto junto con la información de campo recolectada.

3.2. TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo para este proyecto fue realizado por el director del presente proyecto de grado, Geólogo PhD. Carlos Alberto Ríos Reyes, durante su permanencia en Inglaterra mientras cursaba sus estudios de doctorado. El trabajo se realizó en la Isla de Skye (Escocia) visitando varios afloramientos para conseguir documentación de campo y recolectar materiales geológicos.

3.3. PROCESAMIENTO DE DATOS DE CAMPO

Para procesar la información obtenida en campo, se procedió primero a la digitalización de los datos recolectados y a la elaboración de catálogos de fotos (muestra de mano, afloramientos y panorámicas), para posteriormente realizar una descripción geológica acertada de la zona de estudio. Igualmente se digitalizó un

esquema geológico de la Isla de Skye con la ubicación de las muestras recolectadas, a partir de mapas topográficos impresos a escala 1:50.000 y las coordenadas tomadas con GPS.

3.4. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

En esta etapa se elaboraron 9 de las 15 secciones delgadas de las muestras seleccionadas previamente para tal fin, las láminas se trabajaron en el laboratorio de preparación de muestras de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, bajo la supervisión del técnico Luis Eduardo Garrido Palencia. En la litoteca del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), se realizaron las 6 secciones delgadas restantes gracias a la gestión realizada por el profesor Oscar Castellanos. También se preparó el material necesario para los análisis de difracción de rayos X, tratando de extraer lo más pura posible la muestra de zeolita a analizar, el procedimiento de extracción y pulverización de la muestra se llevó a cabo en el laboratorio de difracción de rayos X de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

3.5. ANÁLISIS EN MICROSCOPIO DE LUZ TRANSMITIDA

Con el objetivo de identificar los minerales, asociaciones y paragénesis en las amígdalas y venas, se llevó a cabo el análisis de las 15 secciones delgadas con la toma de las respectivas fotografías. Para la descripción en sección delgada y registro fotográfico se utilizó un microscopio triocular Nikon, modelo Labophot2-POL, ubicado en el Laboratorio de microscopia de luz transmitida de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander.

3.6. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y TEXTURAL

Con base en los datos e imágenes tomadas en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la Escuela de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Wolverhampton (Inglaterra), se hizo un estudio de la morfología de las zeolitas para su integración con los datos de rayos X. Las fotografías se tomaron bajo un microscopio electrónico de barrido marca ZEISS EVO50. Simultáneamente las muestras pulverizadas de zeolitas, eran pasadas por un difractor de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB bajo las siguientes condiciones:

Voltaje 40 (kV)

Corriente 30 (mA)

Rendijas (Slits) DS 1.0°

RS 0.3 mm

SS 1.0°

Muestreo 0.02° (2 θ)

Rango de Medición 2-70° (2 θ)

Radiación CuK α 1

Monocromador Grafito

Detector Centelleo

Tipo de barrido a pasos

Tiempo de muestreo 0.7 segundos.

La información obtenida mediante los análisis de DRX, realizados con la colaboración del Grupo de Investigación en Química Estructural de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, permitió la Identificación de fases zeolíticas, llevada a cabo por la búsqueda en la base de datos de difracción de rayos X ICDD, con la ayuda de los archivos JCPDS para compuestos inorgánicos.

CAPITULO 4. GEOLOGÍA DE LA ISLA DE SKYE

4.1. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La Isla de Skye, con una extensión de 1.656 Km.², está ubicada al costado noroccidental de Escocia, limita al norte con The Minch, al oeste con Little Minch, al sur con el mar de las Hébrides y al este con Escocia (Figura 5). Skye, también llamada Isla Alada (An t-Eilean Sgitheanach en gaélico escocés), es la isla más grande y más septentrional de las Hébrides Interiores en Escocia. Esta isla tiene uno de los más dramáticos y desafiantes terrenos montañosos del país, incluyendo el Cuillin (una cordillera de montañas rocosas). La línea costera de Skye es una serie de penínsulas, incluyendo Sleat en el sur, Strathaird, Minginish, Duirinish y Waternish al este, y Trotternish al norte. Las islas que rodean Skye son: Roña, Raasay, Scalplay y Soay.

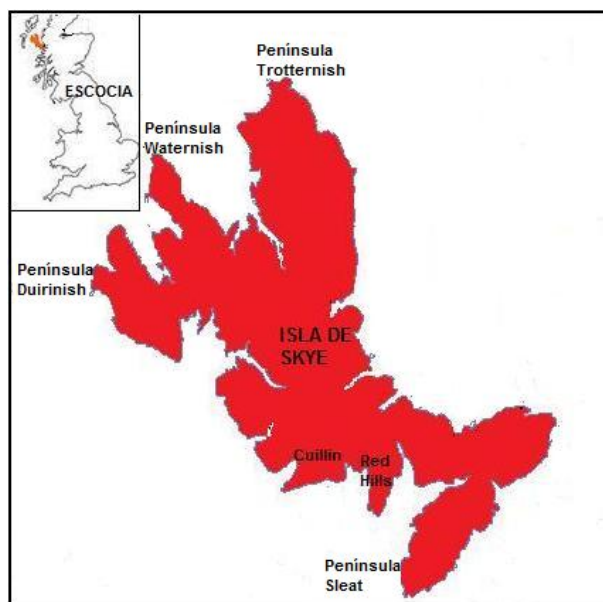


Figura 5. Ubicación Isla de Skye.

La Figura 6 ilustra la geología regional de la Isla de Skye, la cual revela un amplio rango de procesos geológicos y alrededor de 1000 millones de años de la historia de Escocia. La Península de Sleat contiene algunas de las rocas más antiguas en Europa y el Ridge Trotternish hacia el norte, presenta uno de los paisajes más espectaculares en Gran Bretaña.

Las rocas más antiguas en Skye, los neises Lewissianos, ocurren principalmente al sureste de la costa de Sleat, donde se forman pequeñas colinas rocosas bien redondeadas y producen suelos ácidos pobres. Estas rocas son suprayacidas por areniscas Cámbricas y calizas Ordovícicas. Entre 550 y 450 millones de años atrás, el área era parte de un océano poco profundo adornado por arena blanca de playa y cubierto con lodo carbonatado, estos eventualmente llegaron a ser areniscas Cámbricas y calizas Ordovícicas. Los sedimentos de edad Precámbrica y Paleozoica son suprayacidos inconformemente por rocas sedimentarias representativas de los tres períodos geológicos de la Era Mesozoica (Triásico, Jurásico y Cretáceo). Estas fueron depositadas en condiciones fluviales o marinas poco profundas hace entre 245 y 90 millones de años y contiene una variedad de fósiles incluyendo restos de dinosaurios y amonites espectaculares. La inconformidad se debe a que durante la formación de este cinturón montañoso, las rocas fueron fuertemente plegadas y sobrepuestas, por eso, ahora pueden estar de manera normal o invertidas dependiendo de donde se encuentren en los pliegues. A gran escala, enormes estratos de rocas de varios centenares de metros de espesor han sido movidos varios kilómetros hacia el noroeste, cayendo unos sobre otros con la más antigua en la parte más alta. El terreno afectado por los cabalgamientos movió completamente el noroeste de Escocia desde Lona en el sur hasta el Loch Eriboll en el norte, lo cual es conocido como "Moine Thrust Zone". (Stephenson and Merritt, 1993).

Los remanentes de antiguos sistemas volcánicos en Skye incluyen la más extensa plataforma de lavas basálticas en Gran Bretaña. Flujos de basalto olivínico alcalino

suprayacen inconformemente los sedimentos pre-Terciarios. Gabros intruyen tanto basaltos como sedimentos, mientras que granitos intruyen sedimentos, basaltos y gabra (Ferry et al., 1987). Moorbath y Bell (1965) reportaron edades Rb-Sr de 54 ± 3 millones de años para los granitos de Skye. La actividad volcánica en Skye comenzó hace aproximadamente 62 millones de años (Drury et al., 1976). Gabros, de edad intermedia entre aquellas correspondientes a basaltos y granitos, deben haber sido emplazados hace 54-62 millones de años (Ferry et al., 1987).

Gillen (2003) presenta un tratamiento comprensivo de la geología del fascinante escenario de Escocia, incluyendo la Isla de Skye, con un paisaje que ha sido estudiado por geólogos y geógrafos desde los comienzos de la geología como ciencia.

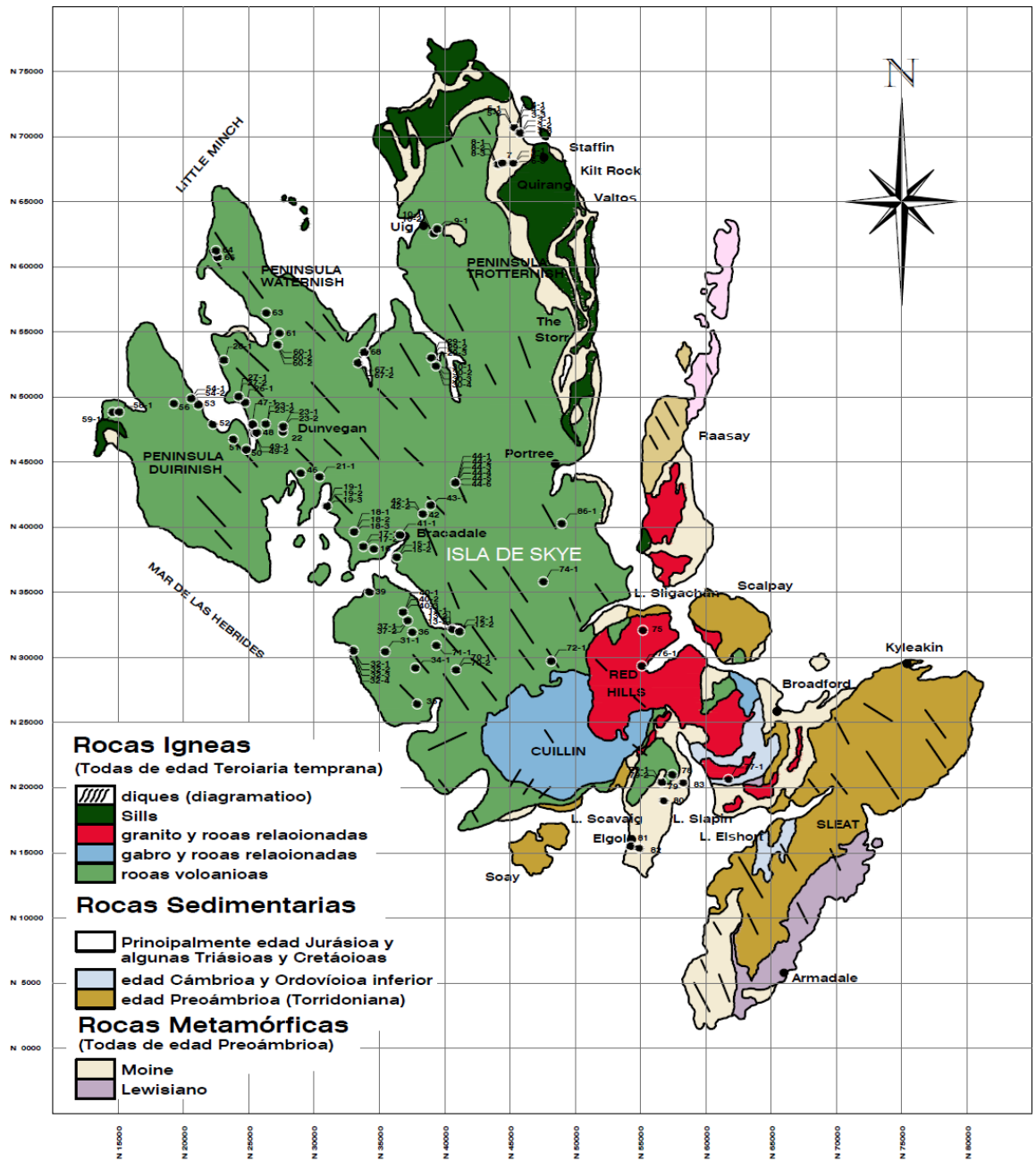


Figura 6. Mapa geológico simplificado de la Isla de Skye (adaptado y modificado Stephenson D. y Merrit, J. 2006), mostrando los sitios de muestreo (en puntos negros) de zeolitas naturales.

4.2. GEOMORFOLOGÍA

Skye es una bella isla con escarpes periglaciales, playas alejadas, grandes lagos marinos, picos de roca irregulares, colinas rocosas empinadas, grandes cumbres elevadas y una geomorfología variada. La erosión ha sido la principal fuerza en la formación del paisaje que tenemos hoy en día. En particular la erosión por hielo durante las eras de hielo, cuando las placas de hielo y los glaciares cubrieron la mayoría de Skye. Se resalta la presencia de la cordillera más accidentada y magnífica en Gran Bretaña, el imponente Cuillin. También hay colinas más suaves dispersas por la isla y en el norte, la larga cumbre de Trotternish, con una serie de asombrosos desprendimientos sobre su flanco oriental. La costa tiene espectaculares acantilados, quizá los más impresionantes en Gran Bretaña, con stacks marinos causados por meteorización, cuevas, arcos, caídas de agua y otros rasgos característicos, (Townsend C. 2001).

Más de una docena de grandes lagos de agua marina muerden hacia adentro de la isla, dándole a esta una línea de costa de más de 570 Km. de largo y una forma ampliamente conocida en la cual ningún lugar en Skye se encuentra a más de 8 Km. del mar. Grandes penínsulas se extienden en medio de los lagos marinos, de las cuales se resaltan desde el punto de vista geomorfológico Sleat, Duirinish, Waternish y Trotternish.

4.2.1. Península Duirinish

La parte más grande de la isla se compone de rocas volcánicas; con una gran capa de lava, principalmente basáltica, que cubre la mayoría del norte y el oeste de la isla. La erosión de esta placa de lava hizo que se formaran colinas con cumbres aplanadas tales como las mesetas de Macleod's en el interior de Duirinish las cuales pueden ser vistas claramente desde varios lugares de Skye. Esta geofoma consta de 2 mesetas, Healabhal Mhor (Meseta de MacLeod's

Norte) y Healabhal Bheag (Meseta de MacLeod's Sur) (Figura 7a), la cima de Healabhal Mhor es una amplia meseta ligeramente inclinada, sus laderas son fangosas, con pocas rocas, esta yace sobre el costado occidental de Duirinish. Con 469 m Healabhal Mhor es más pequeña que Healabhal Bheag (489 m), sin embargo "mhor" quiere decir grande y "bheag" pequeña. La razón es que Healabhal Mhor tiene la cima de la meseta mucho más extensa y esto la hace ver mas grande, (Townsend C. 2001)

Hacia el sur de Healabhal Beag, se encuentra la costa sur de Duirinish que es quizás la más espectacular e impresionante línea de costa de las Islas Británicas, con grandes acantilados, arcos naturales, cuevas, cataratas y los stacks marinos, de los cuales sobresalen los conocidos MacLeod's Maidens, y que son un grupo de tres stacks, el más cercano a la costa con 70 m de alto.

La gran curva de continuos acantilados sobre la Bahía de Moonen en la costa oeste de la Península Duirinish (Figura 7b), es una de las más espectaculares líneas de costa de Skye, entre los rasgos geomorfológicos más importantes de esta zona se encuentra The Hoe, la cual es una cúspide redondeada de 233 m de altura ubicada un poco más atrás de la orilla de los acantilados y con pendientes escabrosa y fangosas.

