



---

---

---

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales

## “CARACTERIZACIÓN DE ROCAS DE BASALTO DEL ESTADO DE HIDALGO PARA PRODUCIR FIBRA MINERAL”

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES**

Presenta

**Ing. Héctor Manuel Barragán Madera**

Director de Tesis: Dr. Raúl Moreno Tovar  
Codirector: M. en C. Alberto Arenas Flores

Junio 2018



Mineral de la Reforma, Hgo., a 19 de junio de 2018

Número de control: ICBI-D/583/2018  
 Asunto: Solicitud de impresión de tesis.

**M. EN A. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO**  
**DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR**

Por este conducto le comunico que el jurado asignado al pasante, de la Maestría en Ciencias de los Materiales, **Héctor Manuel Barragán Madera** con número de cuenta 123444, quien presenta el trabajo de tesis titulado **“Caracterización de rocas de basalto del estado de Hidalgo para producir fibra mineral”**, después de revisar el trabajo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión del mismo una vez realizadas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del jurado.

PRESIDENTE: Dr. Fidel Pérez Moreno  
 SECRETARIO: M. en C. Alberto Arenas Flores  
 VOCAL: Dr. Raúl Moreno Tovar  
 SUPLENTE: Dr. Jaime Guerrero Paz

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente  
 “Amor, Orden y Progreso”

Dr. Óscar Rodolfo Suárez Castillo  
 Director del ICBI



ORS/IBO

Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
 Colonia Carboneras  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
 Tel. +52 771 7172000 exts 2231, Fax 2109  
 direccion\_icbi@uaeh.edu.mx



## Dedicatoria

*Al Gran Arquitecto del Universo*

*A mis padres Eligio y Esther*

*A Paola Ríos y Sergio Barragán*

*A mis Maestros*

*A mis hermanos*

*A mis amigos y hermanos por convicción*

<b>ÍNDICE</b>	<b>Página</b>
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE ECUACIONES Y REACCIONES.....	VII
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT .....	X
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
2.1 Clasificación del basalto según su origen .....	3
2.2 Características mineralógicas del basalto .....	5
2.3 Las fibras de basalto .....	6
2.4 Aplicaciones de la fibra de basalto .....	7
2.4.1 Aislante térmico .....	7
2.4.2 Mallas de refuerzo .....	8
2.4.3 Filamentos de fibra continua.....	8
2.4.4 Telas contra incendios .....	9
2.4.5 Barras de refuerzo .....	9
2.5 Fuentes de energía utilizadas para fundir la roca basáltica .....	9
2.6 Principales métodos de obtención de fibra mineral .....	10
2.7 Estudios previos.....	11
3. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.....	19
3.1 Objetivo General .....	19
3.1.1 Objetivos específicos .....	19
3.2 Justificación.....	19
4. METODOLOGÍA .....	20
4.1 Muestreo .....	20
4.2 Geología del área de estudio .....	21
4.3 Preparación de muestras .....	21
4.3.1 Preparación de probetas para pruebas térmicas .....	22
4.3.2 Proceso de digestión de fibras comerciales para su análisis por ICP....	22
4.3.3 Preparación de fibras para su análisis por MEB .....	23

4.4 Difracción de rayos X .....	23
4.5 Fluorescencia de rayos X.....	24
4.6 Microscopía óptica de polarización .....	24
4.7 Clasificación de rocas volcánicas mediante el diagrama de álcali total vs sílice TAS.....	25
4.8 Estimación de minerales en rocas volcánicas aplicando la norma CIPW ....	25
4.9 Clasificación de rocas volcánicas en un diagrama QAPF a través del contenido de cuarzo, feldespatos alcalinos, plagioclasas y feldespatoides.....	26
4.10 Pruebas térmicas para aproximar el punto de fusión de las rocas analizadas.....	26
4.11 Análisis termogravimétrico de ocho muestras de roca basáltica seleccionadas.....	27
4.11.1 ATG de tres muestras de fibras comerciales .....	27
4.12 Proceso para la obtención de fibras de roca basáltica en laboratorio .....	28
4.12.1 Diseño de arco eléctrico para pruebas preliminares de fundido .....	28
4.12.2 Diseño de segmento mecánico para la obtención de fibras.....	30
4.12.3 Proceso de fundido-vaciado para obtención de fibras .....	31
4.13 Microscopía electrónica de barrido de las fibras obtenidas y de las fibras comerciales.....	31
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
5.1 Resultados de muestreo de las rocas basálticas .....	32
5.2 Descripción megascópica de las muestras de roca .....	33
5.3 Difracción de rayos X de las rocas de basalto .....	35
5.4 Fluorescencia de rayos X.....	43
5.5 Clasificación de las muestras de roca basáltica en un diagrama TAS .....	45
5.6 Identificación de minerales en las muestras de roca basáltica con la aplicación de la norma CIPW.....	46
5.7 Clasificación de las muestras de roca basáltica estudiadas de acuerdo al diagrama QAPF .....	48
5.8 Microscopía óptica de polarización de las rocas analizadas.....	49
5.9 Módulos de acidez y viscosidad de las treinta muestras de roca analizadas.....	55

5.10 Comparativo de pruebas térmicas en probetas antes y después del tratamiento térmico .....	55
5.11 Análisis termogravimétrico de ocho muestras de roca analizadas .....	59
5.11.1 Primera derivada del ATG de muestras de roca representativas.....	60
5.11.2 Análisis termogravimétrico de fibras comerciales FV01, FV02 y LR....	61
5.11.3 Alteración de fibras comerciales analizadas posterior al análisis ATG	63
5.12 Comparativo de análisis químico por ICP de fibras comerciales.....	64
5.13 Resultados durante el proceso de fibrado.....	65
5.14 Comparación elemental por EDS de fibras obtenidas en laboratorio con las fibras comerciales.....	66
5.15 Comparativo de morfología de las fibras comerciales analizadas con las fibras obtenidas en laboratorio .....	72
6. CONCLUSIONES .....	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	79
GLOSARIO.....	83
7. ANEXOS .....	86

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>Página</b>
Figura 2.1 Clasificación del basalto según su origen .....	4
Figura 2.2 Clasificación general de las fibras .....	6
Figura 2.3 Principales métodos de obtención de fibra mineral, .....	10
Figura 2.4 Proceso de fundido de basalto .....	12
Figura 2.5 Pérdida de masa en análisis TGA en fibra de vidrio y de basalto .....	15
Figura 2.6 Diagrama de proceso de fibrado rotacional de doble disco.....	18
Figura 4.1 Eje Neovolcánico.....	20
Figura 4.2 Equipo utilizado para preparación de las muestras.....	22
Figura 4.3 Horno Mars 5 utilizado para la digestión de fibras.....	23
Figura 4.4 Rampa de calentamiento utilizada para estimar los puntos de fusión de las muestras de roca.....	27
Figura 4.5 Diagrama representativo para la generación del arco eléctrico .....	28
Figura 4.6 Diseño de arco eléctrico para pruebas preliminares .....	30
Figura 4.7 Diseño mecánico para elaboración de fibras de basalto .....	30
Figura 4.8 Proceso de vaciado del material fundido.....	31
Figura 5.1 Zonas que agrupan los diez municipios de muestreo .....	32
Figura 5.2 Resultados de DRX de las muestras S2, S4 y S5 de la zona Singuilucan mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.....	36
Figura 5.3 Resultados de DRX de las muestras PR6, R7 y P9 de la zona Santiago mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.....	37
Figura 5.4 Resultados de DRX de las muestras SM1, CT, SMT2 y Z1 de la zona Zempoala mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.....	38
Figura 5.5 Resultados de DRX de las muestras MIX1 y MIX2 de la zona Mixquiahuala mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.....	39
Figura 5.6 Resultados de DRX de las muestras TEZO, HUIT y TULA de la zona Tezontepec mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.....	40
Figura 5.7 Resultados de DRX de las muestras ATO2, CC, HUA1 y HUA2 de la zona Huasca mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.....	41
Figura 5.8 Clasificación TAS de las treinta muestras de basalto del estado de Hidalgo analizadas .....	46
Figura 5.9 Fotomicrografías mostrando olivino (Olv), plagioclasa (PlaCa), anfíbol (Amph) y magnetita (Mag) en las muestras S2 y S3 de la zona de Singuilucan. Fotomicrografías tomadas al microscopio	

<p>óptico de polarización, luz transmitida con falso color para el realce de minerales, nicols cruzados, muestras S2 objetivo 4X, S3 objetivo 10X, campo horizontal de las microfotografías 2.00 y 0.98 mm respectivamente. ....</p>	50
<p>Figura 5.10 Fotomicrografías mostrando piroxeno (Px) y plagioclasa cálcica (PlaCa) en muestra PR6, anfíbol (Amph) y magnetita (Mag) en muestra P10 de la zona Santiago. Fotomicrografías tomadas al MOP, luz transmitida, con falso color para el realce de minerales, muestra PR6 nicols cruzados, muestra P10 nicols paralelos, objetivo 10X, campo horizontal de las micrografías 0.98 mm.....</p>	51
<p>Figura 5.11 Fotomicrografías mostrando olivino y plagioclasa cálcica (SM1), plagioclasa cálcica, piroxeno (px) y abundante vidrio (Vr) en la muestra SMT1 de la zona Zempoala. Fotomicrografías tomadas al MOP luz transmitida con falso color para el realce de minerales, objetivo 4X, nicols cruzados, campo horizontal de las micrografías 2.00 mm. ....</p>	52
<p>Figura 5.12 Fotomicrografías mostrando textura intersertal constituida por plagioclasa cálcica (PlaCa) y pequeños fenocristales de piroxeno (Px) en muestra MIX1, pequeños fenocristales de olivino (Ol) y piroxeno (Px) en muestra MIX4 de la zona Mixquiahuala. Fotomicrografías tomadas al MOP luz transmitida con falso color para el realce de minerales, objetivo 4X, nicols cruzados, campo horizontal de las micrografías 2.00 mm. ....</p>	53
<p>Figura 5.13 Fotomicrografías mostrando textura intersertal constituida por baguetas de plagioclasa (PlaCa) con olivino (Ol) de tipo subhedral, en la muestra HUIT; textura hialocristalina constituida por plagioclasa (PlaCa) polisintética con menor piroxeno (Px) y olivino (Ol) en matriz de vidrio (Vr), Fotomicrografías tomadas al MOP luz transmitida con falso color para el realce de minerales, objetivo 4X, nicols cruzados, campo horizontal de las micrografías 2.00 mm.....</p>	54
<p>Figura 5.14 Fotomicrografías mostrando textura intersertal fluidal constituida por plagioclasa cálcica (PlaCa), con fenocristales de piroxeno (Px) y olivino (Ol) con halo de alteración en muestra ATO-2; plagioclasa que ha sido reemplaza por epidota-sericita (Ep-Ser) y clorita (Chl), en muestra HUA3. Fotomicrografías tomadas al MOP luz transmitida con falso color para el realce de minerales, objetivo 4X en muestra ATO-2 y 10 X en muestra HUA3, nicols cruzados, campo horizontal de las micrografías 2.00 y 0.98 mm respectivamente. ....</p>	54