En dirección noroeste se encuentra la bahía Ramasaig, (Figuras 7c) que es el único punto de ese sector mediante el cual se puede llegar a la costa. Sin embargo, el escenario es dominado por el extenso césped verde que conforma el flanco sur del acantilado Ramasaig el cual presenta una excelente línea de acantilados que va hacia el sur desde el punto llamado Neist y penetra 240 m en la bahía Ramasaig. En la Figura 7e se observa hacia el norte, una continua línea de acantilados que se extiende bordeando la Bahía Moonen (Figura 7d) hasta la parte frontal de Waterstein Head (Figura 7e) (el cual es el segundo acantilado más alto de Skye con 296 m de altura, solo superado por Biod and Athair con 313 m,

no muy lejos hacia el norte cerca a Dunvegan Head). Desde este punto y haciendo una proyección hacia el exterior se observa el lugar más occidental de Skye donde se ubica el faro en el punto llamado Neist. (Figura 7f).

Entre los lagos más importantes sobre la costa de la Península Duirinish podemos mencionar Loch Polltiel, Loch Bharcasaig y el más importante, el Loch Dunvegan (Figura 7g), ubicado al costado noreste de la península; al interior sobresalen Loch Mór (figura 7h) y Loch Glen Lonadal entre otros.





Figura 7. Rasgos geomorfológicos de la Península Duirinish (a) A la izquierda se observa Healabhal Bheag y a la derecha Healabhal Mhor. (Cortesía Ríos, C.A.). (b) Bahía Moonen y los acantilados elevándose suavemente hacia The Hoe. Fuente: Collins Ramblers guide 40p. (c) Ramasaig Bay (Fuente: <http://www.geograph.org.uk>). (d) Moonen Bay. Esta vista superior de la bahía Moonen fue tomada desde Waterstein Head. (Fuente: <http://www.geograph.org.uk>). (e) Vista del acantilado de aproximadamente 800 m. al fondo se observan el Waterstein Head y el Neist Point. Fuente: <http://www.geograph.org.uk>) f) Hoe Rape Se observa el Hope Rape y la Bahía Moonen al fondo. El faro del Neist Point es apenas visible al fondo. (Fuente <http://www.geograph.org.uk>). (g) Loch Dunvegan y algunas de sus islas. (Cortesía Ríos, C.A.) (h) Loch Mhór. Cortesía Ríos, C.A.

4.2.2. Península Waternish

Waternish es otra de las principales penínsulas que conforman la zona norte de Skye, junto con la Península Duirinish rodean el Loch Dunvegan. (Figura 8a). Entre los rasgos geomorfológicos de la Península Waternish se destacan las Playas de Coral (Figura 8b), cuyas blancas arenas de las playas no son de hecho del coral hallado en los trópicos, sino de una alga marina llamada Lithothamnion que creció en sitios protegidos alrededor de la costa. Las arenas contienen pequeños pedazos de esta planta lavada por la corriente.

Al brillo de la luz solar las arenas son sorprendentemente blancas. Combinadas con el azul oscuro del mar estas pueden crear la ilusión de una costa de una isla tropical más que una línea de costa del Atlántico Norte.

Las playas arenosas no son comunes en Skye debido a que las fuentes de sedimento de arena son escasas, la plataforma de costa es muy abrupta y la energía de las olas es rápidamente disipada a lo largo de los grandes y profundos lagos que son un rasgo característico que identifica la línea de costa de Skye. La mayoría de las playas se originaron a partir de depósitos glaciales; por ejemplo, varios fragmentos de roca redondeados han sido transportados desde la masa continental hasta las playas de Sleat.

Las playas blanco cremosas conocidas localmente como arenas de coral están conformadas por el alga calcárea *Lithothamnion*, la cual tiene un notable parecido a una sección de coral la cual florece en bahías protegidas alrededor de la costa oeste.

Al este de las Playas de Coral está el Beinn Bhreac que está conformado por dos colinas de alturas similares de las cuales la mayor tiene 327 m y que supera a la norte por 13 m aproximadamente. Hacia el costado nororiental y mirando hacia Loch Bay se presentan pendientes más abruptas que las pendientes que se encuentran hacia el costado suroccidental. En general las laderas de las colinas están compuestas por muy poca vegetación y sus terrenos son áridos a excepción de la parte más baja del extremo nororiental la cual está cubierta por pequeños bosques de coníferas.

Entre los lagos más importantes que bordean la Península Waternish podemos mencionar Loch Bay, Loch Losait, Loch Dìuaig, Loch Greshornish y el Gran Loch Snizort en cuya esquina suroriental se desprende el largo y estrecho Loch Snizort

Beag con una longitud total de 10 Km. y separando las penínsulas de Waternish y Trotternish (Figura 8c).

Sobre el costado oriental de la península y bordeando el Loch Snizort se encuentra un extenso bosque dentro del cual y escondido por la vegetación, está la colina Beinn an Sgurr, que más que una colina es un extenso y rasgado escarpe (Figura 8e y 8f).

El llamado Punto Waternish se encuentra al final de esta península, en donde se puede decir que en general no hay altas montañas o enormes acantilados, solo un paisaje muy abierto de terrenos baldíos y océanos con vastos horizontes (Figura 8d).





Figura 4. Rasgos geomorfológicos en la Península Waternish. (a) Loch Dunvegan. Al fondo la Península Waternish. (Fuente: www.geograph.org.uk). (b) Coral Beach y Loch Dunvegan mirando hacia Healabhal Mhor (Fuente: http://www.gla.ac.uk/medicalgenetics/seakayaking_dunvegan.htm). (c) Loch Snizort y Beag (Fuente: <http://search.conduit.com/Results.aspx?q=Loch+bay+&SearchSourceOrigin=10&hl=es&SelfSearch=1&ctid=CT1854633&start=40>). (d) Waternish point. (Fuente: Townsend C. 2001). (e) El Qauring desde el sur. Vista que atraviesa Loch Snizort y Trotternish desde Beinn an Sgurr (Fuente: Townsend C. 2001). (f) Vista este que atraviesa los escarpes del Beinn an Sgurr. (Fuente: Townsend C. 2001).

4.2.3. Península Trotternish

En Trotternish las capas de basaltos están ladeadas hacia el este presionando las rocas infrayacentes. Los pináculos, torres y otras geoformas encontradas a lo largo del costado oriental de Trotternish son debido a deslizamientos causados por rocas sedimentarias más débiles que colapsaron bajo el peso de esta densa capa de basaltos. En algunas áreas aparecieron algunos grandes volcanes, la mayoría de los cuales han sido removidos por la erosión, dejando solo los vestigios en la forma de las Colinas Rojas y El Cuillin, la primera compuesta en su mayoría por gabro y la segunda de granito.

El Ridge de Trotternish es una magnífica elevación escarpada que recorre toda la Península Trotternish, con casi 24 Km. de longitud, este es claramente el ridge más largo de Skye. Una serie de acantilados, pináculos, torres y otras geoformas decoran las pendientes orientales, resultado de una serie deslizamientos.

En términos generales, el Ridge está cubierto de poca vegetación arbórea y predomina una corta hierba verde. Con 611 m Beinn Edra es una de las cimas más elevadas del norte de Skye y también el pico más alto de la parte central del Ridge; sin embargo más hacia el sureste se encuentra Hartaval, con 668 m como la segunda cima más alta sobre el ridge, solo superada por The Storr con 719 m.

The Storr es el pico más elevado del sur de Trotternish (Figura 9a y 9b), el cual puede verse extendiéndose en ondas de colinas escalonadas por kilómetros hacia el norte. Según el geólogo John L. Roberts en el libro “The Highland Geology Trail”, una completa secuencia de flujos de lava conforman este acantilado de los cuales son distinguibles cerca de 24. Desde la cima de este y sobre el flanco oriental se pueden apreciar los grandes deslizamientos que originaron el sitio conocido como El Santuario de Storr y en el cual a su vez se encuentran, entre otros pináculos The Old Man of Storr que es un impresionante obelisco de 50 m de altura, cortado alrededor de su abultada base que llega a alcanzar 12 m de diámetro (Figura 9g). Alrededor de Old Man se encuentra un área conocida como El Santuario (Figura 9i), así como también varios pináculos derrumbándose, también se encuentran grandes paredes, torres y torrecillas de roca, una colección extraordinaria de rocas desintegrándose. Cerca de Old Man está una de las más extrañas de esas fantásticas o misteriosas formaciones, una muy delgada cuña de roca, con dos grandes agujeros en la cual los bloques están caídos, conocida ya sea como La Catedral o como La Aguja. El extraño paisaje del Santuario es el resultado de enormes deslizamientos. Esto ocurrió debido a que la gruesa lava basáltica que formó los acantilados de The Storr y el resto de El Ridge de Trotternish, yacía sobre una débil capa de rocas sedimentarias. El peso de la lava

eventualmente causó que la roca infrayacente cediera originando el colapso de enormes secciones del costado de la colina. Los efectos de la meteorización y erosión entonces tallaron el escenario que tenemos ahora.

El Quiraing es un fantástico laberinto de torres y pináculos de roca, situada al norte, casi al final de la gran península de Trotternish, sobre la pendiente este de Meall na Suiramach (Figura 9c).

El Quiraing yace al costado de una colina con vista al mar y pareciera que las masas de rocas estuvieran encerrando pequeños espacios, uno de ellos es la estrecha y larga cuña de roca con crestas que parecen “dientes de sierra” y que se conoce como “The Prison”, (Figura 9d). La ladera sobre el costado del mar de The Prison está cubierta por hierba alta, el otro costado consta de acantilados verticales. Cuesta arriba desde The Prison está The Needle, una cúspide sobresaliente de 36 m y por detrás de la cual, caminando hacia el norte, se puede acceder al centro del Quiraing, un raro paisaje de formaciones de masas de roca. Justo en el centro del Quiraing está The Table (Figura 9e), una imponente colina de cúspide llana y cubierta de césped.

Detrás del Quiraing se elevan los escarpados acantilados del Meall na Suiramach (Figura 9g). El colapso de este lado de la colina en una serie de deslizamientos creó el Quiraing de la misma forma que The Storr y otros lugares sobre el Ridge Trotternish, al ceder las rocas sedimentarias infrayacidas por una gruesa capa de basaltos provocando deslizamientos colina abajo, así como también aplastamientos y plegamientos. Posteriormente las fuerzas de la erosión, el agua y el hielo, modelaron el paisaje.

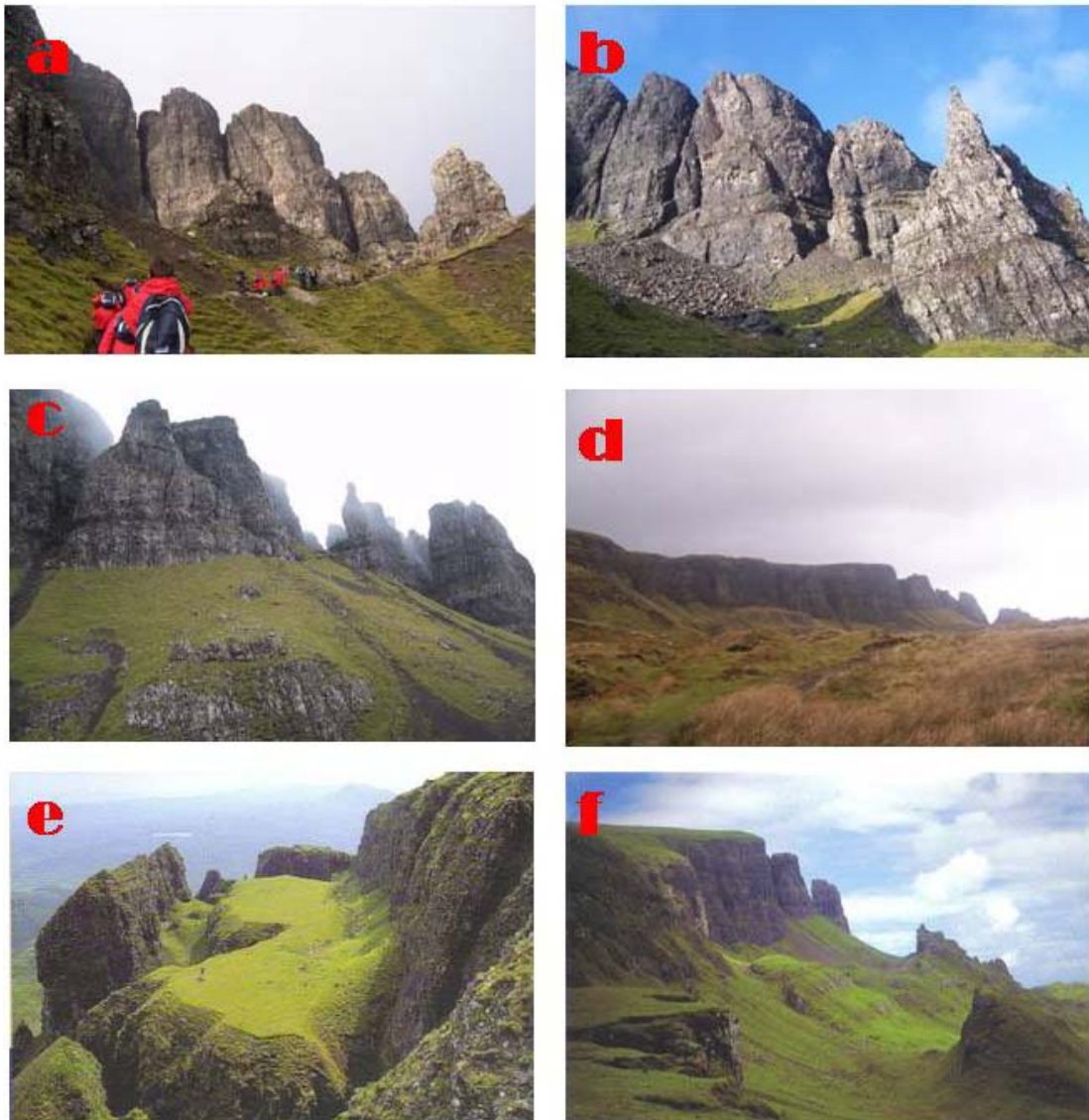


Figura 9. Rasgos geomorfológicos en la Península Trotternish. (a) The Old man of Storr (Cortesía Ríos, C.A.). (b) The Old man of Storr (Cortesía Ríos, C.A.) (c) El Quiraing. (Fuente: www.geograph.org.uk). (d) The Prison (Cortesía Ríos, C.A.). (e) Deslizamientos en el Quiraing. En el centro “The Table”. (Fuente: Townsend C. 2001). (f) El Quiraing y Meall na Suirnach desde el sur. (Fuente: Townsend C. 2001).

4.2.4. Península de Sleat

Esta península presenta como principal rasgo geomorfológico “The Moine Thrust Zone” está ubicada al sur oeste de Loch Eriboll y mide 250 Km. de longitud y 10 Km. de ancho (según el Dr. Maarten Krabbendam del British Geological Survey esta zona es el mejor y verdaderamente accesible ejemplo de la tectónica en el mundo).

Tomado de <http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract;jsessionid=0B8C91A07B4A75376616E2E2A679A379.tomcat1?fromPage=online&aid=1200152>

El hielo y la escarcha de la era de Hielo, entre 26000 y 13000 años atrás, tuvieron sus repercusiones en la formación de este paisaje espectacular (Corries, aretes y el magnífico valle glaciar y la cuenca en la que se sienta el Coruisk).

El descubrimiento de The Moine Thrust Zone en 1907 fue un hito en la historia de la geología, ya que fue uno de los primeros cinturones orogénicos descubiertos; su formación ha sido re-interpretada muchas veces. The Moine Thrust Zone corrobora la tectónica de placas en esa zona durante la orogenia Caledoniana del período Silúrico, en la cual Escocia fue comprimida por la placa europea hacia el oeste, en una zona de falla en los antiguos neises Lewisianos sobre la placa de Groenlandia. A menudo, las cumbres permiten ver las capas de rocas sedimentarias más suaves sobre las pendientes más bajas, Ben More Assynt en el centro del cinturón, es un típico ejemplo en el cual se levantan desde lodos y areniscas hasta cuarcitas en las partes más altas (Figura 10a). Ben More Assynt es una montaña en el extremo NW de Escocia y con 998 m de altura es el punto más elevado en el condado de Sutherland, en su parte más alta se observan los bloques de cuarcita con su color vivo y apariencia característica. Se encuentra conectada a las cercanías del pico Conival (Figura 10b) al oeste, por una cresta cuyo punto más bajo es de 880 m. Ben More Assynt también tiene una cumbre secundaria que hace parte de las Mesas de Munro, también llamada simplemente

la Cima Sur, situada un kilómetro al sur de las cumbres, con una altura de 960 m. La cresta que conduce a la cima sur está compuesta por neises Lewisianos y es el ejemplo a mayor altura que se puede encontrar de este tipo de roca en toda Escocia.



Figura 10. Rasgos geomorfológicos en la Península Sleat. (a) Ben More Assynt. (b) Conival. (Fuente: www.armin.grewe.com)

4.2.5. El Cuillin

El Cuillin en particular muestra los efectos de la glaciación con suaves marcas dejadas sobre los planos de descongelamiento, valles colgantes, montículos

atravesados, filones y otras geoformas. (Figura 11a, 11b y 11c). Ocupando el espacio que comprende la zona este por una línea dibujada desde Broadford hasta la mitad del lado este del Loch Slapin, y sobre el W desde la punta del Loch Sligachan a la punta de Loch Brittle, está la más salvaje y montañosa parte de la isla, ocupada por las colinas que en su conjunto conforman El Cuillin. De las cumbres principales, la más baja tiene una altura aproximada de 701 m y la más alta está sobre los 914 m.

El grupo se compone de particulares porciones totalmente diferentes, tanto en tipos de rocas como en apariencia externa. Al noreste entre Broadford y Loch Sligachan están las Red Hills (Figura 11e), las cuales presentan estructura sienítica y forma piramidal, son cuerpos de roca con grandes tamaños que han sido bastante afectados por el clima y la descomposición, sus pendientes están formadas por masas brillantes de detritos de color rojo (por ello su nombre), resaltado por franjas de césped verde brillante. Estos colores se pueden ver más claramente cuando el sol está descendiendo algunos metros al oeste y la tarde está clara.

Las principales cumbres son Beinn Dearg Mhor (708 m) y Beinn na Caillich (733 m) entre el extremo de Loch Slapin y Broadford; Glas Bheinn Mhor (564 m), sur del Loch Ainort; Beinn Dearg Mheadhonach (638 m), Beinn Glamaig (773 m) (Figura 11f), sur de Loch Sligachan y Marsco (736 m). El color rojo no predomina en toda la zona, pero si ocupa la mayoría del terreno, y es el más destacado por su brillo en la zonas altas.

La otra porción de El Cuillin está conformada por hiperstena en rocas de edad Laurentiana, y reconocidas por su color oscuro. La oscuridad de la gran masa de roca agrega exageración al aspecto de grandeza ya adquirido debido al accidentado y delineado aspecto de las montañas que lo forman. Su exterior

también es fácilmente reconocible debido al contraste que presenta al compararlo con las Red Hills, tanto por sus peculiares accidentes como por su forma cerrada.

Garbh-bheinn forma parte de una de las zonas más aisladas de El Cuillin, un pequeño grupo de picos de gabra apartados de El Cuillin principal por Srath na Creitheach; Bla Bheinn es el más alto de este grupo (Figura 11d). Al igual que El Cuillin principal, estos son picos de roca impresionantes con elevaciones estrechas, enormes acantilados, pináculos de roca y otras geformas características.





Figura 11. Rasgos geomorfológicos en El Cuillin. (a) Panorámica de El Cuillin desde las Red Hills. (Fuente: <http://www.forospiedrasobrepiedra.com/smf/index.php?topic=7092.0>) (b) Valles en u en El Cuillin, característicos de ambientes periglaciales. (Cortesía Ríos, C.A.) (c) En esta imagen se puede ver claramente la forma de herradura característica de El Cuiillin (Cortesía Ríos, C.A.). (d) Garbh- bheinn (izquierda) y Bla Bheinn (derecha) desde Marsco (Fuente: Townsend C. 2001). (e) Valle que divide las Red Hills y El Cuillin (Fuente: <http://www.forospiedrasobrepiedra.com/smf/index.php?topic=7092.0>). (f) Red Hills Mheadhonach (Fuente: <http://www.forospiedrasobrepiedra.com/smf/index.php?topic=7092.0>).

A pesar de sus contrastes, El Cuillin y las Red Hills representan las raíces profundamente erosionadas de los grandes volcanes. Las áreas montañosas que vemos ahora son los restos solidificados de las cámaras magmáticas que alimentaron los volcanes. Debido a que ellas se enfriaron lentamente en las profundidades de la tierra, ahora consisten de una amplia variedad de espectaculares rocas de grano grueso. Hay dos grupos de Red Hills: las del este, entre Loch Ainort y Broadford, las cuales incluyen Beinn na Cailich y las del oeste las cuales incluyen Glenn Sligachan. El granito de estas colinas está más uniformemente desgastado por el viento y el agua, de modo que las colinas tienen

suaves contornos con escasas o pocas caras rocosas abruptas. La razón del nombre radica en el color rosa pálido de los granitos que lo conforman, un gran contraste con las rocas oscuras de El Cuillin. Varios fragmentos de roca caídos cubren el costado de varias de las Red Hills, pero allí existen pocos acantilados o grandes rocas y las cúspides son redondeadas y frecuentemente cubiertas de hierba. La actividad volcánica que dio origen a las Red Hills es posterior a la que originó El Cuillin y allí hubo muy pocas intrusiones de otras rocas, esto permitió aun más la meteorización de las colinas, originando pendientes y cúspides suaves y redondeadas.

Algunos de los más espectaculares escenarios de Escocia son el resultado de una glaciación final que ocurrió entre 12500 a 11500 años atrás. Las geoformas y sedimentos generados por esta, son excepcionalmente recientes y preservados. Morrenas terminales en la boca de Coir'a Ghrunnda y otros pequeños glaciares circulares sobre las laderas, muestran que allí hubo una sustancial capa de hielo en El Cuillin, con glaciares más pequeños en los Kylleakin Hills y sobre el costado oriental de El Ridge de Trotternish.

Muros empinados cortados por el hielo y crestas puntiagudas con forma de agujas que fueron formadas entre los pequeños glaciares circundantes, ahora proporcionan retos extremos para escaladores. Los glaciares llegaron hasta el mar en los lagos Scavaig, Slapin, Sligachan y Ainort dejando atrás morrenas pequeñas de colinas circulares irregulares (hummocky moraines) bastante dispersadas al retroceder el glaciar.

4.3. SECUENCIA VOLCÁNICA CON PRESENCIA DE ZEOLITAS NATURALES

Los restos de los complejos volcánicos de Skye, los cuales incluyen lavas e intrusiones ígneas, datan desde un período de intensa actividad volcánica a lo

largo de la margen occidental de Escocia. Esto representa el momento en el que el noroeste de Europa se separó de Norteamérica, con la formación del Atlántico Norte.

La Isla de Skye es reconocida por la espectacularidad y variedad de sus escenarios, destacándose tres regiones con geformas características, una de ellas son los flujos de lava semiáridos en el norte y noroeste y sills intruyendo rocas sedimentarias del Jurásico a lo largo de los acantilados de Trotternish; otra región corresponde a las rocas ígneas intrusivas del centro de Skye (Cuillin y Red Hills) y finalmente la tenue topografía dominante en la península de Sleat en el sureste.

Las penínsulas del norte y oeste (Duirinish, Waternish y Trotternish), y aún la mayoría del centro de Skye, están compuestas de basaltos, las rocas volcánicas más jóvenes del Terciario, eructadas hace 58 m.a. (Gillen, 2003).

La actividad volcánica comenzó con una fase explosiva, cuando bombas de ceniza y lava basáltica hicieron erupción sobre una superficie de rocas sedimentarias Jurásicas erosionadas. Estas lavas estarían sometidas posteriormente a diferentes procesos de alteración, originando principalmente carbonatos y silicatos, especialmente la familia de las zeolitas. Después de la fase explosiva inicial, la pila de lava principal estuvo en calma. Las grietas en la superficie terrestre que alimentan estas erupciones volcánicas siguieron actuando como vías de magma fundido mucho después de que la superficie de la actividad volcánica había cesado. El magma se endureció en estas fisuras como diques.

Las rocas sedimentarias entre los flujos de lava indican que allí hubo periodos en donde la erosión y la depositación tuvieron lugar durante intervalos de inactividad entre erupciones, permitiendo que el suelo se formara y las plantas colonizaran el área.

El norte de Skye expone el mejor paisaje antiguo en Gran Bretaña, las rocas de El Storr, en la Península de Trotternish al norte de Portree. Las lavas basálticas, que ahora forman un escarpe, hicieron erupción sobre shales Jurásicos y rocas arcillosas, las cuales son mucho más susceptibles a meteorización que los basaltos. Las fracturas en el basalto permitieron que los bloques se desprendieran del cuerpo principal de lava y resbalaran y rotaran sobre las suaves rocas sedimentarias que estaban por debajo, deslizándose eventualmente colina abajo para formar El Quirang, Old Man of Storr, The Neddle y muchos otros rasgos del paisaje bastante particulares.

Sin ninguna duda la característica más espectacular de Skye es El Cuillin, con unas colinas de 12 km de longitud en forma de herradura, con 30 o más picos de alturas de alrededor de 1000 m, con elevaciones puntiagudas y profundos cráteres circulares rocosos sobre las laderas de las colinas (Guillen, 2003). El Cuillin se compone de una serie de intrusiones ígneas curvadas - gabro (básicas) y peridotitas (ultrabásicas) - que forman la base de un centro volcánico erodado. La intrusión del complejo central tuvo lugar después de la erupción de lavas basálticas en la superficie. Debido a la marcada y rápida erosión durante la edad Terciaria, la base volcánica fue levantada y expuesta en la superficie. Varios diques de dirección noroeste-sureste cortan el gabro y su meteorización ha dado lugar a las elevaciones con una apariencia rugosa característica.

Las rocas alojadas en Skye forman una serie exterior y una interior, con un espesor total que excede los 6000 m; el gabro es claramente visible en Druim Hain y la peridotita en An Garbh-choire. La principal elevación de El Cuillin es un arco que une a Sgurr nan Gillean y Gars-bhein, y una elevación oriental que une Bla Bhein y Garbh-bheinn. Hacia el norte y el este de las rocas básicas y ultrabásica de El Cuillin yacen las Red Hills. Estas intrusiones graníticas son más jóvenes que el Cuillin y atraviesan bruscamente el borde este de la herradura Cuillin. Las Red Hills se destacan por tener una forma muy diferente de El Cuillin o Black Cuillin.

El Cuillin y las Red Hills son los restos de chimeneas volcánicas, las cuales contienen materiales traídos de niveles más profundos, así como los productos de la erupción, tales como lava y ceniza, que han colapsado la chimenea. Buenos ejemplos de este fenómeno puede observarse en el área de Kilchrist - Kilbride entre Broadford y Torrin.

La importancia de Portree reside en la excelente exposición a través del Grupo Beinn Edra, que forma la base de la serie de lavas principal de Skye (Emeleus and Gyopari, 1992). Al menos 24 flujos están expuestos (Anderson y Dunham, 1966); las interrelaciones muestran que estas se acumularon subaereamente y fueron sujetas a una profunda meteorización en condiciones húmedas, tropicales cálidas o subtropicales (Emeleus y Gyopari, 1992). El sitio es particularmente conocido por la abundancia y variedad de minerales del grupo de las zeolitas dentro de lavas, que proporcionan pruebas concluyentes de la actividad hidrotermal después de la solidificación. Un estudio de las lavas del Grupo Beinn Edra realizado por King (1977) ha mostrado que gran parte del grupo contiene paragénesis de zeolitas similares a la zona analcima-natrolita definida por Walker (1960). Según Emeleus and Gyopari (1992), en los basaltos olivínicos alcalinos de la parte superior de la secuencia en El Storr, no hay ocurrencia de analcima, y en lugar de esta, se presentan paragénesis de mesolite y thomsonita-chabazita; sin embargo, la reaparición de la analcima en la hawaiiita que corona el acantilado añade un soporte a la propuesta de Walker en relación a que la química de la roca huésped desempeña un papel importante en determinar los tipos de zeolitas y minerales asociados formados por la circulación de fluidos.

Parte del Complejo Granítico del este de las Red Hills incluye sills que fueron incluidos a lo largo de planos de estratificación en rocas sedimentarias jurásicas. Aquellas son intrusiones compuestas, formadas por dos partes diferentes. El basalto fue inyectado primero, seguido inmediatamente por felsita, la cual forma la parte media de un sándwich ígneo. El basalto (básico) y la felsita (ácida), se

mezclaron al tiempo para formar un tipo de roca intermedia. El Rubh an Eireannaich es el mejor ejemplo conocido de un sill compuesto. Un rasgo característico en Skye, el cual es común a todas las provincias ígneas Terciarias, es la presencia de grandes grupos de diques. Algunos diques verticales noroccidentales y surorientales están asociados con el centro de El Cuillin, la meteorización de los diques ha contribuido a la apariencia aserrada de este. El lado oriental de la Península de Trotternish está caracterizado por una serie de sills de dolerita intruídos en rocas sedimentarias jurásicas, el más conocido corresponde al Kilt Rock.

Estudios geofísicos del Complejo Central han mostrado que este puede ser modelado como un cilindro casi vertical, de 20 Km. de diámetro, gabro muy denso y peridotita, rico en silicatos de hierro magnesio y que se extiende por debajo de la corteza terrestre por casi 15 Km. y probablemente hasta el manto superior. Los granitos por el contrario son cuerpos relativamente menores, cerca de 2 Km. de espesor y cercanos a la superficie. Las rocas básicas y ultrabásicas se formaron a partir de magmas de temperaturas muy altas (1300°C), y es posible que el cuerpo granítico se originara por fusión parcial de las rocas Lewisianas y Torridonianas que existían en la corteza en el lugar de la intrusión. En un sentido muy amplio, el neis Lewisiano y las areniscas Torridonianas, tienen en general composición parecida a este granito. Durante la actividad volcánica, Skye y los otros centros ígneos en las Islas Hébrides fueron afectados por fluidos calientes circulando entre las lavas, el Complejo Central y la población de rocas circundantes entre las cuales el complejo fue intruído.