Figura 5.15 Pruebas térmicas de primera etapa de muestreo, zonas: Singuilucan, Santiago y Zempoala a 1100 °C a una tasa de calentamiento de 5 °Cmin <sup>-1</sup> en atmósfera de aire.....	57
Figura 5.16 Pruebas térmicas de segunda etapa de muestreo, zonas: Mixquiahuala, Tezontepec y Huasca a 1100 °C a una tasa de calentamiento de 5 °Cmin <sup>-1</sup> en atmósfera oxidante. ....	58
Figura 5.17 TGA de muestras de roca representativas de las seis zonas de muestreo: zona Singuilucan (S2), zona Santiago (PR6 y R7), zona Zempoala (CT), zona Mixquiahuala (MIX1), zona Tezontepec (HUIT) y zona Huasca (ATO2 y HUA1) .....	60
Figura 5.18 DTG de muestras de roca representativas de las seis zonas de muestreo: zona Singuilucan (S2), zona Santiago (PR6 y R7), zona Zempoala (CT), zona Mixquiahuala (MIX1), zona Tezontepec (HUIT) y zona Huasca (ATO2 y HUA1) .....	61
Figura 5.19 ATG de fibras comerciales analizadas utilizadas como aislante térmico (FV01-rojo, FV02-negro y LR-azul).....	62
Figura 5.20 Primera derivada DTG fibras comerciales analizadas utilizadas como aislante térmico (FV01-rojo, FV02-negro y LR-azul).....	63
Figura 5.21 Apariencia de las fibras comerciales posterior a su análisis por ATG .....	64
Figura 5.22 Mapeo de los elementos que conforman la fibra de vidrio FV01, 500X, 15Kv .....	67
Figura 5.23 Mapeo de los elementos que conforman la fibra de vidrio FV02, 5000X, 15Kv .....	68
Figura 5.24 Mapeo de los elementos que conforman la fibra LR, 500X, 15Kv .....	69
Figura 5.25 Mapeo de los elementos que conforman la fibra cerámica MOR, 500X, 15Kv .....	70
Figura 5.26 Mapeo de los elementos que conforman la fibra obtenida en laboratorio FLAB, 100X, 20 Kv .....	71
Figura 5.27 Micrografías de la muestra de fibra de vidrio FV01, a) 300X, b) 500X .....	73
Figura 5.28 Micrografías de la muestra de fibra de vidrio FV02, a) 300X, b) 500X .....	73
Figura 5.29 Micrografías de la muestra de fibra de lana de roca LR, a) 300X, b) 500X.....	74
Figura 5.30 Micrografías de la muestra de fibra cerámica MOR, a) 300X, b) 500X .....	75
Figura 5.31 Micrografías de las fibras obtenidas en laboratorio, a) 300X WD 13mm, b) 500X WD 6mm .....	75
Figura 5.32 Micrografías de las fibras obtenidas en laboratorio, a) 50X WD 25mm, b) 190X WD 13mm .....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 2.1 Composición química y mineralógica del basalto; .....	5
Tabla 2.2 Resultados del análisis químico de tres tipos de roca basáltica .....	11
Tabla 2.3 Descomposición térmica de fibras.....	15
Tabla 5.1 Coordenadas de localidades de muestreo .....	33
Tabla 5.2 Fases minerales cristalinas mayoritarias, minoritarias e indicios determinadas en muestras de basalto.....	41
Tabla 5.3 Composición química de las treinta muestras de roca basáltica expresada en % peso de óxidos mayoritarios .....	44
Tabla 5.4 Contenido estimado de minerales en % peso de las treinta muestras de basalto analizadas de acuerdo a la norma CIPW .....	47
Tabla 5.5 Clasificación de las rocas de acuerdo a su contenido normativo de Q: cuarzo, A feldespatos alcalinos, P: plagioclasas y F: feldespatoídes. ....	48
Tabla 5.6 Módulos de acidez y viscosidad de las muestras de roca .....	55
Tabla 5.7 Análisis químico por ICP de fibras comerciales analizadas.....	65
Tabla 5.8 Comparativo del mapeo elemental de fibras comerciales con las fibras obtenidas en laboratorio expresado en % peso de elementos identificados.....	67
Tabla 5.9 Comparativo en % peso de óxidos entre las fibras comerciales y la fibra obtenida en laboratorio.....	72
Tabla 7.1 Fórmulas estructurales de minerales identificados por difracción de rayos X en las rocas de basalto.....	86

## ÍNDICE DE ECUACIONES Y REACCIONES

Ecuación 2.1.....	14
Ecuación 2.2.....	17
Ecuación 2.3.....	17
Ecuación 4.1.....	28
Ecuación 4.2.....	29
Reacción 5.1 .....	59
Reacción 5.2 .....	60

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se estudiaron muestras de roca basáltica de diferentes localidades del estado de Hidalgo, divididas en seis zonas (Singuilucan, Santiago, Zempoala, Mixquiahuala, Tezontepec y Huasca), caracterizándolas por técnicas analíticas convencionales como: microscopía óptica de polarización (MOP), difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX), lo que permitió determinar la calidad del material de cada localidad para producir fibra mineral.

Se realizaron pruebas a temperaturas de hasta 1200 °C encaminadas a aproximar el punto de ablandamiento de las muestras; de igual forma se realizó un análisis termogravimétrico (ATG) de al menos una muestra por cada zona para determinar sus propiedades refractarias e identificar su pérdida de masa en una atmósfera controlada. Se determinaron los módulos de acidez y viscosidad, utilizando como base los datos del análisis químico por (FRX), fue posible identificar las muestras con mejores propiedades para el proceso de fibrado. Se elaboró un diagrama *TAS (Total alkali silica)*, en el cual se identificó el tipo de roca de acuerdo a ésta clasificación, basado en el contenido en % peso de  $\text{SiO}_2$  y el contenido de  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ , así como la aplicación de la norma CIPW que permite estimar el contenido de minerales formadores de las rocas. Estos resultados sirvieron de base para la identificación de las rocas analizadas en un diagrama *QAPF* basado en el contenido en % peso de cuarzo, plagioclasa, feldespato alcalino y feldespatoideos.

En los resultados obtenidos por DRX, se identificaron fases minerales cristalinas mayoritarias de plagioclasas y piroxenos, las cuales fueron confirmadas con los resultados de la aplicación de la norma CIPW. Por FRX se identificaron a las zonas Zempoala y Huasca como las que presentan mayor contenido en % peso de  $\text{SiO}_2$ , la zona Singuilucan con mayor proporción de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , la zona Mixquiahuala con mayores contenidos de  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  y el mayor contenido de álcali ( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ ), se presentó en las zonas de Tezontepec y Huasca. El diagrama *TAS*

permitió identificar y clasificar a las muestras, principalmente como traquibasalto, tefrita basanita y basalto traquiandesítico. Las muestras de basalto analizadas por MOP mostraron en su mayoría, que están constituidas por plagioclasa calcosódica, olivino y piroxeno. El análisis termogravimétrico permitió identificar cambios de masa asociados a la naturaleza de las muestras analizadas. Se diseñó un equipo (prototipo) basado en el proceso de fibrado rotacional en el cual se obtuvieron fibras de basalto utilizando como materia prima una muestra de basalto de la zona Huasca. Esta fue comparada en cuanto a su morfología y contenido elemental con cuatro muestras de fibras comerciales analizadas por microscopia electrónica de barrido (MEB) a través de un mapeo elemental y/o cartografía elemental química.

## ABSTRACT

In the present research study, various samples of basaltic rock from different locations of the state of Hidalgo were studied, divided into six zones (Singuilucan, Santiago, Zempoala, Mixquiahuala, Tezontepec and Huasca), and characterized using conventional, analytical techniques such as: polarization optical microscopy (POM), X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF). This allowed the determination of the material's quality according to each locality in order to produce mineral fiber.

Different tests were carried out with temperatures as high as 1200 °C in an attempt to approximate the softening point of these samples; likewise, a thermo gravimetric analysis (TGA) of at least one sample per zone was carried out to determine its refractory properties as well as to identify its mass loss in a controlled atmosphere. The acidity and viscosity modules were calculated based on the chemical analysis data by (XRF). Due to the results it was possible to identify which samples had the best properties for the fiberization process. A TAS (total alkali silica) diagram was developed, in which the type of rock was identified according to this classification, which is based on the content of weight percentage of  $\text{SiO}_2$  and the content of  $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ . The application of the CIPW norm was also carried out, which permitted the estimation of the mineral-forming rocks content. These results served as the basis for the identification of rocks analyzed in a QAPF diagram based on the content in weight percentage of quartz, plagioclase, alkali feldspar and feldspathoids.

In the results obtained by XRD, major crystalline mineral phases of plagioclase and pyroxene were identified, which were confirmed with the results of CIPW standard. The XRF results revealed that the Zempoala and Huasca areas had the highest content in weight percentage of  $\text{SiO}_2$ . The Singuilucan zone shows the highest proportion of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , the Mixquiahuala area had the highest CaO and MgO contents, and the highest alkali content  $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  was found in the Tezontepec and Huasca areas. The TAS diagram allowed identify and classify the samples,

which was mainly trachybasalt, basanite tephrite and trachyandesitic basalt. The basalt samples analyzed by POM mostly demonstrated that they are constituted by calc-sodium plagioclase, olivine and pyroxene. The thermo gravimetric analysis allowed for the identification of mass changes associated with the nature of the samples analyzed. A prototype was designed, based on the rotational fiber process in which basalt fibers were obtained using a basalt sample from the Huasca area as raw material. This was compared in morphology and elemental content to four other samples of commercial fibers which were analyzed with a scanning electron microscopy (SEM) through elementary mapping.

## 1. INTRODUCCIÓN

La necesidad del hombre por descifrar el funcionamiento de la naturaleza lo ha llevado a buscar la manera de mejorar las condiciones de vida del género humano, buscando siempre la obtención de mejores materiales que satisfagan sus necesidades, reduciendo costos, mejorando su desempeño y siendo respetuosos del medio ambiente.

Las observaciones de campo han conducido a los geólogos a dividir las rocas de la tierra en: ígneas, sedimentarias y metamórficas; las de interés para la presente investigación son las primeras, cuyo nombre proviene del latín *ignis*, fuego; dentro de las cuales se ubican las rocas volcánicas, incluido el basalto (Huang, 1968). El basalto es de color oscuro (composición máfica), se forma por enfriamiento rápido del magma expulsado del manto por los volcanes; es más abundante que cualquier otra roca ígnea en la corteza terrestre (cerca del 70%). Está constituido por silicatos de magnesio, hierro y sílice. Presenta a menudo una textura porfídica con fenocristales de olivino, augita, plagioclasa y una matriz cristalina afanítica.

El basalto sin procesar, a lo largo de la historia ha sido utilizado como material de construcción en diferentes culturas, entre ellas: el Antiguo Egipto, el pueblo de Rapanui en la Isla de Pascua y los Olmecas en nuestro país; en la obra de ingeniería denominada “*acueducto del padre tembleque*”, que data de mediados del siglo XVI y se ubica en los límites del estado de Hidalgo y el estado de México, la cual fungió como medio para suministrar agua proveniente de Hidalgo hacia la localidad de Otumba en el estado de México, se utilizó basalto para edificar el acueducto y para aislar el canal de suministro de agua del exterior. En la actualidad es importante resaltar su uso en adoquines para pavimento urbano, construcción de carreteras y como roca ornamental

La roca basáltica al ser fundida y a través de métodos conocidos por estiramiento o centrifugado, puede ser transformada en fibras que permiten su aplicación en diversas áreas; en algunos países de la Unión Europea, Estados Unidos de

Norteamérica, y en general, en regiones con climas extremos, la fibra de basalto se utiliza como aislante térmico y acústico en paredes. Buratti et al, (2015) realizaron la caracterización térmica y acústica de fibras de basalto con diferentes densidades, obteniendo valores promedio en su conductividad térmica de 0.033 W/mK para densidades de alrededor de 173 kg/m<sup>3</sup>. Algunos tipos de fibras de basalto han sido procesadas con otros materiales que permiten mejorar sus propiedades, generando materiales compuestos, como son: hilos de alta resistencia, varillas reforzantes, componentes de fricción para automóviles, entre otros.