4.4 OCURRENCIA DE CAMPO DE ZEOLITAS NATURALES

Los diferentes afloramientos que contienen las zeolitas de la Isla de Skye en su mayoría corresponden a basaltos que se diferencian en el color, grado de

meteorización y compactación, contenido de venas y la forma en que se desarrollan y agrupan las antiguas burbujas de gas ahora rellenas con minerales. Los basaltos espilíticos, que serían los más comunes, se presentan de color gris oscuro con zeolitas desarrollándose en venas y cavidades de forma irregular dispuestas al azar, algunas veces presentan una superficie de meteorización marrón rojiza y es posible observar agregados sacaroidales (Figuras 12a y 12b); el grado de meteorización de estos basaltos espilíticos color gris oscuro es bajo y eventualmente las cavidades con zeolitas llegan a concentrarse de tal modo que se desarrolla un bandeamiento (Figura 12c). Una ocurrencia de zeolitas se encuentra en una cantera de basaltos de color negro, allí las zeolitas se desarrollan aisladamente destacándose amígdalas de formas alargadas con tamaños considerables de hasta 10 cm. (Figura 12d). Algunos contactos entre basaltos espilíticos marcan un contraste en el grado de meteorización, el color y el desarrollo de bandeamientos, siendo los de color marrón rojizo con mayor grado de meteorización y distribución vesicular al azar, los que aparentemente contienen una menor cantidad de amígdalas zeolíticas (Figura 12e). Otras veces afloran basaltos masivos de color verde en contacto con basaltos espilíticos altamente meteorizados de color gris a rojo con presencia de meteorización esferoidal, uno de estos contactos en particular muestra un sill de dolerita a lo largo del plano de contacto. Algunos diques que aparecen cortando basaltos espilíticos y otros de menor tamaño son fácilmente visibles. Igualmente se destacan unos basaltos espilíticos de color gris oscuro con zeolitas desarrollándose en cavidades de forma irregular en contacto con un suelo de laterita de color rojo, el cual está superpuesto por basaltos altamente vesiculares sin zeolitas y que presentan una superficie de meteorización marrón clara (Figura 12f).

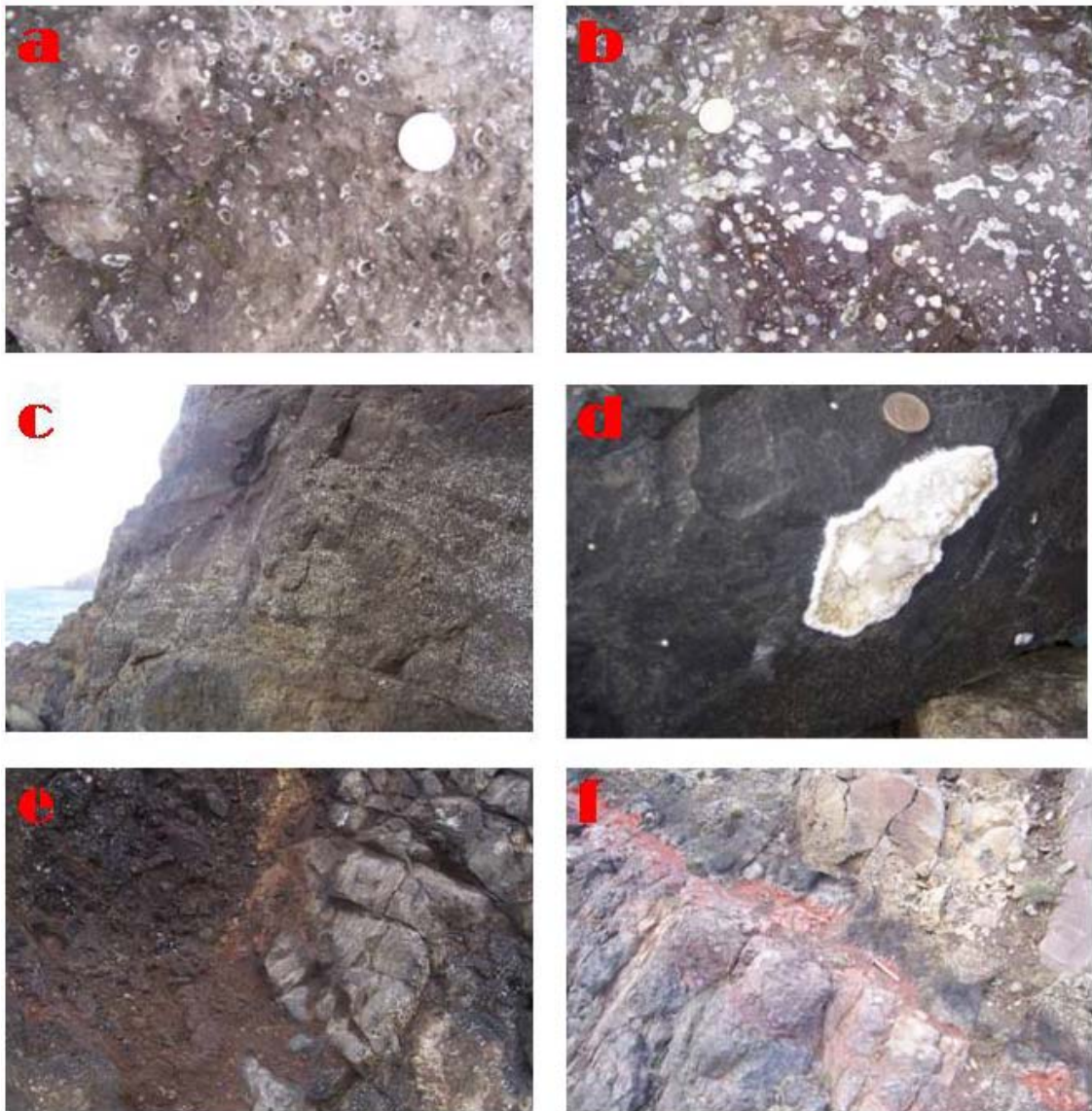


Figura 12. Rasgos a escala de afloramiento ilustrando la ocurrencia de zeolitas en amígdalas. Fotos Cortesía Ríos, C.A. (a) Basaltos con superficie de meteorización marrón rojiza y zeolitas como agregados sacaroidales. (b) Basaltos grises con zeolitas como agregados sacaroidales. (c) Concentración de zeolitas desarrollando bandeamiento (d) Zeolitas aisladas en basaltos negros pertenecientes a una cantera. (e) Contacto de basalto muy meteorizado con basalto con zeolitas desarrollando bandeamientos. (f) Zeolitas desarrollándose en basaltos grises en contacto con un suelo de laterita de color rojo.

4.4.1 Zeolitas en amígdalas

A nivel de afloramiento es posible distinguir algunas formas de agregados cristalinos de zeolita, sobresalen las amígdalas irregulares, las de hábito masivo, otras de distribución radial hacia el centro y un tipo particular en forma de geoda o de drusa en superficie.

Las zeolitas que se presentan como agregados masivos y con tamaños que varían de 0.5 mm. a 1.5 cm. se caracterizan por su relleno no uniforme, algunas veces apenas recubriendo la cavidad y otras veces rellenándola completamente (Figura 13a); sus formas son irregulares, alargadas u ovaladas y sus bordes predominantemente redondeados a subredondeados (Figura 13b). Las amígdalas que presentan un relleno parcial pueden manifestar varios tipos de material zeolítico, uno de hábito granular y brillo adamantino al centro de la cavidad y otro granular masivo de brillo vítreo que recubre las paredes de la cavidad (Figura 13c). También se da el caso en que amígdalas de formas completamente irregulares a semiesféricas desarrollen al interior de la cavidad cierta cantidad de cristales con caras bien definidas (Figuras 13d, 13e y 13f). Una combinación de amígdalas irregulares y alargadas con tamaños que varían desde 1 mm. hasta 1 cm. y de hábito masivo contrasta con vesículas que no presentan ningún tipo de relleno (Figura 13g), otras veces el contraste se da entre amígdalas de hábito masivo granular y brillo adamantino con vesículas completamente vacías, alargadas, irregulares y angulares de tamaños variados que en algunos casos llegan a medir hasta 2.5 cm. (Figura 13h).

Una ocurrencia frecuente son los agregados radiales de brillo vítreo en amígdalas que varían en formas y tamaños, algunas son semiesféricas de hasta 5 mm de diámetro y otras irregulares con tamaños de hasta 1.2 cm. (Figura 13i).

Las zeolitas de Skye también se presentan en agregados fibrosos, relleno de amígdalas de manera parcial o total. En amígdalas totalmente rellenas, con formas que van desde irregulares hasta semiovaladas y con tamaños de hasta 2 cm., se manifiesta la presencia de por lo menos dos zonaciones, una fibrosa que recubre la cavidad exteriormente y que se muestra más dura que la interior, igualmente fibrosa, fácilmente deformable y de brillo sedoso. (Figura 13j). Por otra parte las amígdalas pueden presentar una capa bien definida de material fibroso que solo se presenta hacia el exterior de la cavidad, ya sea de forma esférica, alargada o irregular (Figura 13k). Zonaciones de tipo fibroso con brillo sedoso hacia el exterior de la cavidad y un relleno granular con brillo vítreo en el interior de la misma se puede apreciar en otras amígdalas (Figura 13l).



Figura 13. Rasgos a escala macroscópica de especímenes de mano ilustrando la ocurrencia de varios tipos de zeolitas en amígdalas. (a) Zeolitas relleno parcial y totalmente las cavidades presentes en los basaltos. (b) Diferentes formas de amígdalas con contenidos de zeolitas. (c) Zeolitas de hábito granular y brillo adamantino al centro de la cavidad y otras granulares masivas de brillo vítreo que recubren las paredes de las cavidades. (d) Zeolitas granulares de brillo adamantino relleno cavidades con formas irregulares. (e) Zeolitas granular relleno amígdalas irregulares alargadas. (f) Posible analcima relleno amígdalas con formas redondeadas.

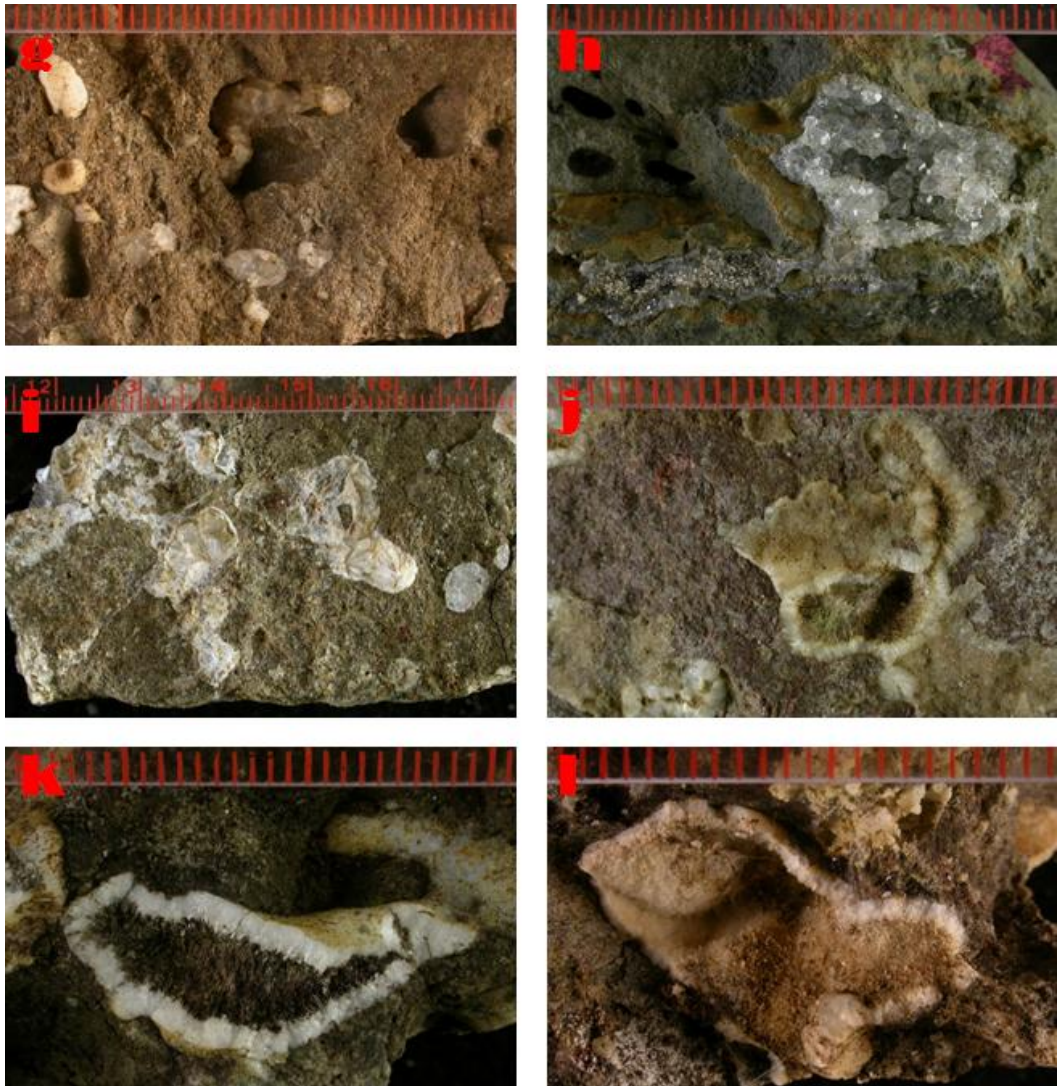


Figura 13. Continuación. Rasgos a escala macroscópica de especímenes de mano ilustrando la ocurrencia de varios tipos de zeolitas en amígdalas (g) Amígdalas irregulares rellenas con zeolita y vesículas sin relleno en la misma muestra (h) contraste entre amígdalas de hábito masivo granular y brillo adamantino con vesículas completamente vacías (i) agregados radiales de brillo vítreo en amígdalas subredondeadas e irregulares (j) Zeolitas fibrosas en amígdalas de formas irregulares y semiovaladas (k) Amígdalas con material fibroso que solo se presenta hacia el exterior de la cavidad (l) Zonación en amígdalas con presencia de zeolita fibrosa al exterior de la cavidad y granular al interior de esta.

4.4.2 Zeolitas en venas

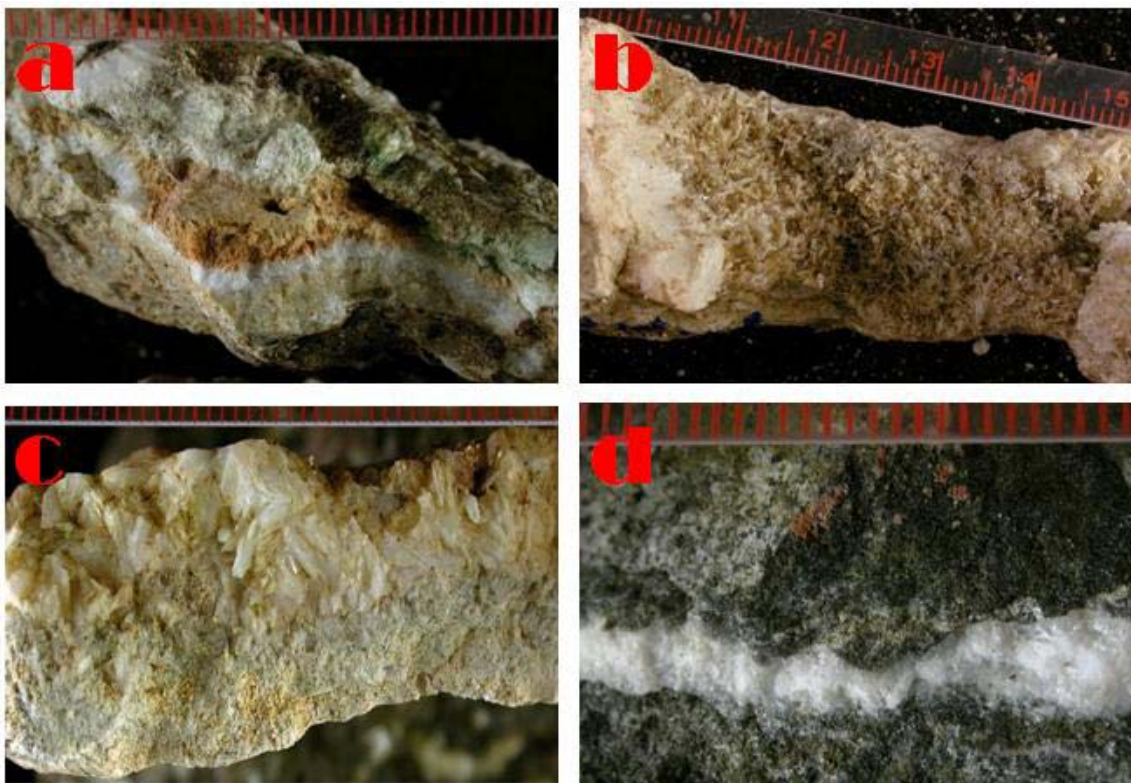
Las venas que contienen material zeolítico regularmente están acompañando las amígdalas, estas venas en algunos basaltos espilíticos aparecen paralelas a la superficie del flujo de lava o atravesándolo en varias direcciones (Figura 14a), así mismo pueden estar dispuestas de forma paralela con espesores de hasta 3 cm. (Figura 14b). Cuando las venas aparecen en grandes cantidades tenemos lo que se conoce como stock works, que son masas de roca muy interpenetradas por pequeñas venas, estos stock works (Figura 14c) en algunos sectores presentan un aspecto brechoide (Figuras 14d y 14e). Puede ser que las venas no sean de espesor uniforme y se muestren acuñaándose, en otras ocasiones se muestran de espesores considerables y rellenas casi en su totalidad con material zeolítico (Figura 14f). Las venas descritas anteriormente suelen presentarse en basaltos con meteorización esferoidal, algunas veces producida por el fracturamiento de la cámara magmática (Figura 14a)



Figura 14. Rasgos a escala de afloramientos ilustrando la ocurrencia de zeolitas en venas.