En México, las rocas basálticas tienen una amplia distribución en la parte central del país y comprenden algunos estados desde la región occidental hasta la oriental del mismo. Estas rocas corresponden a la provincia Fisiográfica denominada Eje Neovolcánico, conocido también como Sistema Volcánico Transversal, el cual constituye una de las principales cadenas montañosas de México. Esta forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico y posee aproximadamente unos 900 km de longitud y una anchura de unos 150 km. El estado de Hidalgo cuenta con una gran potencial de este tipo de material rocoso (basalto) hacia la porción centro-sur, de la cual fueron recolectadas treinta muestras de roca para su análisis en el presente estudio.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Clasificación del basalto según su origen

Las rocas ígneas están formadas por una masa fundida que en un tiempo estuvo caliente, conocida como magma o lava, la cual se enfrió y cristalizó para formar una roca compuesta de agregados minerales de silicatos<sup>1</sup>. Las erupciones de lava fundida que sale de los volcanes y se deposita sobre la superficie de la tierra, o corrientes de lava, dan origen a las rocas extrusivas (rocas volcánicas). Pero hay otras clases de rocas ígneas, las masas de roca ígnea que se forman por cristalización lenta del magma a una cierta distancia debajo de la superficie, originando las rocas intrusivas (rocas plutónicas); tales rocas aparecen expuestas hoy solamente porque la erosión ha quitado las rocas que yacían encima de ellas y que una vez las cubrieron durante su formación (Huang, 1968).

La roca de basalto es una roca ígnea volcánica de color oscuro (composición máfica), siendo una de las más abundantes en la corteza terrestre, se forma por enfriamiento rápido del magma expulsado del manto por los volcanes. Los magmas primarios se pueden clasificar atendiendo a la cantidad de sílice en: *magma ácido o félsico*.

El magma ácido presenta un alto contenido en sílice (entre un 60 y 77%). Es rico en iones de sodio y potasio, viscoso, suele consolidar en el interior de la corteza formando granito y riolita y está asociado a las zonas de subducción<sup>2</sup>.

*Magma intermedio*, es un magma que contiene entre el 50 y 60% de sílice. Es menos viscoso que el magma félsico. Sus lavas originan rocas como la andesita. Si cristaliza en el interior de la litosfera forma la diorita.

*Magma básico o máfico*, es el que posee menor proporción de sílice (menos del 50%). Son ricos en iones de calcio y magnesio. Es un magma fluido que se localiza en las zonas de dorsal y forma rocas como el basalto y el gabro.

---

<sup>1</sup> El tetraedro es una unidad fundamental de todas las estructuras de los silicatos, y está constituido por un ión de silicio situado en el centro y iones oxígeno en las cuatro esquinas (Huang, 1968).

<sup>2</sup> Deslizamiento del borde de una placa de la corteza terrestre por debajo del borde de otra.

El basalto es una roca que está constituida principalmente por sílice y silicatos de magnesio y de hierro. Presenta a menudo una textura porfídica con fenocristales de olivino, augita, plagioclasa y una matriz cristalina afanítica. El basalto es la roca volcánica más común y supera en cuanto a superficie cubierta en la tierra a cualquier otra roca ígnea (cerca del 70 %).

Está formado por abundantes minerales oscuros como, el piroxeno y olivino, que hacen que el basalto sea de color gris o negro obscuro. El basalto también tiene cantidades menores de minerales de color claro como el feldespato y el cuarzo. El peso del basalto contiene menos del 52 % en cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). La mayoría de los cristales de estos minerales son muy pequeños para poder ser vistos a través de un microscopio, ya que el alto grado de enfriamiento previene que los cristales grandes se formen. El basalto se forma cuando la lava llega a la superficie de la Tierra proveniente de un volcán o de una cordillera en medio del océano. Cuando llega a la superficie, la lava se encuentra a temperaturas que oscilan entre los 1100 a 1250 °C, pero se enfría rápidamente, en unos días o un par de semanas, convirtiéndose en roca sólida. La lava muy gruesa puede tardar muchos años en solidificarse totalmente. En la figura 2.1 se ubica el basalto dentro de la clasificación de rocas ígneas volcánicas.

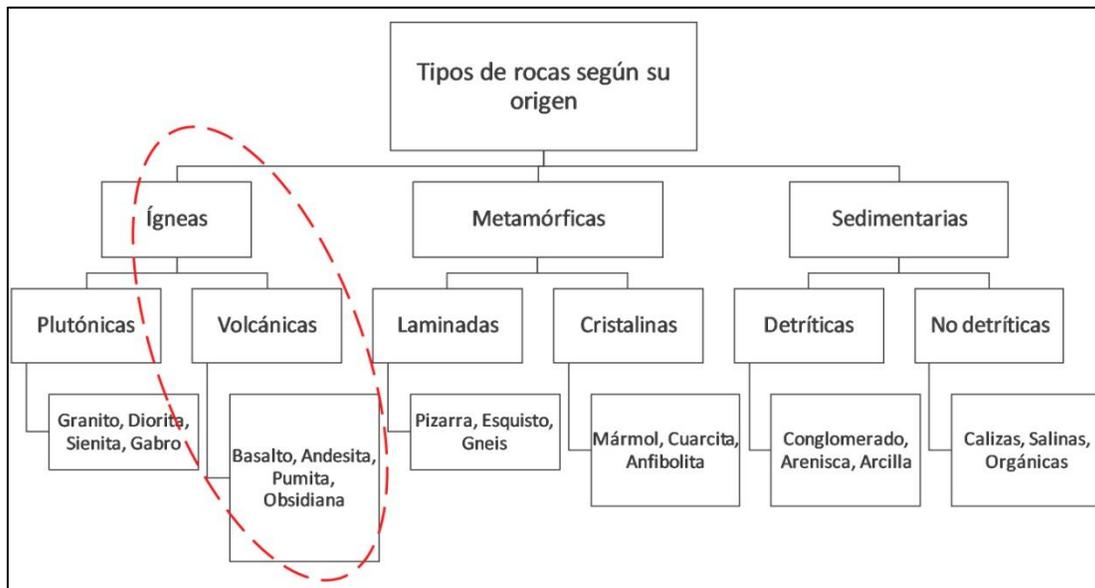


Figura 2.1 Clasificación del basalto según su origen

## 2.2 Características mineralógicas del basalto

El basalto es de color oscuro y rico en hierro y magnesio, está formado por abundantes minerales oscuros como el piroxeno y el olivino, y tiene cantidades menores de minerales de color claro como feldespatos y cuarzo (Ecured, 2018). Aunque el basalto puede ocurrir en forma de vidrio, sin o con muy pocos cristales, a menudo contiene fenocristales de olivino, augita y plagioclasa. Los basaltos generalmente tienen una textura porfídica con los fenocristales anteriormente mencionados y emplazados en una matriz cristalina fina.

De acuerdo a los datos de los análisis químicos realizados en 3594 muestras de basalto (Le Maitre, 1976), el ejemplo en promedio de una composición química de basalto expresada en porcentaje de masa de óxidos se muestra en la Tabla 2.1, así como la composición media, química (a) y mineralógica (b) de las rocas basálticas, de acuerdo al estudio de Mingarro (1992).

Tabla 2.1 Composición química y mineralógica del basalto;  
 a) (Le Maitre, 1976), b) (Mingarro, 1992)

Composición química % en peso			Composición mineralógica % en peso (b)	
	(a)	(b)		
<b>SiO<sub>2</sub></b>	49.97	44-50	Ortosa (Or)	6-27
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1.87	1-3	Albita (Ab)	8-30
<b>AlO<sub>3</sub></b>	15.99	14-16	Anortita (An)	18-20
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.85	3-4	Nefelina (Ne)	2-13
<b>FeO</b>	7.24	5-8	Diopsido (Di)	11-22
<b>MnO</b>	0.20	0.1-0.2	Hiperstena (Hy)	0-16
<b>MgO</b>	6.84	4-9	Olivino (Ol)	1-13
<b>CaO</b>	9.62	7-10	Magnetita (Mt)	5-7
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	2.96	3-4	Ilmenita (Il)	3-5
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1.12	1-5	Apatito (Ap)	0-2
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.35	0.3-1	Calcita (Cc)	0-0.5
<b>CO<sub>2</sub></b>	-	0-0.2		

La temperatura de fusión de la mayoría de los minerales que constituyen el basalto sobrepasan los 1500 °C, sin embargo la fusión de sus mezclas disminuyen la temperatura de fusión de la roca. Los puntos de fusión estipulados para estos minerales varían desde los 1118 °C de la albita hasta los 1686 °C de la leucita, debido a esto la temperatura de fusión aproximada para un basalto, se encuentra alrededor de (1100 °C - 1300 °C). (Mingarro, 1992).

### 2.3 Las fibras de basalto

Se denominan fibras a las partículas elongadas cuya longitud es varias veces superior al diámetro (Arroyo, 2003). El concepto de fibra se refiere a un filamento sintético de diversa naturaleza y distintas aplicaciones industriales (RAE, 2018). En la Figura 2.2 se muestra una clasificación general de las fibras, ubicando a las fibras de basalto y a la lana mineral dentro de los tipos de fibras inorgánicas de estructura no cristalina.

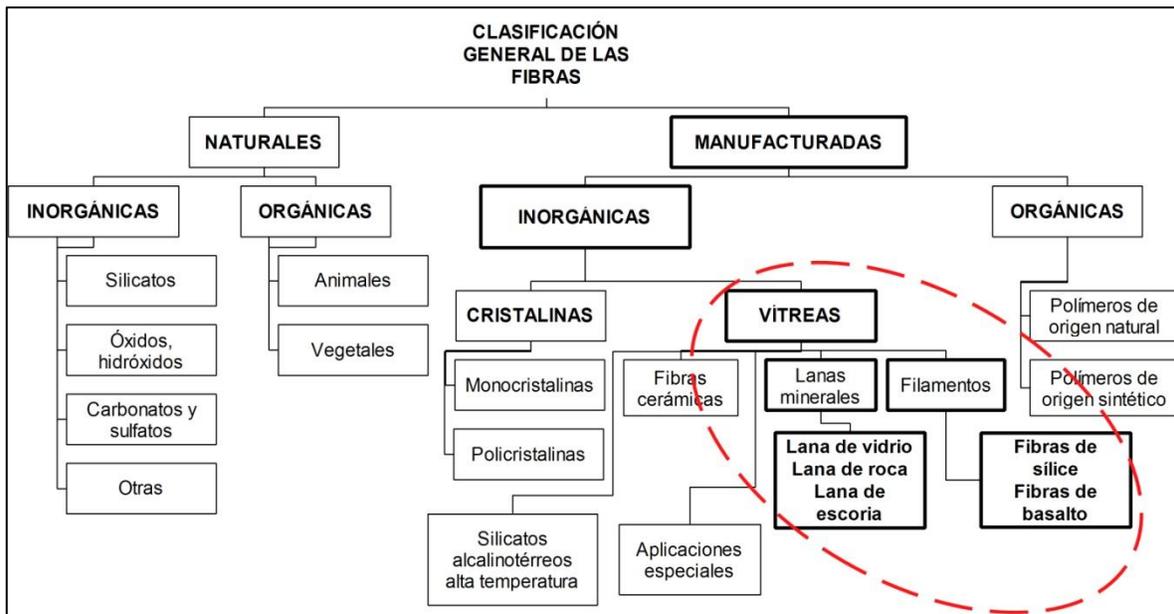


Figura 2.2 Clasificación general de las fibras

Los filamentos o fibras continuas son fibras de diámetro muy uniforme, adecuados para tejidos, a diferencia de la lana mineral que se puede definir como masas de fibras entrelazadas y sin ningún tipo de disposición ordenada, el diámetro de estas fibras es menos uniforme que el de los filamentos (Arroyo, 2003).

El primer intento de utilización del basalto en forma de fibra se debe a la corporación Johns-Manville. Durante la década de 1920-1930 intentaron hilar roca basáltica para obtener hilos que pudieran utilizar en textiles ignífugos. Con este primer trabajo se demostraron dos aspectos fundamentales de este material: la dificultad para hilarlo en forma de filamento continuo y las superiores prestaciones

térmicas comparadas con la fibra de vidrio de la época. El hito fundamental en el desarrollo de la fibra de basalto se produce a partir de 1960, en plena Guerra Fría, cuando se convierte en un material estratégico en el ámbito militar. En esta época ambas potencias tenían el mismo problema en el desarrollo de los escudos térmicos de los misiles balísticos intercontinentales (ICBM's) por sus siglas en inglés (*intercontinental ballistic missile*). La reentrada en la atmósfera de los ICBM's se produce a velocidades próximas a los 30.000 km/h, generando, por fricción con la atmósfera, temperaturas extremas, superiores a las que puede soportar la fibra de vidrio (800 °C). Para solucionar este problema se necesitaban materiales ligeros que pudieran resistir estas temperaturas extremas. Estados Unidos optó por el desarrollo de la fibra de carbono, mientras que la Unión Soviética se interesó por el desarrollo de la fibra de basalto. Desde el inicio del interés por el desarrollo de la fibra de basalto (década de 1960) hasta la aparición de las primeras patentes de un proceso controlado para la producción de este material (década de 1990) se han realizado múltiples estudios para dominar esta tecnología. Como queda de manifiesto, existe una gran diferencia temporal entre los procesos patentados de obtención de fibra de vidrio (década de 1930) y los de fibra de basalto (Poveda, 2012).

## **2.4 Aplicaciones de la fibra de basalto**

Dentro de los usos más comunes de la fibra de basalto y la lana de roca, se encuentran aquellos relacionados con sus propiedades de aislamiento térmico y acústico, debido a su baja conductividad térmica, en un rango de entre 0.030-0.034 W/mK (Buratti et al, 2015), algunas otras aplicaciones se mencionan a continuación:

### **2.4.1 Aislante térmico**

Capaz de soportar temperaturas de hasta 982 °C, el fieltro de fibras de basalto ha sido utilizado como aislante térmico en aplicaciones, como: sistemas de escape de motor, en distintos tipos de hornos, turbinas, como un reemplazo seguro de las fibras de asbesto, como protección y en la contención de incendios en refinerías y plataformas petrolíferas y como aislante en refrigeración.

El fieltro de basalto proporciona una conductividad térmica muy baja y puede soportar temperaturas de trabajo continuas superiores a 816 °C, por lo que es un material flexible que garantiza un rendimiento excepcional a altas temperaturas. Con una excelente capacidad de deslizamiento, se ajusta a superficies irregulares para satisfacer una variedad de necesidades de diseño, mientras que sus propiedades químicas y físicas lo hacen altamente duradero y seguro (Sudaglass, 2018).

Entre estas propiedades resaltan las siguientes: alta absorción de sonido para reducción de ruido, el diámetro del filamento no es respirable, alrededor de 13  $\mu\text{m}$ , poseen una alta resistencia a ambientes alcalinos y ácidos (superando la mayoría de las fibras minerales y sintéticas) y absorben una insignificante cantidad de humedad ambiental (menos del 1% al 65% de humedad relativa del aire).

#### **2.4.2 Mallas de refuerzo**

Las mallas de refuerzo de basalto ofrecen una serie de ventajas sobre las mallas de metal o de fibra de vidrio utilizadas para el refuerzo de pavimento, debido a sus propiedades, ya que soportan altas temperaturas de asfalto fundido, tienen una alta resistencia y durabilidad, son químicamente inertes y resistentes a ambientes alcalinos y corrosivos, no dañan las llantas si están expuestas a la superficie de la carretera y son 2.7 veces más livianas que las mallas metálicas, para un manejo más fácil y costos de transporte reducidos.

#### **2.4.3 Filamentos de fibra continua**

Los filamentos de fibra continua son durables, resistentes al calor y tienen propiedades excepcionales cuando se utilizan en configuraciones tejidas, rellenas o cortadas.

Son ideales para aplicaciones de alto rendimiento, como: refuerzo de hilo continuo para materiales compuestos que mejoran su resistencia integral y proporcionan tolerancia a altas temperaturas, tejidos especiales para protección contra incendios, refuerzo de tuberías y recipientes de alta presión y temperatura, ideales para aplicaciones de aislamiento en plantas de generación de energía nuclear y aparatos de rayos X debido a su inmunidad a la radiación.

Las principales propiedades de estos filamentos, son: buena resistencia a la tracción, buena elasticidad y resistencia a la fatiga, su bajo alargamiento bajo carga proporciona muchas veces tenacidad específica que supera las fibras de acero, sin riesgos cancerígenos, no se divide longitudinalmente, son inertes, resistentes a la corrosión y no son tóxicos, son inmunes a la radiación nuclear, luz ultravioleta y contaminación biológica, además de tener un bajo coeficiente de fricción.

#### **2.4.4 Telas contra incendios**

Tejidos fabricados a partir de filamentos continuos de basalto, estos tejidos se fabrican en diferentes grosores, pesos, diseños de tejido y técnicas de tejido de acuerdo con los requisitos de uso final, sus principales características son: buenas propiedades de adhesión para recubrimientos, no es combustible, mantiene la integridad a temperaturas de hasta 982 °C y resisten a la radiación electromagnética.

Su alto rendimiento les permite tener aplicaciones desde la vestimenta hasta la construcción, algunas de las más importantes son: cortinas contra incendios, ropa ignífuga, refuerzo en materiales compuestos y escudos electromagnéticos.

#### **2.4.5 Barras de refuerzo**

Varillas hechas de un compuesto unidireccional de fibras de basalto que ofrecen ventajas significativas sobre barras de refuerzo de acero en una variedad de aplicaciones, ingeniería hidráulica, refuerzo de carretera, barreras de concreto y losas de revestimiento.

Se resaltan las siguientes características: mayor resistencia específica que la barra de refuerzo de acero y un 89 % más ligeras, resistentes a la corrosión, mismo coeficiente de expansión térmica que el concreto, las varillas de basalto son compatibles con concretos que tienen diferentes valores de pH.

### **2.5 Fuentes de energía utilizadas para fundir la roca basáltica**

Las principales fuentes de energía utilizadas en la industria de generación de fibras de roca y escoria son: gas- carbón y energía eléctrica; un horno cupola con

fuelle de energía de carbón utilizado para fundir rocas y escorias, logra alcanzar temperaturas entre 2200 y 2500 °C, por encima de la temperatura promedio de un horno de arco eléctrico, sin embargo el horno de arco eléctrico es el más utilizado en la industria, generalmente utiliza tres electrodos para realizar el fundido, aunque es posible realizar una adaptación del principio de arco eléctrico con un par de electrodos (Ohberg, 1987).

## 2.6 Principales métodos de obtención de fibra mineral

La mayoría de los métodos utilizados para la generación de fibra mineral deben cumplir con condiciones de fundido homogéneas, seguido de un vaciado que permita obtener las fibras con ayuda de fuerza centrífuga e inyección de aire o vapor a presión, los métodos más utilizados para obtención de fibra mineral, se mencionan en la Figura 2.3.

El proceso *Downey* divide el material fundido por fuerza centrífuga de un disco distribuidor, en las salidas del disco distribuidor se inyecta aire o vapor a presión que permite mejorar el proceso de fibrado, Figura 2.3 (a).

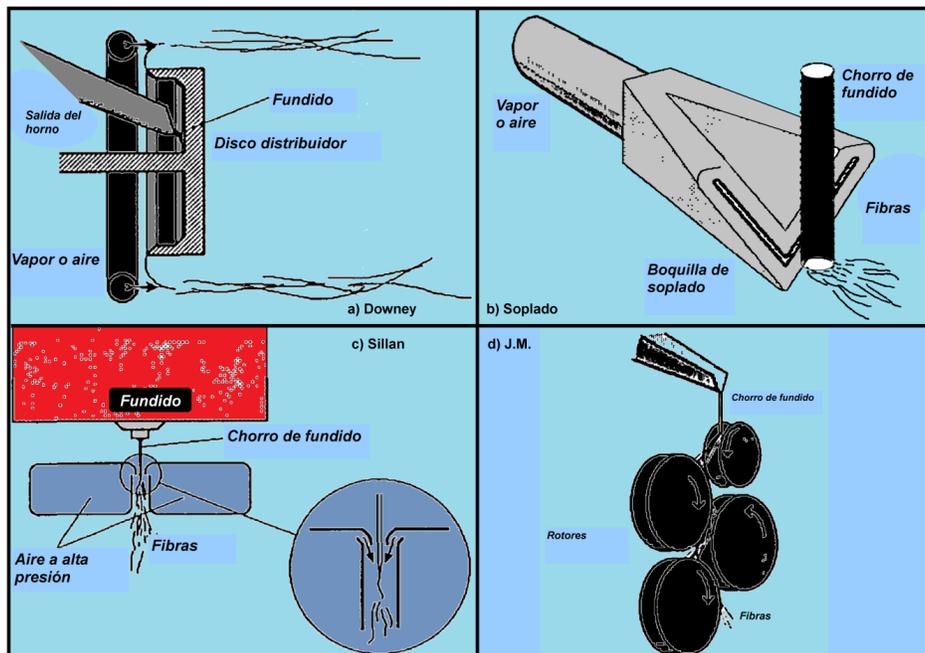


Figura 2.3 Principales métodos de obtención de fibra mineral, (Ohberg, 1987)

En la Figura 2.3 (b) se muestra el proceso de soplado, en el que el chorro de material fundido es expulsado por aire o vapor a presión proveniente de la boquilla de soplado, las gotas son dispersadas y se generan las fibras por estiramiento; el rango en diámetro de las fibras generadas es de 1  $\mu\text{m}$  hasta 40  $\mu\text{m}$ .

El proceso Sillan utiliza un horno balsa en la etapa de fundido del material, el flujo de la fundición cae por pequeños orificios para posteriormente ser expulsado por un par de corrientes de aire a presión, Figura 2.3 (c).

El proceso JM, Figura 2.3 (d) se introduce en la industria a principios de 1950, el material fundido cae en rotores que permiten el proceso de fibrado, en este método es posible adaptar flujo de aire a presión para mejorar su eficiencia, tiene una alta capacidad de fibrado, obteniendo diámetros de fibras más uniformes y es uno de los métodos más utilizados en Europa para la producción de lana de roca.