La presencia de zeolitas en las venas que atraviesan los basaltos terciarios es alta, con un predominio de agregados fibrosos y aciculares intercrecidos con otros agregados radiales, predominan los colores blancos con brillo sedoso. En algunos casos es difícil identificar el tipo de agregado debido a la diversidad de minerales

de formas y tamaños variados (Figuras 15a). En ciertas venas se distinguen agregados reticulados intercrecidos con agregados tabulares (Figura 15 b), en otras únicamente agregados tabulares radiados de colores blanco amarillento (Figura 15 c). También observamos fibras muy pequeñas y sin una clara disposición en las paredes de las venas, sin embargo; llama la atención su color totalmente blanco y una posible zonación de cristales de lo que podría ser analcima magnesiana hacia el centro de la vena (Figura 15d). En la Figura 15e se observan agregados radiales de color ocre hacia el centro y blanco hacia los extremos, probablemente corresponde a thompsonita. Igualmente observamos el mismo tipo de agregado radial, pero esta vez con el color blanco hacia el centro (Figura 15f).



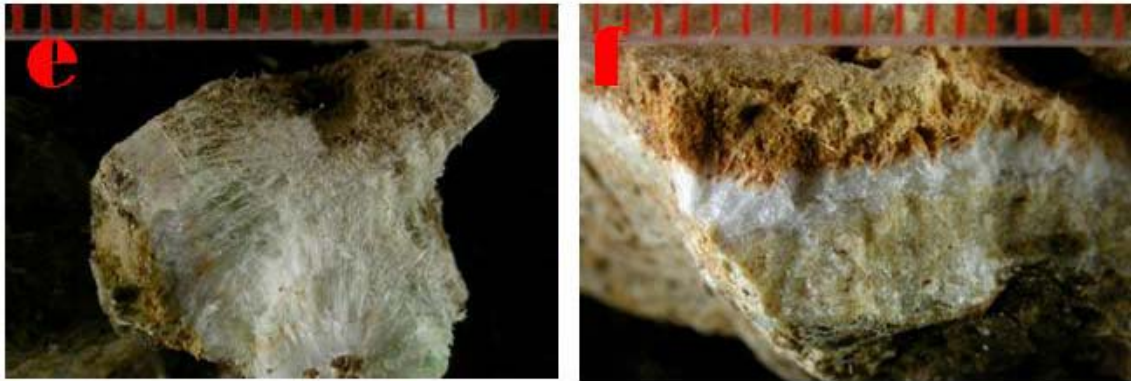


Figura 15. Rasgos a escala macroscópica de especímenes de mano ilustrando la ocurrencia de varios tipos de zeolitas en venas. (a) Zeolita fibrosa haciendo contacto con material color ocre. (b) Agregados reticulados intercrecidos. (c) Agregados tabulares radiados de colores blanco amarillento. (d) Zeolitización de color blanco hacia el centro. Posible analcima magnesiana. (e) Agregados radiales de color ocre hacia el centro y blanco hacia los extremos. (f) Agregados radiales de color blanco hacia el centro y ocre hacia los extremos.

CAPITULO 5. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y TEXTURAL

La caracterización mineralógica y textural se llevó a cabo mediante el análisis de secciones delgadas con el fin de determinar ópticamente bajo el microscopio de luz transmitida las fases zeolíticas, adicionalmente se realizaron análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB), con la intención de observar la morfología cristalina y se efectuaron análisis de difracción de rayos X (DRX) para establecer las fases zeolíticas presentes tanto en amígdalas como en venas.

5.1 MICROSCOPIA DE LUZ TRANSMITIDA

Algunas amígdalas presentan zonalidad, en unos casos con variedades granulares de zeolitas en los bordes y diversos agregados fibrosos y aciculares hacia el centro de las amígdalas (Figura 16a), en otros casos las zonas de zeolitas fibrosas y radiales recubren las amígdalas y hacia el interior de estas se encuentran las variedades granulares de zeolitas, cada una de ellas con rasgos característicos propios (Figura 16b). Por otra parte se da el caso en que un único agregado rellene completamente la vesícula.

Entre las zeolitas granulares, se encuentran agregados de color rosado, hábito pseudorombohédrico, algunas veces formando ángulos de 90° entre sus caras y relieve alto que corresponden a chabazita, en cuyos cristales se puede presentar algunos juegos de maclas paralelas a las caras del romboedro (Figuras 16c y 16d). Otros agregados de cristales cúbicos trapezohédricos con relieve alto, colores blanco a rosado y de índice de refracción bajo corresponden a analcima, que en ocasiones se encuentra junto a agregados fibrosos o aciculares radiales (Figuras 16e y 16f). Con ayuda de los análisis de difracción de rayos X también se determinó phillipsita, la cual se caracteriza por una típica macla en cruz (Vattuone

et al. 2008) que en este caso no pudo ser observada al microscopio óptico. La wairakita (Figura 16g), muy parecida a la analcima y solo diferenciable de esta por medio de difracción de rayos x, ocurre en agregados incoloros, forma cristales euhedrales pseudo-dodecahédricos o prismáticos y rellena cavidades y venas. Tiene un muy bajo relieve y según Thompson y Thompson (1996) en luz polarizada cruzada suele manifestar dos sets de maclas polisintéticas entrelazadas que le dan una apariencia similar a la microclina con pobre clivaje.

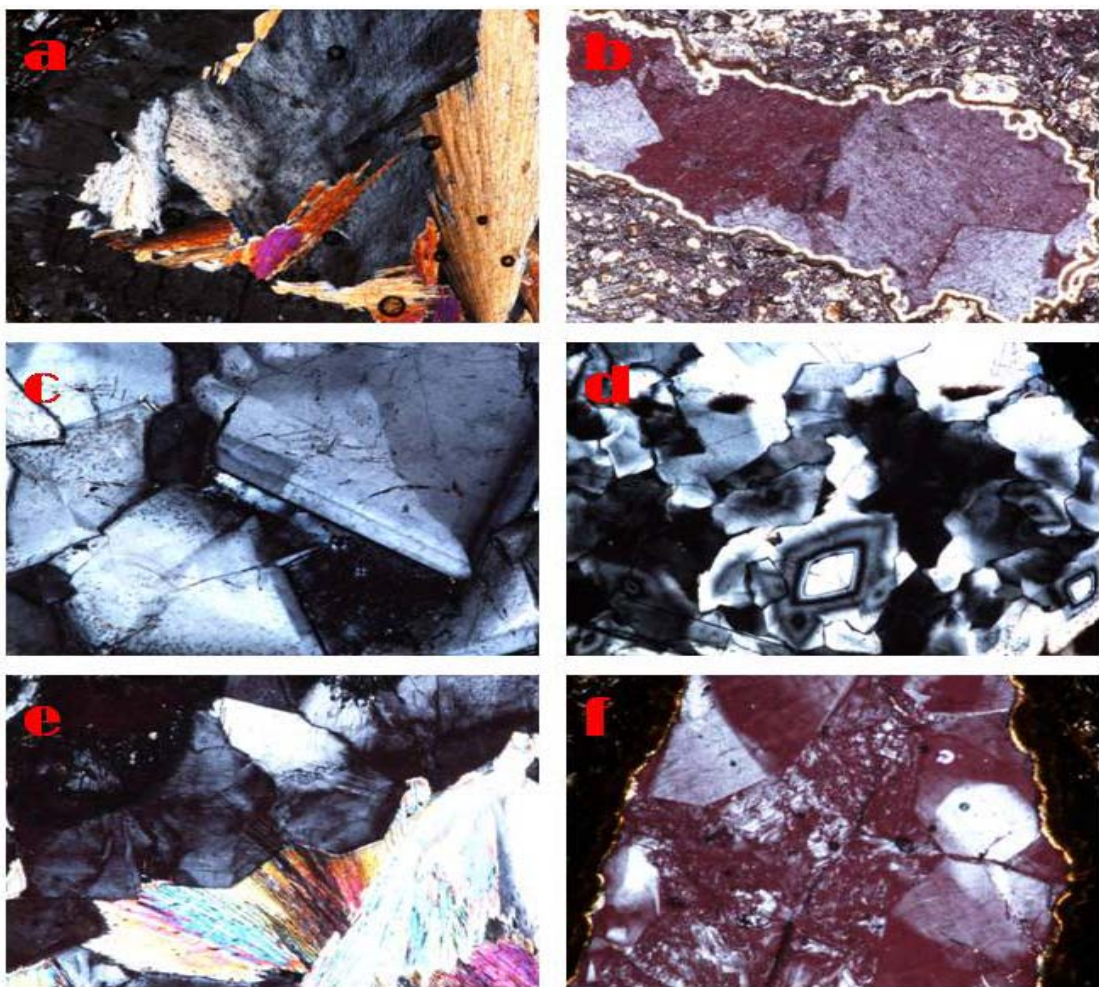


Figura 16. Microscopía de luz transmitida. (a) Zeolita granular hacia el borde de la amígdala y agregados fibrosos y aciculares al centro. (b) Zeolitas de agregados fibrosos hacia el borde de la amígdala y zeolitas granulares al centro. (c) y (d)

Forma pseudorombohédrica característica de chabazita. (e) y (f) Cristales de analcima con su característica forma trapezoidal.

Ya sea hacia el centro o hacia los bordes de las amígdalas se encuentran los agregados fibrosos, aciculares y radiales; entre las zeolitas aciculares, se determinó un agregado cristalino radiado con birrefringencia moderada de color amarillento correspondiente a natrolita (Figura 16h), conocida como zeolita puntiaguda por el hábito común acicular de los cristales, los cuales son muy tenues y se agrupan como racimos divergentes. Este mineral también ocurre frecuentemente en agregados fibrosos y las fibras tienen una disposición divergente o radial. Entre sus características ópticas que la hacen claramente distinguible de otras zeolitas se destaca la extinción de las fibras en nicols cruzados de formas paralela a su longitud y estas fibras no muestran una figura óptica en luz polarizada convergente. La natrolita es usualmente blanca o incolora, pero algunas veces rojiza o amarillenta, su brillo es vítreo, o en especímenes finamente fibrosos, sedoso. Un agregado fibroso y reticulado, de masas fibrosas que son transparentes a traslúcidas y variedad de colores que van desde blancos hasta rojizos y blancos amarillentos a grises, se determinó como levina (Figura 16i). Esta zeolita tiene un brillo vítreo, relieve moderado, bajo índice de refracción y se presenta como el único material de relleno en ciertas amígdalas.

En sección delgada se pudo distinguir un agregado con características ópticas propias de la laumontita (Figura 16j), esta zeolita forma cristales prismáticos con terminación angulosa y posee sección transversal en forma de diamante. Cuando es pura es incolora o blanca pero las impurezas le pueden dar colores anaranjados, grises, amarillentos, rosados o rojizos. Es muy brillante, con brillo vítreo y fractura concoidal, se encuentra en depósitos hidrotermales frecuentemente formada como resultado de mineralización secundaria. Ópticamente se presenta como agregados en forma de abanicos divergentes con bajo relieve y bajo índice de refracción. Las figuras 16k y 16l corresponden a la

zeolita del tipo thompsonita, esta puede ser incolora o coloreada, blanca, beige o amarillenta. Los cristales tienden a ser hojas largas y delgadas que típicamente forman agregados radiales y algunas veces abanicos y mechones. Los agregados son variables y pueden ser de apariencia espinosa, densos y como una pelota o crecer con forma de gusano. Una de las formas más comunes son racimos radiales aciculares ajustados.

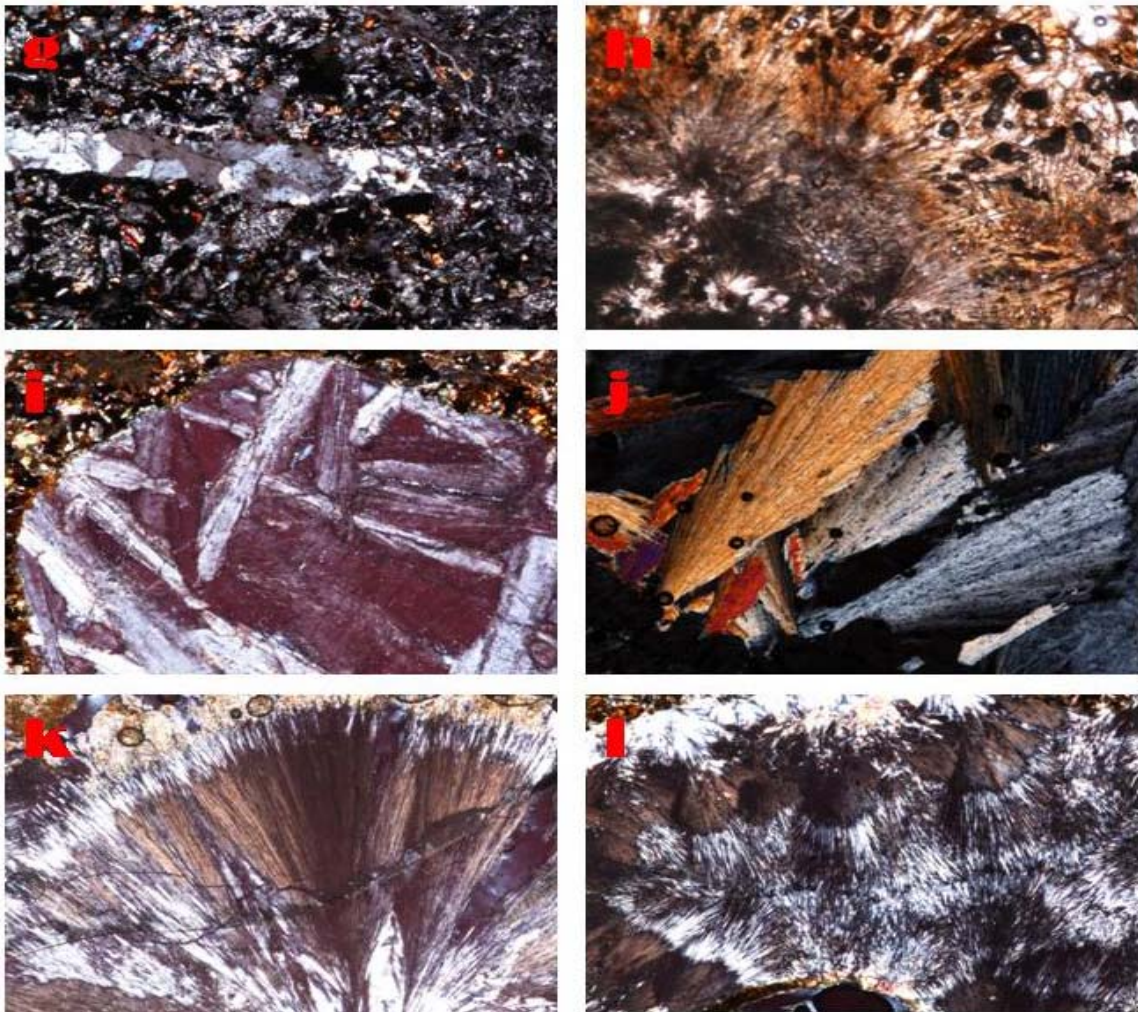


Figura 16. Microscopía de luz transmitida. Continuación. (g) Wairakita relleno una delgada venilla. (h) Agregado acicular típico de natrolita. (i) Levina relleno una amígdala completamente. (j) Laumontita en abanicos divergentes. (k) y (l). Thomsonita con su característico agregado fibroso relleno amígdalas.