## 2.7 Estudios previos

Con la finalidad de determinar la factibilidad de utilizar basalto de los Montes Urales en Rusia como materia prima para fabricar fibra de basalto, se determinaron las propiedades físicas y químicas de la roca; identificando tres tipos de basalto: melanocrático, andesítico y calco-alcalino. La caracterización por DRX permitió identificar fases de albita, clorita, cuarzo, actinolita, epidota y calcita (Pisciotta et al, 2014). Los resultados del análisis químico para estas muestras de roca se presentan en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2 Resultados del análisis químico de tres tipos de roca basáltica  
 Psciotta et al, (2014)

Depósito	Contenido en % masa											
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	Sox	H <sub>2</sub> O
Basalto melanocrático	45.83	8.92	9.34	18.35	3.39	7.48	0.09	1.43	0.52	0.2	0.04	4.9
Basalto andesítico	49.92	15.96	10.52	8.22	2.8	6.44	0.64	2.21	0.68	0.13	0.03	2.24
Basalto calco-alcalino	47.29	16.85	10.39	6.5	9.87	-	0.96	3.61	0.61	-	-	-

Al realizar un análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) Pisciotta et al, (2014) evaluaron el proceso de fundido en una muestra de basalto melanocrático. El análisis térmico reveló una estrecha dependencia del comportamiento térmico de la materia prima con minerales secundarios. El análisis de la curva térmica fue realizado con datos de referencia sobre las propiedades térmicas de minerales y

rocas. El termograma muestra picos endotérmicos y exotérmicos. La pérdida de masa total durante el calentamiento a 1500 °C es insignificante (-4 %). El termograma muestra un pico endotérmico a 607.1 °C, lo que indica una pérdida de masa vinculado a la deshidratación de la capa de "brucita" en la clorita. El débil pico exotérmico a 856.0 °C y una pequeña pérdida de peso a 800-868 °C son debido a la deshidratación de la capa de clorita "talco" y su recristalización en actinolita. El débil pico endotérmico a 1020.4 °C, relacionado con una pequeña pérdida de peso a 974- 1043 °C, se debe a la destrucción de la estructura cristalina de actinolita y la formación parcial de hornblenda. El inicio de la fusión a 1109.3 °C muestra un gran pico endotérmico, seguido de una parcial recristalización de hornblenda peritética en diópsido. El pico endotérmico en 1247.4 °C marca una fusión peritética parcial y recristalización de diópsido en clinoenstatita. La fusión de la plagioclasa básica y augita-clinoenstatita presumiblemente causa curvas de calentamiento endotérmico 1287 y 1339 °C. El basalto se derrite totalmente a temperaturas de hasta 1430 °C, formando una fusión homogénea de baja viscosidad. La curva de enfriamiento indica un pico exotérmico inusual a 1139.4 °C, que es causado por la cristalización de clinopiroxeno (Figura 2.4). El proceso de cristalización comienza con la inmiscibilidad del líquido.

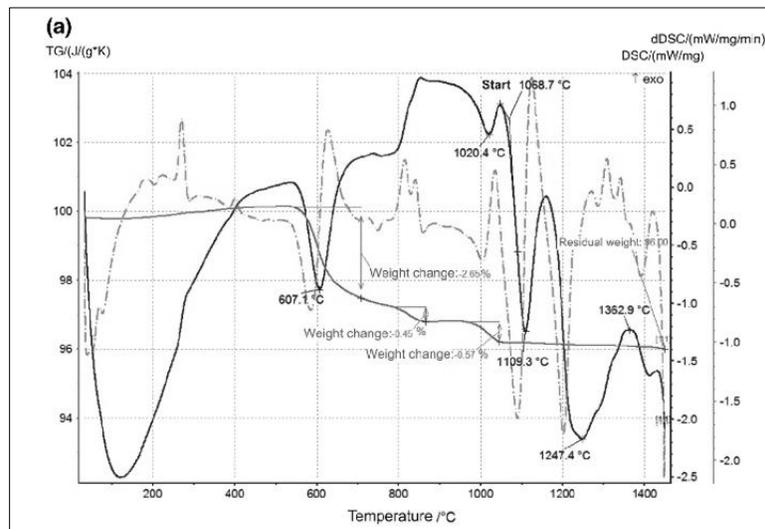


Figura 2.4 Proceso de fundido de basalto  
(Pisciotta et al., 2014)

Una de las fases líquidas (fase rica en hierro) promueve la formación de una primera fase de cristal con estructura de espinela (spinelide). Con un siguiente tratamiento térmico, una solución sólida de clinopiroxeno precipita en cristales de espinela, que actúan como núcleos para la cristalización.

Con la finalidad de conocer las propiedades de fundido del basalto fue realizado un estudio en el que fue considerada la temperatura de inicio del fundido, la temperatura de fundido, el proceso de fundido y la homogeneización del fundido, para este análisis, utilizaron muestras de andesita, basalto andesítico, basalto toleítico y un basalto alcalino (Chen et al., 2017). Para calcular el porcentaje en peso de minerales y minerales potenciales basados en las composiciones químicas de las rocas utilizaron la norma CIPW<sup>3</sup>, la cual es un método relativamente preciso que generalmente es utilizado en el cálculo de los componentes minerales de las rocas. Los resultados mostraron que, las andesitas y el basalto andesítico se compone principalmente de cuarzo, ortoclasa, plagioclasas e hiperstenas, pero no de olivino. Una segunda muestra de basalto andesítico y el basalto toleítico estaban compuestos principalmente de plagioclasas, diópsido e hiperstena, pero no de olivino. Los basaltos alcalinos resultaron estar compuestos principalmente de ortoclasa, plagioclasas, nefelina, diópsido y de olivino.

Un estudio realizado por Cáceres et al., (1996), mostró la obtención de fibras de lana de roca a partir de muestras de basalto olivínico augíticos y un traquibasalto, de acuerdo a la clasificación TAS (sílice frente a suma de álcalis), inicialmente analiza la relación viscosidad- temperatura estimada a partir de la composición química del basalto, usando el modelo propuesto por Lakatos para silicatos fundidos formadores de lana mineral

(Blagojevic et al., 2004) Utilizaron el modelo de regresión de Lakatos para calcular la dependencia de la temperatura de la viscosidad del fundido según su

---

<sup>3</sup> Sistema de clasificación de rocas ígneas propuesto por Cross, Iddings, Pirsson y Washington en 1903.

composición química. El modelo está diseñado para el cálculo de las temperaturas  $T$  °C cuando la viscosidad de la masa fundida alcanza valores de  $\log \eta = 1.5, 2.0$  y  $2.5$  dPas. Estas temperaturas pueden determinarse con la ayuda del modelo de Lakatos mostrado en la Ecuación 2.1:

$$T = A \left( \frac{b_0 - SiO_2 - b_1 \cdot Al_2O_3}{b_2 \cdot CaO + b_3 \cdot MgO + b_4 \cdot Alk + b_5 \cdot FeO + b_6 \cdot Fe_2O_3} \right) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Con el fin de investigar la resistencia a ambientes alcalinos de la fibra de basalto, Sim, (2005) realizó un comparativo con tres tipos diferentes de fibras (basalto, vidrio y carbono), éstas se sumergieron en una solución de NaOH, por 7, 14, 21 y 28 días. Después de los periodos de inmersión, la cantidad erosionada fue determinada cuantitativamente como una reducción en volumen basada en una imagen de MEB. Una vez finalizada la investigación en MEB, las muestras de fibra se lavaron con agua destilada y después se secaron durante un día a una condición de laboratorio antes de la prueba de resistencia a la tracción. Para acelerar la actividad de álcali, las soluciones se mantuvieron a 40 °C en un horno. Las fibras de vidrio y de basalto tienden a perder su fuerza conforme aumenta el tiempo de exposición. Las tasas de reducción de la fuerza se calculan a partir de los datos medidos utilizando una técnica de regresión lineal. La tasa de la reducción de la resistencia de la fibra de vidrio fue dos veces más rápido que la fibra de basalto.

Los resultados obtenidos en un análisis termo gravimétrico TGA realizado por Hao et al, (2011), entre fibras de basalto y fibras de vidrio mostraron que la pérdida de masa ocurre en el rango de temperatura de 200 - 350 °C para ambas fibras, tal como se muestra en el termograma de la Figura 2.5.

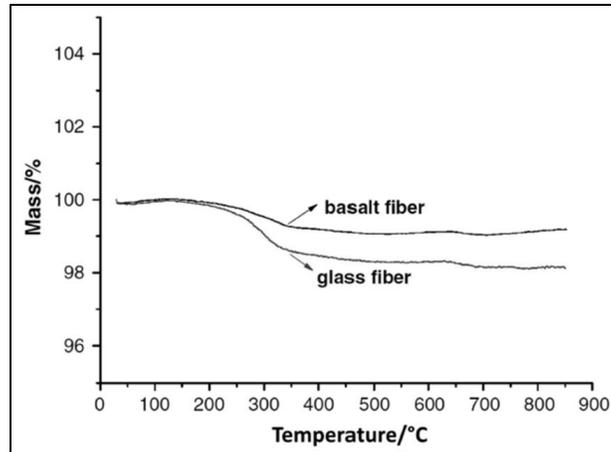


Figura 2.5 Pérdida de masa en análisis TGA en fibra de vidrio y de basalto

Sin embargo, la fibra de basalto tiene una mejor estabilidad térmica que la fibra de vidrio. En la Tabla 2.3, se describen los parámetros de la descomposición térmica de las fibras a partir del análisis de las curvas TG (desde la temperatura de inicio de la descomposición  $T_i$ , hasta la temperatura a la cual la pérdida de masa es máxima,  $T_t$  descomposición terminal).

Tabla 2.3 Descomposición térmica de fibras  
 (Hao et al., 2011)

Variable	Fibra de vidrio	Fibra de basalto
$T_o$ (°C)	163.3	204.9
$T_i$ (°C)	300.8	324.1
$T_t$ (°C)	850.3	795.7
Masa original (mg)	7.74	8.67
Pérdida de masa (%)	1.76	0.74

En un estudio realizado por Kim et al., (2013), se plantea un sistema de fusión-hilado para producir fibras de basalto mediante la aplicación de un calentamiento dieléctrico fuente, junto con un suscepto<sup>4</sup> de SiC, un bloque de hilatura de crisol, y un dispositivo de almacenamiento. Para el proceso fusión-hilado se usa calor de microondas. También derivó un modelo dinámico para la fabricación de fibra de basalto, aplicando masa, momento y balances de energía considerando los efectos de enfriamiento. La dependencia de la temperatura en función de la viscosidad del basalto fundido la representó usando la fórmula de Arrhenius. Para

<sup>4</sup> Material utilizado por su capacidad de absorber energía electromagnética y convertirla en calor (en ocasiones está diseñado para ser re-emitido como radiación térmica infrarroja)

verificar la exactitud del modelo teórico, identificó los perfiles de diámetro de las fibras de basalto a lo largo del hilado, calculado sobre la base del modelo de forma estable y comparó los resultados con experimentos.

A partir de las mediciones de los perfiles de diámetro de la fibra de basalto a lo largo de la línea de hilado para varias velocidades de recogida, confirmó que el hilado por fusión de fibras de basalto queda descrito por el modelo teórico. El diámetro de la fibra permaneció casi constante en el resto de la zona de hilatura debido a la solidificación del basalto. A medida que aumentaba la velocidad de recogida, el diámetro de la fibra de basalto disminuyó con la relación de una raíz cuadrada, lo que indicó que el efecto gravitacional sobre el hilado por fusión podría ser afectado debido a la fusión y viscosidad del basalto.