5.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

En el microscopio electrónico de barrido se manifiestan diferentes tipos de cristales, cada uno de ellos con una morfología característica que permite asociarlo a los diversos tipos de zeolitas existentes en la zona de estudio. Unos cristales trapezohédricos, perfectamente desarrollados y con tamaños de 1,8 mm. se aprecian claramente en la Figura 17a, esta misma morfología cristalina típica de analcima, se muestra con tamaños menores y rodeada por un agregado laminar como lo muestra la Figura 17b. Uno de los cristales que aparece más frecuentemente se caracteriza por su hábito rombohédrico y tamaños variados que algunas veces llegan hasta 800 μm (Figura 17c), en otros casos estos cristales presentan un hábito más pseudocúbico formando ángulos rectos entre sus caras, estas formas corresponden a chabazita, algunas veces presentando estrías paralelas a los bordes del cristal (Figuras 17d y 17e).

En otras muestras se observan cristales largos y tabulares dispuestos en agregados con forma de abanico o radiales divergentes que son una forma común de thompsonita (Figura 17f). Estas formas alargadas llegan a medir más de 1,4 mm. de longitud y los abanicos se pueden cerrar completamente tomando una apariencia esférica (Figura 17g). Otro agregado acicular radial conformado por cristales alargados tabulares de 650 μm . de longitud es un ejemplo claro de thompsonita. (Figura 17h). Unos cristales prismáticos muy delgados, alargados y de aspecto puntiagudo, morfología típica de natrolita, se encuentran desordenadamente junto a cristales pseudocúbicos de chabazita (Figura 17i), estos cristales con apariencia de agujas pueden llegar a medir más de 2 mm. de longitud, en la figura 17j, se muestra un agregado con cristales típicos de natrolita.

Algunas microfotografías muestran variedad de agregados y formas de los cristales, en la Figura 17k se ven dos diferentes apariencias de thompsonita, hacia el centro un agregado de fibras cortas entrelazadas y hacia el exterior de la

amígdala una capa de 50 μm de fibras paralelas entre sí y perpendiculares a las paredes de la cavidad. Otra forma de zonación visible en microfotografía se muestra en la Figura 17I, en la que unas finas fibras de 300 μm de longitud con morfología característica de natrolita y que algunas veces forman racimos, crecen sobre cristales típicos de analcima estriados en algunas de sus caras y que se encuentran zonados con una delgada capa fibrosa típica de thompsonita.

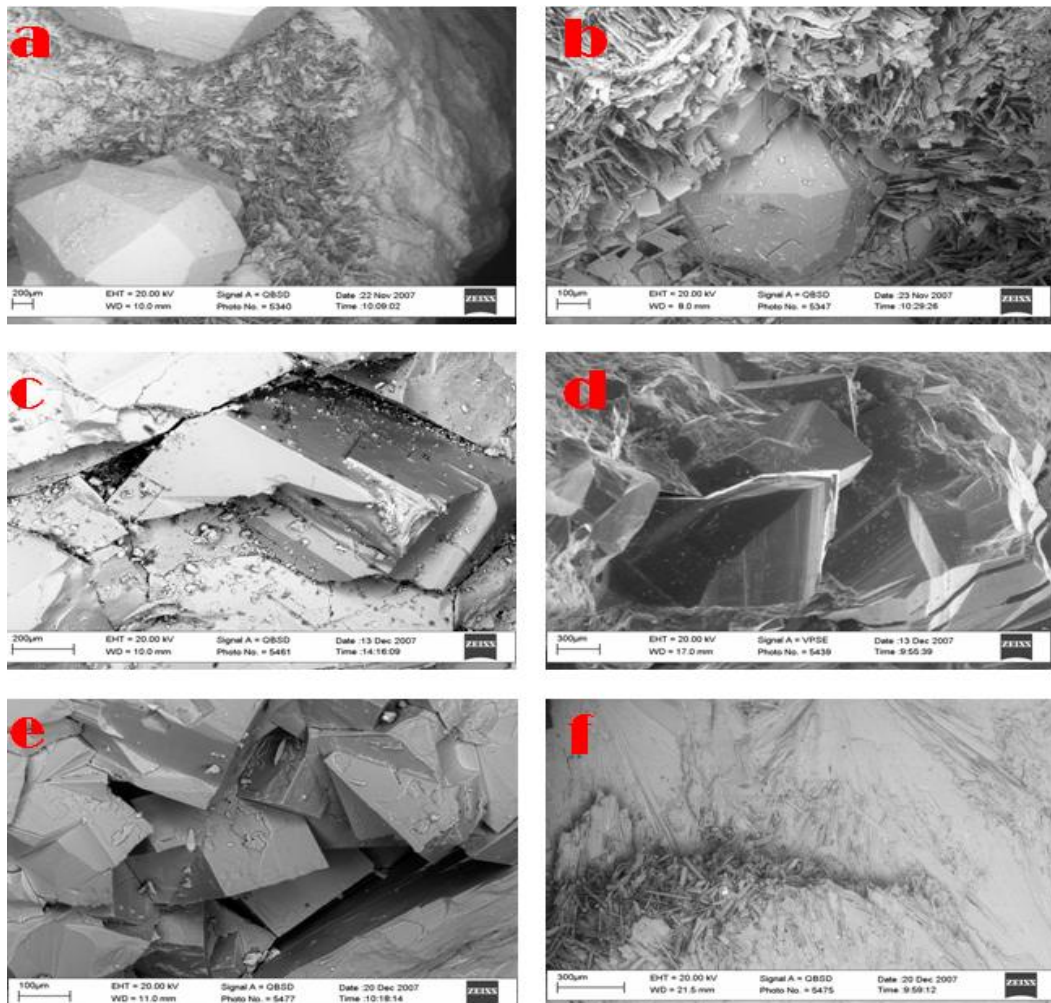


Figura 17. Microscopía Electrónica de Barrido. (a) y (b). Cristales trapezohédricos típicos de analcima. (c) Cristal de chabazita con su característica forma pseudorrombohédrica. (d) y (e). Chabazita presentando estrías paralelas a las caras del cristal. (f) Agregados con forma de abanico o radiales divergentes de thompsonita.

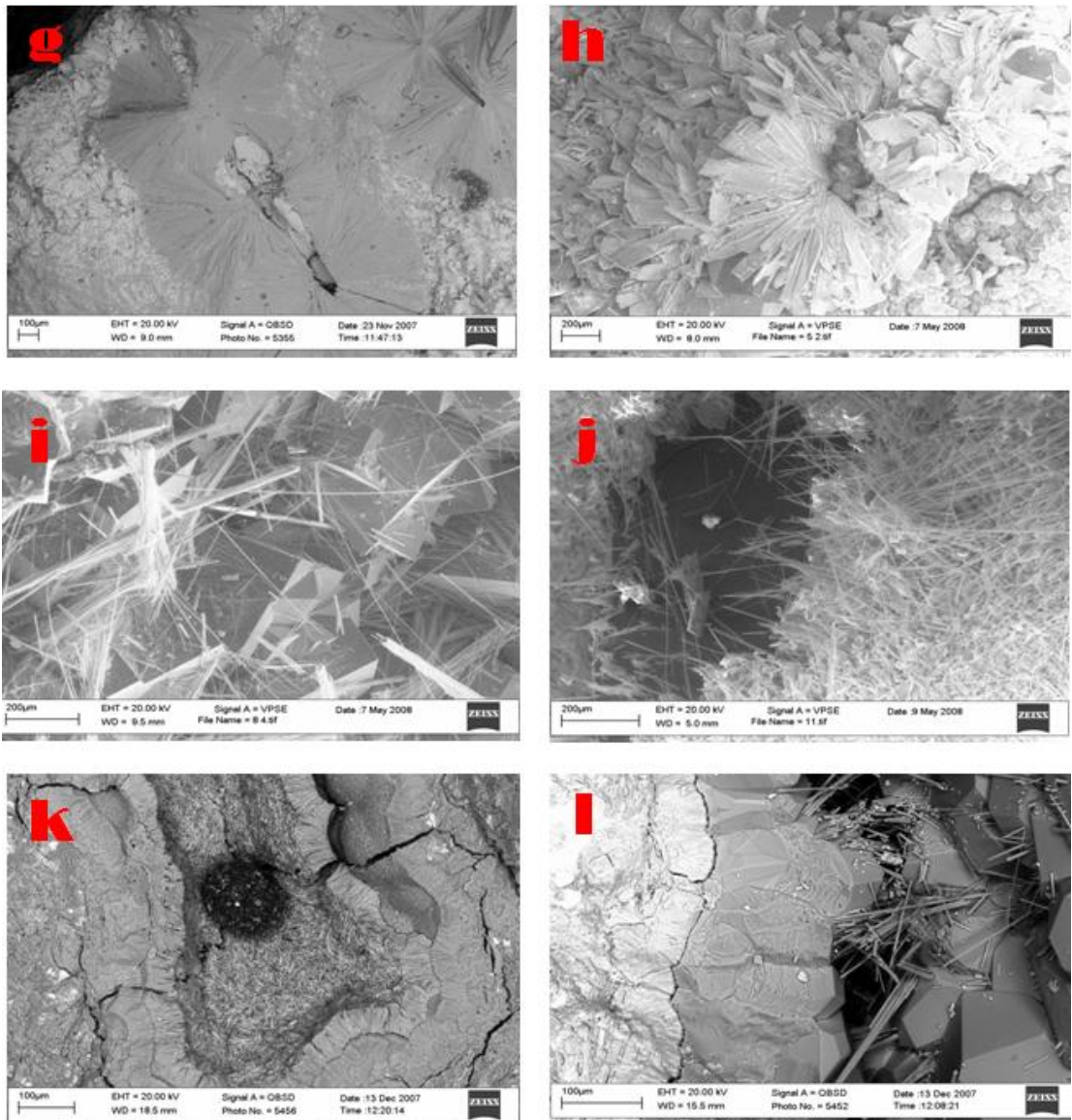


Figura 17. Microscopía Electrónica de Barrido. (g) Agregados de thompsonita con apariencia esférica. (h) Cristales alargados tabulares de thompsonita (i) Morfología puntidaguda típica de natrolita junto a cristales pseudocúbicos de chabazita (j) cristales con apariencia de agujas típicas de natrolita (k) Zonación de thompsonita, hacia el centro un agregado de fibras cortas entrelazadas y hacia el exterior de la amígdala fibras paralelas entre sí y perpendiculares a las paredes de la cavidad. (l) Zonación de natrolita y analcima en el centro de la amígdala y thompsonita al extremo.

5.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Los análisis cualitativos de difracción de rayos X realizados en las diferentes muestras estudiadas, permitieron la identificación de gran variedad de especies zeolíticas, lo cual se presenta en Tabla 4.

Tabla 4. Especies zeolíticas identificadas por difracción de rayos X.

	FASES ZEOLITICAS																	
	Analcima	Wairakita	Analcima	Chabazita	Natrolita	Thompsonit	Laumontita	Estelerita	Stilbita	Filipsita	Levina	Stellerita	Thompsonit	Stilbita	Chabazita	Chabazita	Filipsita	
Zeolitas en amigdalas																		
M 31-1																		
M-6																		
M 47-1																		
M 32-4																		
M 15-1																		
M 27-2																		
M 3-1																		
M 3-3																		
M 4-1																		
M 4-2																		
M 5-1																		
M 10-2																		
M 13-1																		
M 28-1 SD																		
Old man 2																		
M 24-5 SD																		
M 34-1																		
M 54-2 a																		
M 54-2 b																		
M 1-2																		
M 3-2																		
M 5-1 VOID																		
M 5-2																		
M 10-1																		
M 29-3																		

	FASES ZEOLITICAS																
	Analcima	Wairakita	Analcima	Chabazita	Natrolita	Thompsonit	Laumontita	Estelerita	Stilbita	Filipsita	Levina	Stellerita	Thompsonit	Stilbita	Chabazita	Chabazita	Filipsita
Zeolitas en amigdalas																	
M 30																	
M 32-3																	
M 54-2																	
M 43-1																	
M 8-2																	
M 8-2																	
M 1-1																	
M 30-2																	
M 44-4																	
M 8-1																	
M 9																	
Skye Old Man																	
M 30-1																	
M 42-2																	
M 1-3 BN																	
M 1-3																	
M 4-3																	
M 30 BN																	
M 32-4																	
M 86-1																	
M 37-2																	
Zeolita en venas																	
Vein 2																	
M 5-2 VEIN																	
M 30 VEIN																	

Las Figuras 18-23 ilustran algunos patrones de difracción con los picos característicos de las fases zeolíticas identificadas. La Figura 18 revela que la analcima es la zeolita que predomina junto con trazas de chabazita cálcica en una vena; en la Figura 19 la thomsonita aparece como la zeolita predominante en una amígdala mientras que el difractograma además revela trazas de analcima; la wairakita como fase zeolítica principal se muestra en la Figura 20 acompañada de chabazita calcica en una amígdala, por otra parte, en la Figura 21, la chabazita sódica se manifiesta como la única fase zeolítica existente en otra amígdala. En la Figura 22 se hace notorio el patrón de thomsonita acompañado por las trazas de chabazita sódica, natrolita y laumontita en una amígdala; la estilbita cálcica y estellerita sódica, coexisten con patrones de difracción similares en una amígdala, como lo muestra la figura 23.