Con el fin de estudiar la corrosión, comportamiento y mecanismo de formación de fisuras de la fibra de basalto, Nasir et al., (2012) realizaron una investigación, en la que fibras de basalto se mantuvieron en 5% en peso de ácido sulfúrico en diferentes tiempos de inmersión. Posteriormente, se retiraron de la solución y se enjuagaron con agua desionizada y finalmente se secaron a temperatura ambiente, se realizó el mismo procedimiento para fibras de vidrio, obteniendo los siguientes resultados: la resistencia a la tensión de la fibra de basalto y la fibra de vidrio aproximadamente es la misma, pero la degradación de la resistencia de la fibra de vidrio es más severa en la fibra de vidrio en comparación con la fibra de basalto. Como resultado, es muy recomendable utilizar la fibra de basalto como reemplazo de la fibra de vidrio en ambientes corrosivos.

Para evaluar el grado de acidez y viscosidad Perevozchikova et al., (2014) desarrollaron un análisis químico de rocas basálticas, calculando el módulo de acidez a partir de la Ecuación 2.2 y el módulo de viscosidad con la Ecuación 2.3, en dicho análisis se realiza una clasificación del tipo de fibras que podrían generarse a partir de los valores obtenidos en el módulo de acidez, para un valor en  $M_a$  menor a 1.8 se consideraría factible su aplicación para lana mineral, la cual

es frágil, pero con propiedades de aislamiento. Para un  $M_a$  mayor a 1.8 debe ser llamada lana de roca, cuando el material es basalto, será llamado lana de basalto (fibra de basalto). Concluyendo que bajos parámetros de acidez y viscosidad indican la posibilidad de producir fibras frágiles con pobre resistencia química.

$$M_a = \frac{m_{SiO_2} + m_{Al_2O_3}}{m_{CaO} + m_{MgO}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

$M_a$  es el módulo de acidez y

$m$  representa la masa en % peso de cada óxido.

$$M_v = \frac{x_{SiO_2} + x_{Al_2O_3}}{2x_{Fe_2O_3} + x_{FeO} + x_{CaO} + x_{MgO} + x_{Na_2O}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

$M_v$  es el módulo de viscosidad y

$X$  representa la masa en % peso de cada óxido.

El basalto que se funde a una mayor viscosidad es menos cristizable que aquel que se derrite a una baja viscosidad y más adecuado para hacer fibras continuas, por lo tanto, el bajo valor de viscosidad en el basalto melanocrático reveló que no es adecuado para la producción de fibras continuas Perevozchikova et al., (2014).

Por otra parte (Blagojevic et al., 2004) Proponen un esquema de fibrado basado en el proceso de discos giratorios (Figura 2.6), en cual el proceso de fibrado se ve afectado por parámetros importantes para generar el flujo rotacional, donde la masa fundida cae sobre el primer disco generando una forma coaxial-cilíndrica en el fundido.

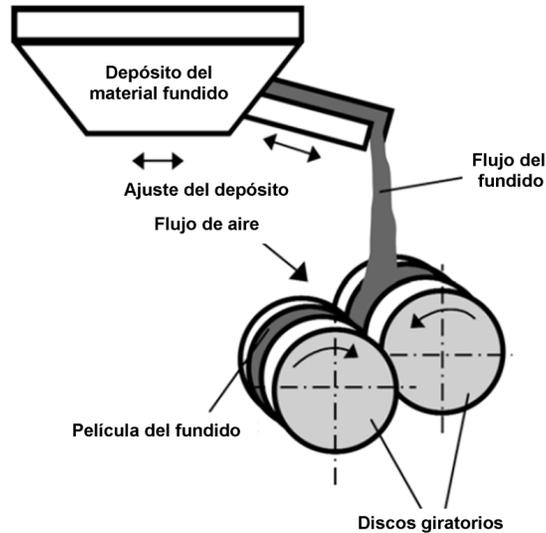


Figura 2.6 Diagrama de proceso de fibrado rotacional de doble disco  
(Blagojevic et al., 2004)

Los parámetros clave y números característicos del flujo de la masa dispersada, los cuales afectan el proceso de fibrado, son los siguientes:

- Densidad de fusión:  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ );
- Viscosidad dinámica:  $\eta$  ( $\text{kg/ms}$ );
- Tensión superficial:  $\sigma$  ( $\text{kg/s}^2$ );
- Radio del primer disco:  $R$  (m);
- Espesor de la película fundida en el disco:  $B$  (m);
- Velocidad rotacional del primer disco:  $\omega$  (rad/s);
- Índice del flujo de fusión:  $q_v$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Las propiedades físicas  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ , son consideradas a temperatura de fundido.

### **3. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN**

#### **3.1 Objetivo General**

Caracterizar rocas de basalto del estado de Hidalgo por medio de técnicas analíticas convencionales para fabricar fibras de basalto, las cuales serán comparadas con fibras comerciales.

##### **3.1.1 Objetivos específicos**

1. Determinar la composición químico-mineralógica de las muestras de basalto a través de técnicas analíticas convencionales como: fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) y microscopía óptica de polarización (MOP).
2. Determinar parámetros térmicos de las muestras de basalto por análisis termogravimétrico (TGA) y pruebas térmicas en probetas.
3. Definir la factibilidad del uso de las muestras recolectadas para la fabricación de fibras de basalto.
4. Fabricar fibras de basalto a nivel laboratorio usando un prototipo basado en el proceso de fibrado rotacional, comparando su morfología y contenido elemental a través de microscopía electrónica de barrido (MEB).

#### **3.2 Justificación**

Es importante señalar que el basalto no se procesa actualmente en nuestro país para la obtención de este tipo de materiales (fibras). La relevancia del presente trabajo de investigación se basa en la importancia de caracterizar las rocas de basalto del estado para evaluar su calidad como materia prima en la elaboración de fibra mineral y/o de basalto. Por lo tanto, se propone darle un valor agregado a este material generando un cambio de paradigma en el uso del basalto.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Muestreo

El área de estudio en donde se efectuó la recolección de rocas basálticas en la presente investigación se ubica en el estado de Hidalgo, en diversas localidades de diez municipios, que se agruparon en seis zonas de estudio: zona 1 Singuilucan, zona 2 Santiago, zona 3 Zempoala (Epazoyucan y Zempoala), zona 4 Mixquiahuala, Zona 5 Tezontepec (Tezontepec, Tlahuelilpan y Tula) y zona 6 Huasca (Atotonilco el Grande y Huasca). Para identificar las localidades de muestreo, se utilizaron cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2009), particularmente las claves: F14-D82 de Tulancingo, E14-B11 de Tizayuca, E14-12 de Ciudad Sahagún, F14-C89 de Mixquiahuala, F14-C88 de Tula, F14-D71 de Actopan y F14-D82 de Tulancingo.

La recolección de las muestras se realizó en base a sus características físicas como: estructura, color, textura, porosidad, entre otras. Se obtuvieron treinta muestras de roca, cada una con un peso aproximado de 3.0 kg, identificadas con el nombre de la localidad, fecha y datos de localización correspondientes; las coordenadas geográficas se obtuvieron con un GPS Tomtom One 4N01 (sistema de posicionamiento global).

Las localidades de muestreo se ubican en las regiones centro- sureste y centro suroeste del estado, las cuales se ubican dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, mostrado en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Eje Neovolcánico

## **4.2 Geología del área de estudio**

El área de estudio se encuentra comprendida en la parte sur-este y sur-oeste del estado de Hidalgo, la cual corresponde desde el punto de vista petrológico a la provincia fisiográfica denominada Cordillera Neovolcánica o Eje Volcánico Transversal. Esta tiene una extensión de 900 km. y una anchura promedio de 130 km. Su altura media es de 2,500 m.s.n.m. Se considera como una barrera natural entre América del Norte y América Central. Se extiende desde Nayarit hasta Veracruz atravesando los estados de Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Guerrero, Jalisco, Colima y Distrito Federal. En el oeste hace contacto con la Sierra Madre Occidental y con la Sierra Madre del Sur, y en el este, hace contacto con el final de la Sierra Madre Oriental. Según la región y entidad, recibe diferentes nombres locales: Sierras del Tigre y Mil Cumbres en el estado de Michoacán; Sierra de la Gavia y San Andrés en el estado de México; Ajusco-Chichinautzin entre la capital de la República y el estado de Morelos; Sierra de Tlaxco en el estado de Tlaxcala; Sierra Nevada entre los estados de México y Puebla; Sierra de Tlahuilotepec en el estado de Veracruz (SGM, 2017). La provincia del Eje Neovolcánico de edad Pliocuaternaria está constituida por rocas volcánicas de composición básica a básica-intermedia, con escasos horizontes intercalados de rocas volcánicas ácidas. Las texturas y estructuras van desde lavas masivas a tobas y brechas. Su espesor varía de algunos metros hasta rebasar en ocasiones los 1,000 m. Su morfología está caracterizada por mesetas, lomeríos, planicies, conos cineríticos y compuestos, así como calderas. Dentro de las depresiones existentes se depositaron sedimentos lacustres en ocasiones intercalados con lavas.

## **4.3 Preparación de muestras**

Una vez obtenidas las muestras de roca basáltica, fue necesario lavarlas para eliminar impurezas y secarlas a temperatura ambiente; posteriormente se redujo el tamaño de las rocas con el uso de herramientas disponibles, fragmentando las rocas en la quebradora de quijadas, Figura 4.2 (a), a fin de obtener el tamaño adecuado de roca para continuar con su preparación.

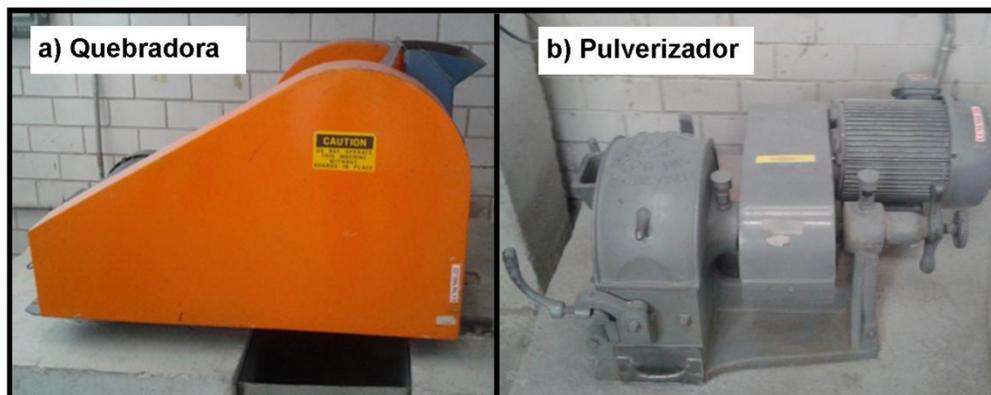


Figura 4.2 Equipo utilizado para preparación de las muestras

Posteriormente se redujo el tamaño de partícula con el uso de un pulverizador Vico UA53, Figura 4.2 (b).

Una vez obtenido el polvo por el método antes mencionado, se procedió a tamizar durante siete minutos y medio cada muestra en un Ro-Tap Tyler RX-29, a malla 200, lo que permitió obtener un tamaño de partícula igual o menor a  $74\ \mu\text{m}$ , ideal para su caracterización por difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X.

#### **4.3.1 Preparación de probetas para pruebas térmicas**

Para obtener las probetas utilizadas en las pruebas térmicas, se tomó 1 g de polvo de roca tamizada y este fue prensado en dados metálicos de 1 cm de diámetro a 8 (PSI) libras por pulgada cuadrada, durante cinco minutos.

#### **4.3.2 Proceso de digestión de fibras comerciales para su análisis por ICP**

Para realizar el análisis químico elemental por espectrofotometría de emisión por acoplamiento inductivo (ICP) en las fibras comerciales comparadas, estas fueron digeridas en ácidos, de acuerdo a las proporciones y protocolo indicados por el fabricante del horno utilizado, para este propósito se utilizó un horno Mars-5 disponible en el área académica de química de la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Los ácidos utilizados para la digestión, fueron: HCl, HF,  $\text{HNO}_3$  y  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , iniciando con el pesado de 0.1 g de cada fibra, agregando 5 ml de HF, 3 ml de  $\text{HNO}_3$  y 1ml de HCl; con estas proporciones se programa el horno a un límite de temperatura de  $190\ ^\circ\text{C}$  a 190 PSI en un tiempo de 25 min, manteniendo

estas condiciones durante 10 min, programando 10 min más para su enfriamiento. Una vez digeridas las muestras, se neutraliza el efecto del HF con la adición de 35 ml de  $H_3BO_3$  al 4 %, sometiendo nuevamente las muestras digeridas a las siguientes condiciones: 170°C a una presión de 170 PSI en un tiempo de 10 min, manteniendo estas condiciones 5 min y programando 5 min más para su enfriamiento; una vez transcurrido el tiempo para su enfriamiento se le adiciona agua desionizada para completar el volumen requerido para el aforo, en la Figura 4.3 se muestra el horno utilizado para la digestión.



Figura 4.3 Horno Mars 5 utilizado para la digestión de fibras

#### **4.3.3 Preparación de fibras para su análisis por MEB**

Tanto las muestras de fibra comerciales como las obtenidas en laboratorio fueron colocadas con cinta de grafito en porta muestras de latón con la finalidad de hacerlas conductoras, éstas fueron recubiertas con una capa de oro en un equipo Denton Vacuum, Desk II.

#### **4.4 Difracción de rayos X**

En DRX, una condición importante para que haya calidad en una muestra de polvo, es la realización de un número infinito de posibles orientaciones de las partículas de unas con respecto a otras, es decir aleatoriedad completa en sus orientaciones. La reducción del tamaño de partícula es la condición necesaria pero no suficiente para que esto se logre. En realidad, la aleatoriedad casi ideal en las

orientaciones de partículas solo es factible con una gran cantidad de partículas esféricas o casi esféricas, con formas isotrópicas (Pacharsky et al., 2005).

El análisis por difracción de rayos X se realizó en un difractómetro Inel Equinox 2000, con una fuente de Co K $\alpha$ 1 ( $\lambda=1.78901$  Å) y monocromador de germanio. Dicha técnica permitió determinar las fases minerales cristalinas mayoritarias, minoritarias e indicios, en función de sus valores de  $2\theta$  y la relación en % de intensidad, de acuerdo a la base de datos de tarjetas Powder Diffraction File (PDF) publicadas por el *International Centre for Diffraction Data* (JCOFD, 1986).

#### **4.5 Fluorescencia de rayos X**

El uso de polvos para su análisis por FRX puede llevarse a cabo de dos maneras: el polvo puede colocarse sobre una película para ser analizado directamente, o bien ser prensado a muy alta presión 20 kN para formar una pastilla, en caso de utilizar un enlazante para la formación de pastillas, éste no deberá ser considerado en el análisis ya que no pertenece a la muestra original (Brouwer, 2017).

Se pesaron diez gramos de cada muestra tamizada para su análisis por Fluorescencia de rayos X, determinando el contenido de elementos mayores y trazas de las treinta muestras de roca, este análisis se realizó en un espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X, marca Rigaku, modelo NEX CG mediante energía de dispersión (EDXRF).

Los elementos mayores en base a óxidos se calcularon a partir de las concentraciones obtenidas en ppm, realizando los cálculos correspondientes para obtener el porcentaje en peso de: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O, MgO, MnO, FeO, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

#### **4.6 Microscopía óptica de polarización**

El microscopio óptico de polarización tiene la capacidad de analizar ciertas características y propiedades de una muestra utilizando luz polarizada producida por una lámina polaroide llamada polarizador entre la fuente luminosa y la preparación. A este tipo de luz se le denomina luz polarizada plana y, empleando una segunda luz polaroide llamada analizador, que es perpendicular a la primera y

que se puede interponer a voluntad (nicoses cruzados), analiza otro tipo de características y propiedades en la misma muestra. Se distinguen en los microscopios la luz transmitida, que pasa a través de objetos muy delgados, transparentes (minerales no metálicos), y la luz reflejada para el análisis de la superficie de un cuerpo opaco (minerales metálicos). Para este análisis, se prepararon láminas delgadas de roca y se analizaron en un equipo OLYMPUS BX-41.

#### **4.7 Clasificación de rocas volcánicas mediante el diagrama de álcali total vs sílice TAS**

Se utilizó la clasificación TAS para las muestras recolectadas de basalto en las diferentes localidades mencionadas, la cual permite obtener óptimos resultados ya que las muestras no se encuentran alteradas.

La (IUGS) abreviatura del inglés *The International Union of Geological Sciences*, a través de la subcomisión sobre sistemática de rocas ígneas, recomienda que las rocas volcánicas se clasifiquen sobre una base puramente descriptiva, utilizando el diagrama TAS, sílice frente a suma de álcalis (Le Maitre, 1984), cuyas siglas provienen de los términos en inglés (*total alkali vs silica*), el cual permitió identificar el tipo de basalto encontrado en cada localidad de muestreo sobre una división de catorce campos, tres de ellos sub clasificados en tres más (Le Bas et al, 1986); identificando las treinta muestras de roca en un diagrama TAS, de acuerdo a su contenido de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ .

#### **4.8 Estimación de minerales en rocas volcánicas aplicando la norma CIPW**

La norma CIPW, propuesta hace más de cien años, es aún un esquema útil que permite estimar la abundancia de minerales normativos, que a su vez permiten realizar una clasificación apropiada de rocas ígneas, la idea de los cálculos de normas fue introducida en petrología por Cross, Iddings, Pirson y Washington, quienes delinearon un sistema de cálculo por el cual, a partir del análisis químico de una roca se puede obtener una asociación hipotética de minerales estándares.

Esta asociación sirve de base para la identificación de rocas en el diagrama QAPF. Al igual que la anterior clasificación, nos permite obtener buenos resultados en función de que las muestras no presentan alteración alguna.

#### **4.9 Clasificación de rocas volcánicas en un diagrama QAPF a través del contenido de cuarzo, feldespatos alcalinos, plagioclasas y feldespatoides.**

El nombre QAPF proviene de las siglas en inglés: *Quartz, Alkali Feldespar, Plagioclase y Feldespathoid*, este diagrama permite clasificar rocas volcánicas de acuerdo al contenido en % peso de: cuarzo, feldespatos alcalinos, plagioclasas y feldespatoides. Fue utilizado para identificar el tipo de roca correspondiente a cada zona de muestreo y compararlo con la clasificación obtenida a través del diagrama TAS, a diferencia de este, el diagrama QAPF toma como referencia los porcentajes en peso de los grupos de minerales (*QAPF*) identificados en la aplicación de la norma CIPW, para el caso de las muestras de roca analizadas la mayor proporción corresponde a plagioclasas (P), como feldespato alcalino se identificó ortoclasa (A), la nefelina como componente (F) feldespatoide y el cuarzo normativo (Q) identificado solamente en una muestra. El porcentaje en peso de los componentes QAPF es normalizado a 100% para ser identificados en el diagrama QAPF, cabe mencionar que la presencia de cuarzo normativo es incompatible con los feldespatoides normativos, en otras palabras, cuando hay presencia de cuarzo normativo no hay presencia de feldespatoides y viceversa.

#### **4.10 Pruebas térmicas para aproximar el punto de fusión de las rocas analizadas**

Con la finalidad de aproximar los puntos de fusión de las muestras de roca, las probetas en forma de pastillas se sometieron a un tratamiento térmico por debajo del punto de fusión del basalto, dicho tratamiento se llevó a cabo en una mufla digital, modelo T1700X del fabricante Thermoelectric Inc., permitiendo estimar las diferencias en sus puntos de fusión a través de la apariencia de las probetas

posterior al tratamiento térmico. La rampa de calentamiento programada para llegar a los 1100 °C en 220 min, se muestra en la Figura 4.4.

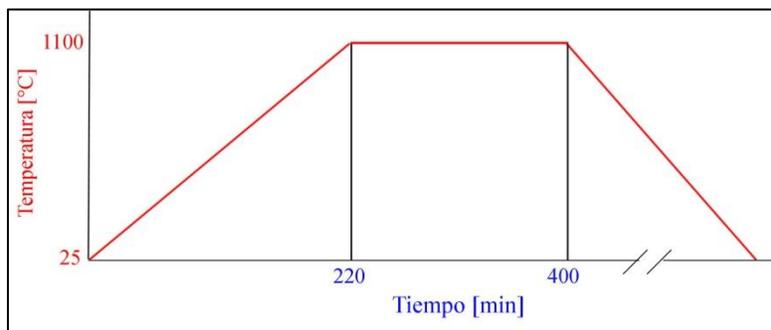


Figura 4.4 Rampa de calentamiento utilizada para estimar los puntos de fusión de las muestras de roca

#### **4.11 Análisis termogravimétrico de ocho muestras de roca basáltica seleccionadas**

Para el análisis termogravimétrico (ATG) fueron seleccionadas ocho muestras representativas de las seis zonas de muestreo de acuerdo a los resultados de las pruebas térmicas; zona 1 Singuilucan (S2), zona 2 Santiago (PR6 y R7), zona 3 Zempoala (CT), zona 4 Mixquiahuala (MIX1), zona 5 Tezontepec (HUIT) y zona 6 Huasca (ATO2 y HUA1), este análisis fue realizado en un equipo Metler Toledo TGA/SDTA 851, tomando aproximadamente 4 mg de roca basáltica pulverizada, seca y homogeneizada, lo que permitió determinar los efectos que provoca el calor sobre la materia prima, basada en la variación de masa de las muestras de roca cuando son sometidas a una rampa de de calentamiento de 10 °C por minuto, alcanzando una temperatura de 1200 °C en una atmósfera controlada (aire).

##### **4.11.1 ATG de tres muestras de fibras comerciales**

Con la finalidad de identificar las diferencias en la pérdida de masa de las fibras comerciales analizadas (FV01, FV02 y LR), se pesaron 4 mg de cada fibra y se sometieron a una rampa de calentamiento a una temperatura máxima de 900 °C en atmósfera controlada, lo cual permitió identificar los principales cambios de fase y la degradación de cada fibra posterior al análisis ATG.

## 4.12 Proceso para la obtención de fibras de roca basáltica en laboratorio

De manera general, el equipo para obtención de fibras de basalto consiste en una etapa de fundido, en la cual se utilizó energía eléctrica; otra relacionada con un acoplamiento mecánico que permite generar las fibras con ayuda de energía rotacional y un flujo de aire a presión; por último, un recipiente para la recolección de las fibras obtenidas.

### 4.12.1 Diseño de arco eléctrico para pruebas preliminares de fundido

Con la finalidad de realizar pruebas preliminares en la capacidad de fundido de la roca pulverizada, se diseñó un segmento de fundido basado en el principio de arco eléctrico, modificando el número de espiras en los devanados secundarios de dos transformadores, el circuito eléctrico de los devanados modificados para generar el arco eléctrico se muestra en la Figura 4.5, el circuito representa los dos transformadores en serie, alimentados en su devanado primario con 230 V de corriente alterna.