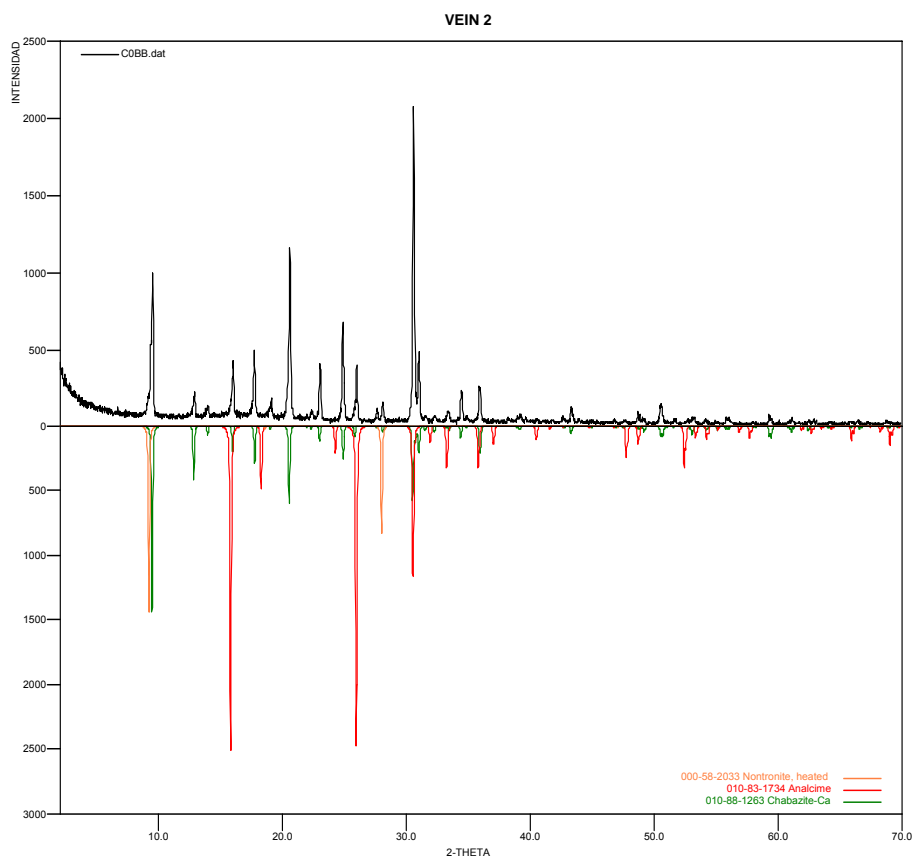


Figura 18. Difractograma y picos característicos de analcima y chabazita cálcica.

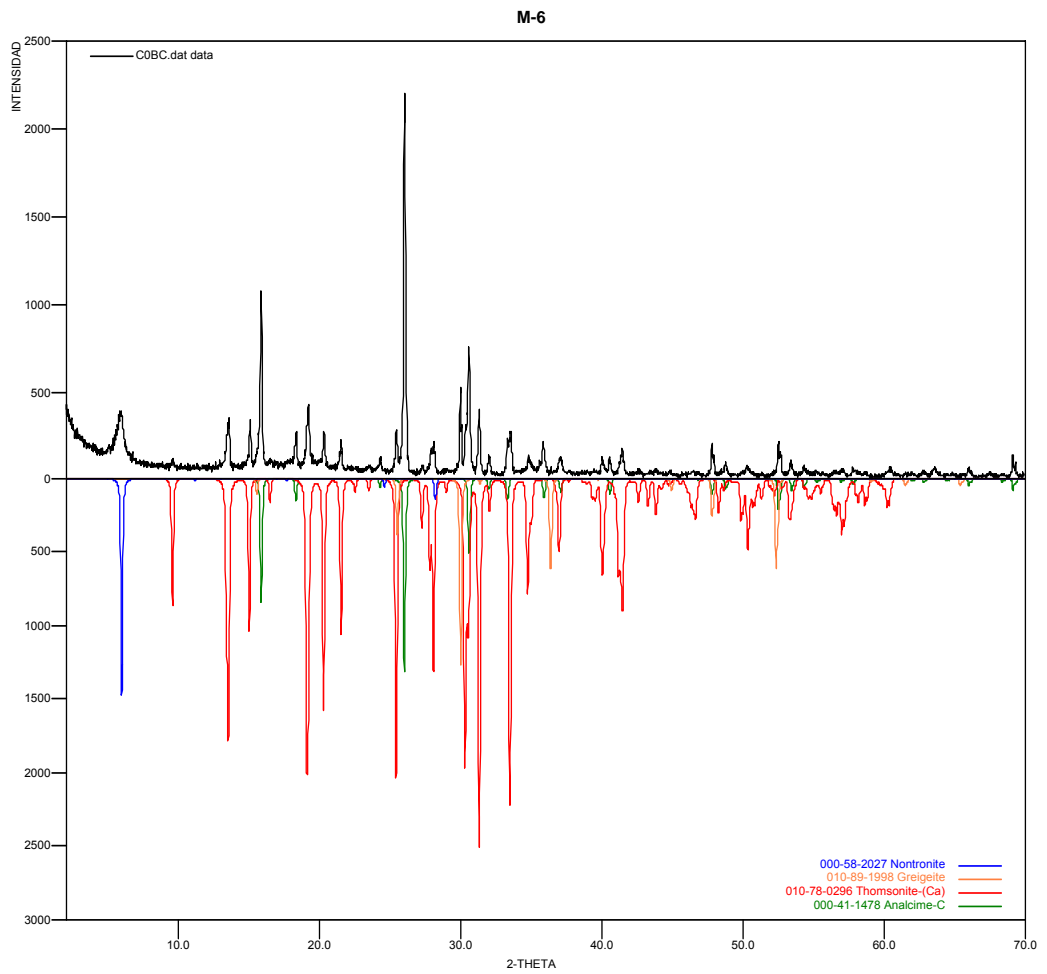


Figura 19. Difractograma y picos característicos de thompsonita y analcima.

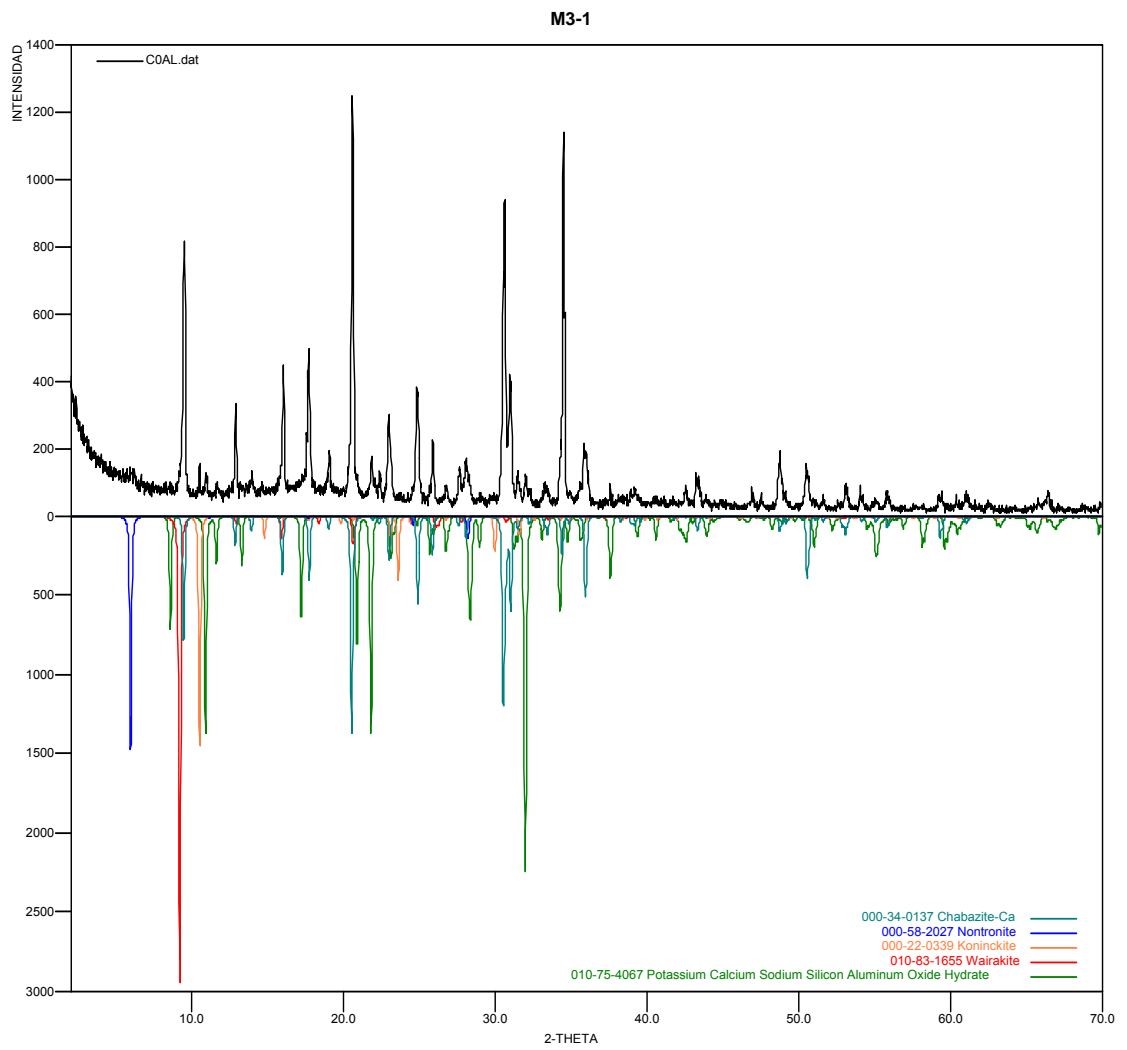


Figura 20. Difractograma y picos característicos de wairakita y chabazita cálcica.

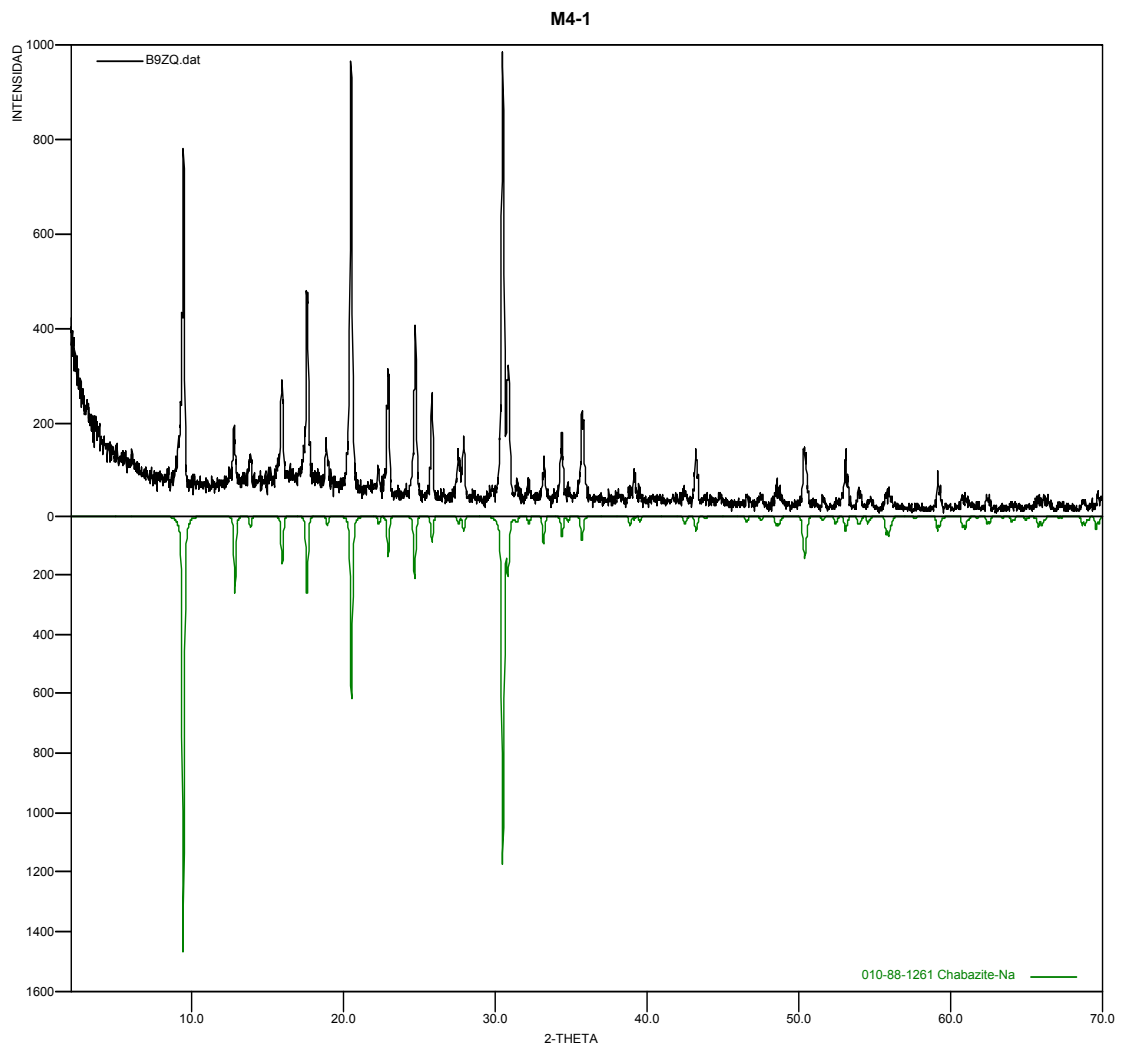


Figura 21. Difractograma y picos característicos de chabazita sódica.

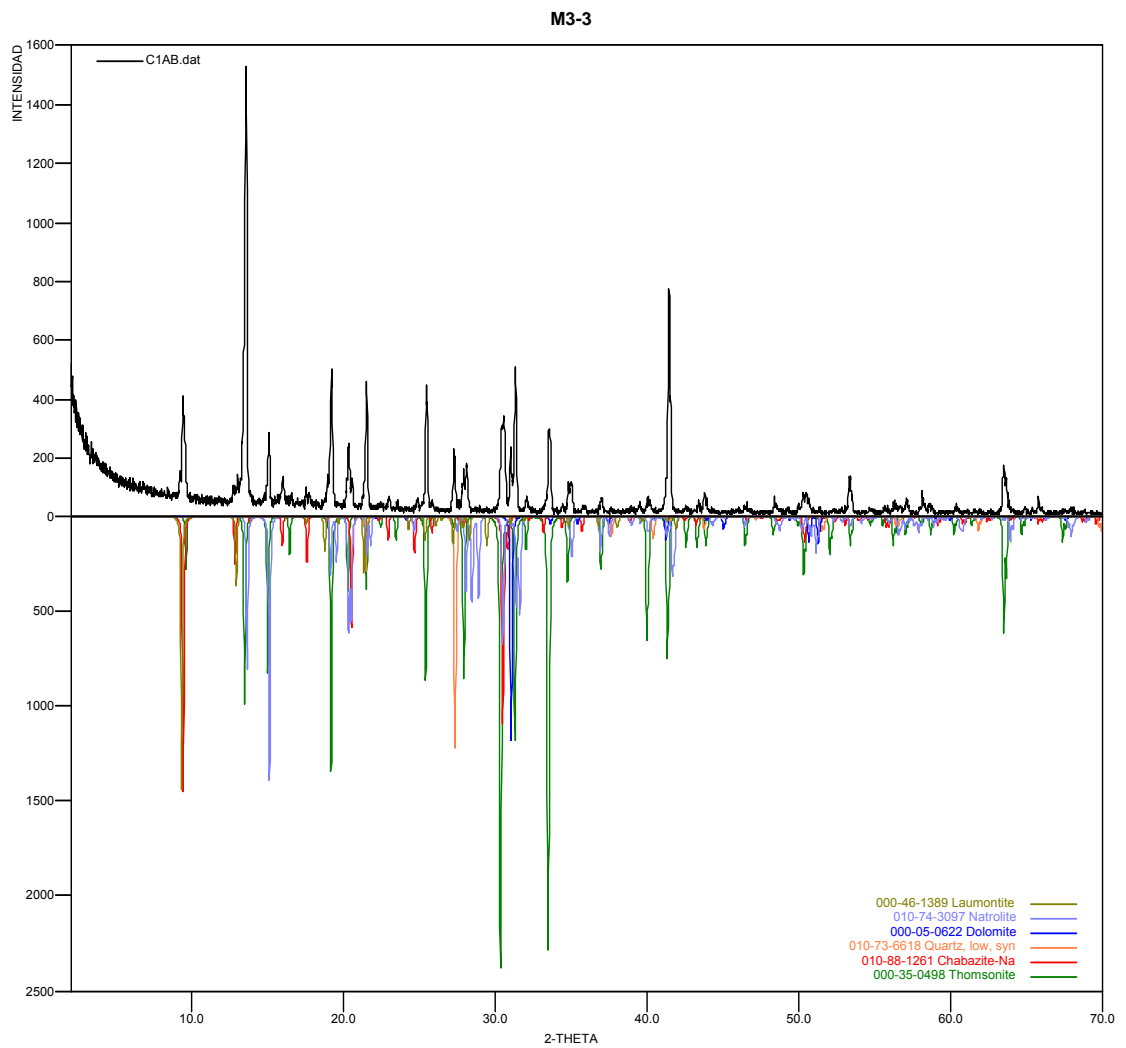


Figura 22. Difractograma y picos característicos de chabazita sódica, thompsnita, laumontita y natrolita.

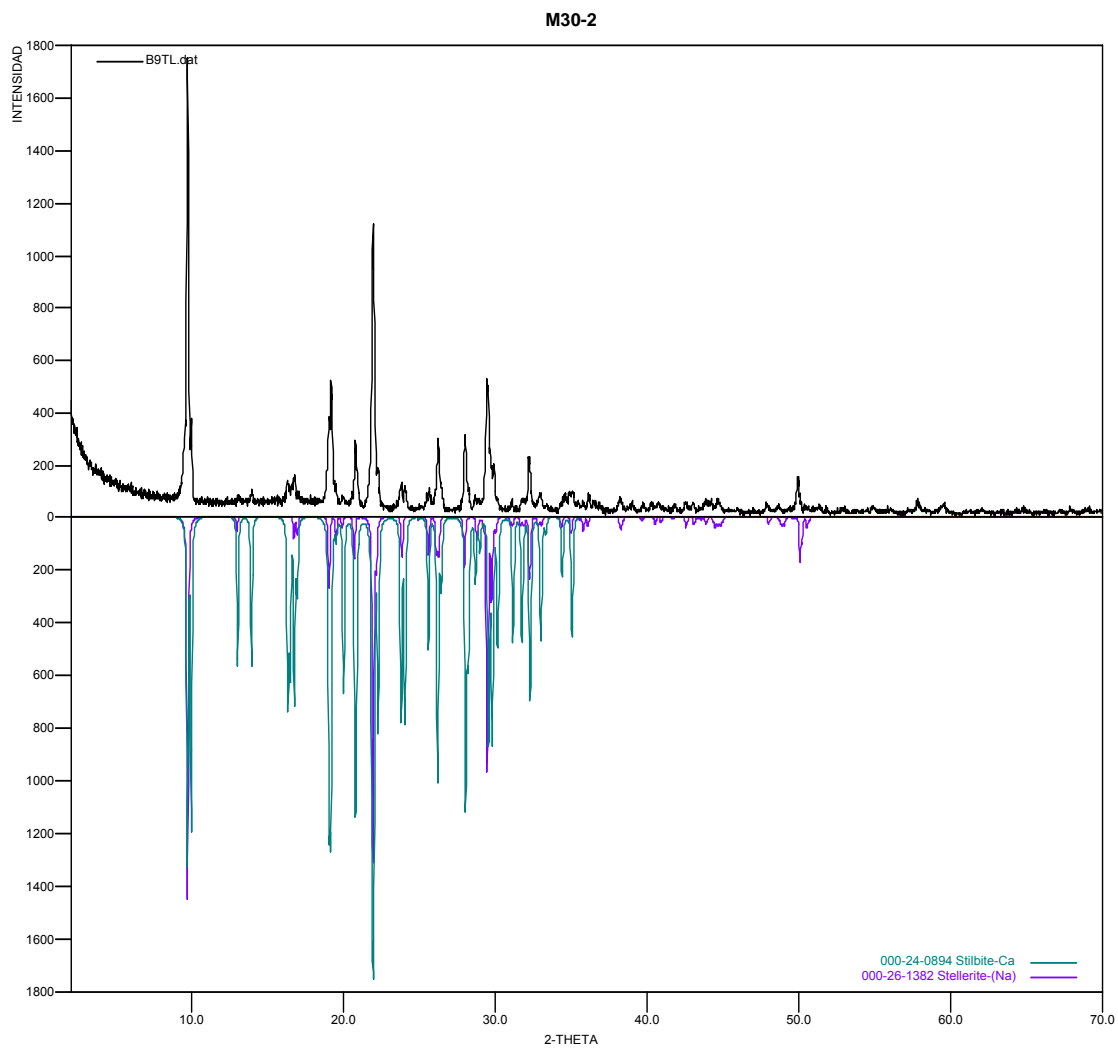


Figura 23. Difractograma y picos característicos de estilbita cálcica y estellerita sódica.

CAPITULO.6. ZEOTIPOS Y ASOCIACIONES

6.1. TIPOS DE ZEOLITAS NATURALES

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la caracterización mineralógica y textural se realizó una comparación de las fases zeolíticas identificadas con la clasificación propuesta por Meier (1968), lo cual se resume en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de las zeolitas identificadas con la clasificación estructural de Meier (1968).

CLASIFICACIÓN ESCTRUCTURAL	FASES ZEOLITICAS IDENTIFICADAS
C4-C4-T1/ HEULANDITA	estellerita, estilbita, estellerita sódica, estilbita cálcica.
C6/ CHABAZITA	chabazita, levina, chabazita cálcica, chabazita sódica
C4-C4/ ANALCIMA	analcima, wairakita, analcima
C4-T1/ NATROLITA	natrolita, thompsonita, thompsonita cálcica.
C4/ FILIPSITA	filipsita, filipsita sódica
C8/ LAUMONTITA	Laumontita

Las 17 fases zeolíticas identificadas en el presente estudio se organizaron en 6 grupos estructurales según las clasificación propuesta por Meier, (1968). El grupo de la heulandita correspondiente a la unidad secundaria C4-C4-T1 reúne las fases zeolíticas estellerita, estilbita, estellerita sódica y estilbita cálcica. El grupo de la chabazita correspondiente a la unidad secundaria C6 reúne las fases zeolíticas chabazita, levina, chabazita cálcica y chabazita sódica. El grupo de la analcima,

correspondiente a la unidad secundaria C4-C4 contiene las fases zeolíticas analcima, wairakita y analcima. El grupo de la natrolita, correspondiente a la unidad secundaria C4-T1 lo conforman las fases zeolíticas natrolita, thomsonita, thomsonita cálcica. El grupo de la filipsita corresponde a la unidad secundaria C4 y reúne la filipsita y filipsita sódica. El último grupo corresponde a la unidad secundaria C8 con su única fase zeolítica del mismo nombre, laumontita.

6.2. ASOCIACIONES ZEOLÍTICAS

Las siguientes asociaciones de fases zeolíticas fueron determinadas: laumontita + chabazita; wairaquita + chabazita; chabazita + thomsonita; analcima + thomsonita; thomsonita + wairaquita + chabazita; thomsonita + analcima + chabazita; natrolita + analcima + thomsonita. Estas asociaciones minerales generalmente presentan nontronita (miembro de las esmectitas).

CAPITULO 7. CONCLUSIONES

Los principales afloramientos con zeolitas en la Isla de Skye corresponden a basaltos espilíticos de colores grises, con grado de meteorización variable entre bajo y alto. Estas rocas se caracterizan por presentar numerosas amígdalas que se disponen al azar, en algunos casos desarrollando una estructura bandeada, así como venas, compuestas de agregados de varios tipos de zeolitas. En estos afloramientos, de estructura amigdaloide, algunas veces vesicular, las amígdalas presentan aspecto generalmente masivo y en algunos casos desarrollan superficies drusiformes. Las amígdalas muestran un tamaño promedio de 0.5 mm., alcanzando dimensiones de hasta 2 cm. Estas tienen una morfología irregular, alargada u ovalada, con bordes predominantemente redondeados a subredondeados, con relleno no uniforme, algunas veces apenas recubriendo la cavidad y otras veces rellenándola completamente. Las venas regularmente acompañan las amígdalas, apareciendo algunas veces paralelas a la superficie del flujo de lava o atravesándolo en varias direcciones; estas venas alcanzan a tener espesores de hasta 3 cm. y cuando se concentran en grandes cantidades llegan a formar stock works.

17 tipos de zeolitas fueron identificadas durante el estudio de amígdalas y venas presentes en los basaltos de la Isla de Skye. Las fases zeolíticas son analcima y su variedad magnesiana, wairakita, chabazita y sus variedades cálcica y sódica, natrolita, thompsonita y su variedad cálcica, estellerita y su variedad sódica, estilbita y su variedad cálcica, filipsita y su variedad sódica y levina. Es común la ocurrencia de nontronita en más del 70% de las muestras analizadas, así como de cuarzo, sodalita, hematita, diópsido y carbonatos (calcita, dolomita y calcita magnesiana).

Mediante análisis de microscopía de luz transmitida fue posible apreciar diferentes tipos de agregados y zonalidad en la distribución de las fases zeolíticas, resaltándose aquí el desarrollo de agregados aciculares (natrolita), fibrosos y reticulados (levina), variolítico (laumontita) y fibrosos y radiales formando algunas veces abanicos y mechones (thomsonita). Otras variedades de zeolitas corresponden a cristales euhedrales bien desarrollados de analcima, chabazita, filipsita y wairakita. Estos cristales de mayor tamaño se disponen generalmente hacia el centro de las amígdalas.

La microscopía electrónica de barrido permitió determinar las características morfológicas de algunos de los cristales de zeolitas presentes en los distintos agregados. Al microscopio, los cristales trapezohédricos de analcima, algunas veces estriados en sus caras, llegan a tener tamaños de hasta 1.8 mm. La chabazita, de tamaños variados hasta de 800 μm se manifiesta con su hábito rombohédrico y pseudocúbico, algunas veces presentando estrias paralelas a los bordes del cristal. Los cristales de thomsonita, que llegan a medir hasta 1.4 mm., exhiben una apariencia alargada y tabular dispuesta radial y divergentemente; mientras que los cristales de natrolita lucen alargados y puntiagudos como agujas, con longitudes de más de 2 mm.

Los análisis de microscopía de luz transmitida y microscopía electrónica de barrido, permitieron diferenciar una zonalidad característica en las amígdalas, lo que podría indicar cambios en la temperatura y la composición del fluido mineralizante, que a modo de hipótesis serían los dos factores principales de nucleación, aunque como ya se dijo, la presente etapa de estudio no cuenta con análisis químicos programados para el estudio de los fluidos y la temperatura de formación.

CAPITULO 8. RECOMENDACIONES

Es evidente que para tener un mejor entendimiento acerca de la reconstrucción de la historia evolutiva de las rocas basálticas Terciarias con presencia de zeolitas de la Isla de Skye, es necesario considerar no solo la caracterización mineralógica y textural de estas fases minerales sino también la interacción roca-fluido responsable de los cambios mineralógicos observados.

Por otra parte, el conocimiento geológico de un contexto regional como el de la Isla de Skye es de gran importancia en la definición de estrategias de exploración de zeolitas en países en los cuales no se ha reportado la ocurrencia de este tipo de minerales, teniendo en cuenta que en el trabajo de campo y laboratorio el geólogo no cuenta generalmente con las facilidades analíticas necesarias para caracterizar un material geológico desde el punto de vista fisicoquímico y por lo tanto es difícil establecer la presencia de un material zeolítico. Por lo tanto, es importante emprender estudios en contextos geológicos similares a los de la Isla de Skye, en donde no solo se pueda establecer la interacción de una secuencia volcánica en ambientes lacustres enriquecidos en álcalis, sino también llevar a cabo una caracterización de estas rocas para establecer la presencia o no de zeolitas.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, F.W. and DUNHAM, K.C. (1966) The Geology of Northern Skye. Memoir of the Geological Survey of Great Britain, HMSO, Edinburgh.
- HARVEY Map Services 4-7p. Collins Rambler`s guide Isle of Skye.
- DONAHOE R. J., LIOU G., GULD, S. (1984). Synthesis and characterization of zeolites in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. Clays and Clay Minerals, p, 32, 433–443.
- DRURY S.A., FRANCES P.W., GASS I.G., JACKSON D.E., MELTON L.R.A., PEARCE J.A., THORPE R.S., WILLIAMS D.W., WILSON R.C.L. (1976). Igneous case study. The Tertiary igneous rocks of Skye, NW Scotland. Milton Keynes, The Open University Press.
- EMELEUS, C.H. & GYOPARI, M.C. (1992). British Tertiary Volcanic Province, Geological Conservation Review, Series No. 4. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough.
- Estudio Geológico y Caracterización de las Zeolitas Naturales existentes en la Escuela Superior del Litoral anexo 3. p, 161.pdf
- FERRY, J.M., MUTTI, L.J., and ZUCCALA, G.J. (1987). Contact metamorphism/hydrothermal alteration from the Isle of Skye, northwest Scotland. Contrib Mineral Petrol 95:166-181.
- GEOLOGICAL SURVEY OF GREAT BRITAIN, HMSO, Edinburgh.
- GILLEN, C. (2003). Geology and landscapes of Scotland. Harpenden. Terra Publishing, 1st edition, p, 245.
- GOTTARDI G. (1989): The genesis of zeolites. European Journ. Mineralogy, 1, p, 470–487.
- HOWELL, J.V. Glossary of Geology and Related Science
- INGEOMINAS, 1979 Memoria Explicativa del Departamento del Cauca p, 10.

- KING, P.M. (1977) The secondary minerals of the Tertiary lavas of northern and central Skye – zeolite zonation patterns, their origin and formation. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Aberdeen.
- MELGAREJO Joan Carles, Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada. Primera. Edición 1.997. Publicaciones UB.
- STEPHENSON D. y MERRIT, J. Skye: A landscape fashioned by geology. Scottish Natural Heritage and British Geological Survey, (2006) p, 3-15.
- MOORBATH S, BELL JD (1965) Strontium isotope abundance studies and rubidium-strontium age determinations on Tertiary igneous rocks from the Isle of Skye, northwest Scotland. J Petrol. p, 37-66. Neuquén, Patagonia, Argentina. Pdf.
- Ordnance Survey. Mapa topográfico North Skye. Escala 1:50.000.
- Ordnance Survey. Mapa topográfico South Skye. Escala 1:50.000.
- OSTROUMOV; M., ORTIZ, L. E.; HERNANDEZ y CORONA CHÁVEZ, P. Zeolitas de México: Diversidad mineralógica y aplicaciones. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia.
- REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS, v. 25, núm. 3, 2008, Paragénesis de zeolitas alcalinas en un afloramiento de basaltos olivínicos amigdaloides de Junín de Los Andes, Neuquén, Patagonia, Argentina. Pdf. p, 483-493.
- STEPHENSON, D., and MERRITT, J. (1993). Skye: A Landscape Fashioned by Geology. Scottish Natural Heritage and British Geological Survey, p, 22.
- TOWNSEND C, 2001.
- WALKER, G.P.L., 1960. Zeolite zones and dike distribution in relation to the structure of the basalts of eastern Iceland. Journal of Geology, p, 68, 515–28. www.relaq.mx/rl/cuba/zeolita.html
- WIKIPEDIA. The free encyclopedia. Skye.Png.
- <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hebridesmap.png>
- <http://www.forospiedrasobrepiedra.com/smf/index.php?topic=7092.0>

- <http://www.invenia.es/oai:dialnet.unirioja.es:ART0000041507>
- <http://www.ranchochinobampo.com.mx/Documentos/Zeolita-MaximoAprovechamiento.pdf>
- http://www.rte.espol.edu.ecarchivosRevista_2006107Final.pdf
- <http://www.ugm.org.mx/pdf/geos02-2/MINC02-2.pdf>
- https://www.ucursos.cl/ingenieria/2007/2/GL540/1/material_alumnos/previsualizar.php?id_material=8745