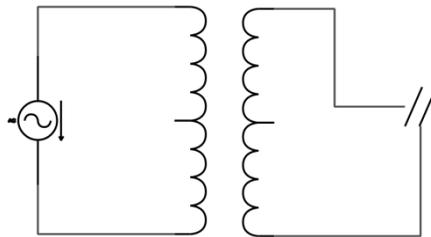


Figura 4.5 Diagrama representativo para la generación del arco eléctrico

De acuerdo a la relación del voltaje con el número de espiras de la Ecuación 4.1, el cálculo del voltaje (V) en el devanado secundario es directamente proporcional a la relación entre el número de espiras de los devanados primario y secundario.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Ecuación 4.1

Donde:

$V_1$  es el voltaje en el devanado primario;  
 $V_2$  es el voltaje en el devanado secundario;  
 $N_1$  es el número de espiras en el devanado primario y  
 $N_2$  es el número de espiras en el devanado secundario.

De la Ecuación 4.1 se obtuvieron 30 V en el devanado secundario, con una alimentación de 230 V en el devanado primario.

Para el cálculo de la corriente ( $I$ ) en el devanado secundario, ésta es inversamente proporcional a la relación entre el número de espiras entre los devanados primario y secundario, ver Ecuación 4.2.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

$I_1$  es la corriente en el devanado primario;  
 $I_2$  es la corriente en el devanado secundario;  
 $N_1$  es el número de espiras en el devanado primario y  
 $N_2$  es el número de espiras en el devanado secundario.

Una vez modificados los devanados secundarios de los dos transformadores conectados en serie y aplicando la relación mostrada en la Ecuación 4.2, el consumo de corriente  $I_1$  en la alimentación del circuito fue de 20 A, en el devanado secundario la corriente  $I_2$  a plena carga fue de 200 A.

En la Figura 4.6 se muestra físicamente la modificación de los devanados secundarios de los dos transformadores utilizados, así como las conexiones a barras de grafito de 1 cm de diámetro que permiten conducir la corriente a plena carga soportando las altas temperaturas durante la generación del arco eléctrico, las pruebas preliminares de vitrificación de la roca pulverizada se realizaron en un crisol de grafito dentro de ladrillo refractario con la finalidad de concentrar el calor en la cámara donde ocurre el arco eléctrico.

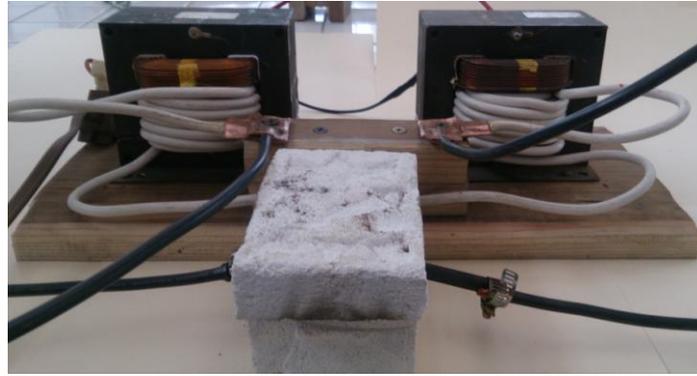


Figura 4.6 Diseño de arco eléctrico para pruebas preliminares

#### 4.12.2 Diseño de segmento mecánico para la obtención de fibras

En la Figura 4.7 se muestra la etapa mecánica del prototipo para el proceso de fibrado, la cual consiste en dos ejes de motores acoplados a rodillos de grafito con un diámetro de 5 cm que giran de manera independiente alrededor de 3000 rpm, esta velocidad es controlada por un auto transformador que permite regular el voltaje suministrado a los motores. Con la finalidad de acelerar el enfriamiento de las fibras obtenidas fue colocado un tubo que distribuye aire a presión durante el proceso.

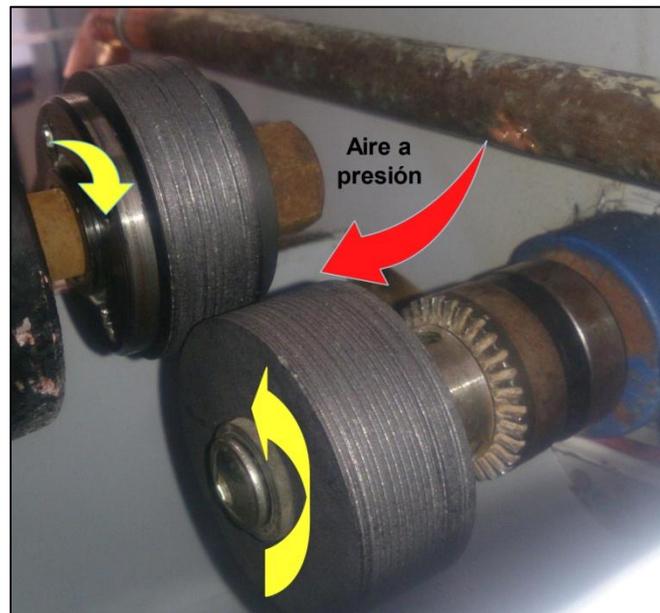


Figura 4.7 Diseño mecánico para elaboración de fibras de basalto

Tal como se aprecia en la Figura 4.7 uno de los rodillos se ubica ligeramente arriba con respecto del otro, ya que el material fundido es vaciado en el rodillo superior fluyendo por un rayado intencional de 100  $\mu\text{m}$  que sirve de guía para llevar el material al segundo rodillo que gira en sentido opuesto al primer rodillo. El flujo de aire a 30 PSI acelera el enfriamiento del fundido y es direccionado con el tubo de cobre identificado en la Figura 4.7.

#### 4.12.3 Proceso de fundido-vaciado para obtención de fibras

Una vez fundida la materia prima en un horno eléctrico a 1430°C por media hora, esta fue retirada con pinzas para crisol, para ser vaciada en el segmento mecánico que permitió generar las fibras de basalto, ver Figura 4.8.



Figura 4.8 Proceso de vaciado del material fundido

#### 4.13 Microscopía electrónica de barrido de las fibras obtenidas y de las fibras comerciales

Una vez obtenidas las fibras experimentales, estas fueron comparadas con cuatro tipos de fibras comerciales que son utilizadas como aislante. Comparando las diferencias en morfología y la composición a través de un mapeo elemental; dos de ellas clasificadas como fibras de vidrio FV01 y FV02, una denominada lana de roca LR y otra más como fibra cerámica MOR. Para la obtención de micrografías, mapeo elemental y análisis puntual por espectroscopia de dispersión de energía (EDS) se utilizó un microscopio Jeol-6300, con electrones secundarios y retrodispersados para determinar las características de cada fibra.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Resultados de muestreo de las rocas basálticas

La recolección de muestras se realizó en dos etapas, la primera que comprende las zonas 1, 2 y 3: zona 1 Singuilucan, zona 2 Santiago (municipio de Santiago Tulantepec), zona 3 Zempoala (municipios de Epazoyucan y Zempoala); la segunda etapa agrupa las zonas (3, 4 y 5): zona 4 Mixquiahuala, zona 5 Tezontepec (municipios de Tezontepec y Tula), zona 6 Huasca (municipios de Atotonilco el Grande y Huasca). En la Figura 5.1 se presentan las seis zonas en las que se agruparon los diez municipios del estado de Hidalgo en los que fue realizado el muestreo, de los cuales se obtuvieron treinta muestras de roca de basalto.

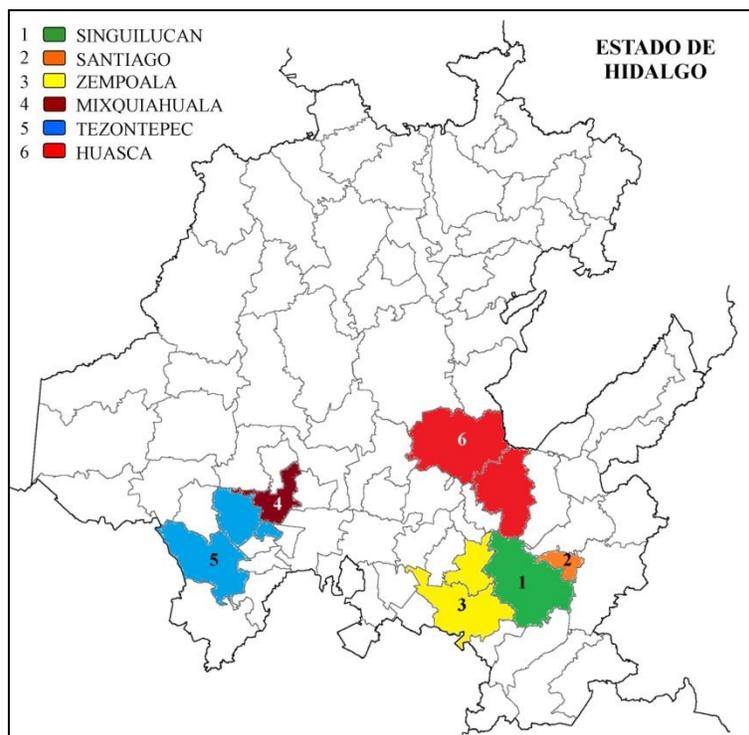


Figura 5.1 Zonas que agrupan los diez municipios de muestreo

En la Tabla 5.1 se identifican las seis zonas de muestreo, el código de cada una de las treinta muestras recolectadas, el municipio al que pertenece y las coordenadas geográficas correspondientes a cada localidad.

Tabla 5.1 Coordenadas de localidades de muestreo

Muestra	Latitud	Longitud	Muestra	Latitud	Longitud
<b>Zona Singuilucan</b>			<b>Zona Santiago</b>		
S1	20°3'57"N	98°29'40"O	PR6	20°2'20"N	98°25'21"O
S2	20°3'52"N	98°29'37"O	R7	20°1'32"N	98°24'48"O
S3	20°3'52"N	98°29'35"O	R8	20°1'45"N	98°24'48"O
S4	20°3'38"N	98°29'56"O	P9	20°3'6"N	98°25'48"O
S5	20°3'33"N	98°30'7"O	P10	20°3'34"N	98°25'57"O
<b>Zona Mixquiahuala</b>			<b>Zona Tezontepec</b>		
MIX1	20°14'27"N	99°12'26"O	TEZO	20°11'54"N	99°16'4"O
MIX2	20°14'19"N	99°12'43"O	HUIT	20°10'37"N	99°16'52"O
MIX3	20°14'26"N	99°14'4"O	TLAH	20°8'50"N	99°13'30"O
MIX 4	20°14'20"N	99°13'51"O	TULA	20°3'13"N	99°22'23"O
<b>Zona Zempoala</b>			<b>Zona Huasca</b>		
SM1	19°58'39"N	98°36'48"O	ATO1	20°17'28"N	98°40'26"O
CT	19°56'52"N	98°36'2"O	ATO2	20°23'9"N	98°43'19"O
SMT1	19°56'3"N	98°35'15"O	CC1	20°24'32"N	98°42'19"O
SMT2	19°55'45"N	98°35'0"O	HUA1	20°12'40"N	98°33'32"O
Z1	19°55'8"N	98°35'6"O	HUA2	20°12'39"N	98°32'57"O
Z2	19°54'40"N	98°35'35"O	HUA3	20°12'39"N	98°32'51"O

## 5.2 Descripción megascópica de las muestras de roca

### Zona Singuilucan

Las muestras de la zona de Singuilucan de manera general presentan las siguientes características megascópicas: son rocas masivas de color gris oscuro a negro, presentan una granulometría muy fina (de tipo afanítica), con amígdalas que se presentan de una manera muy escasa, las cuales van desde 1 mm hasta 2.5 cm. Estas amígdalas presentan una cierta alineación, la cual es el flujo de la deposición de la lava y escape de los gases, se observa que algunas muestras presentan puntos muy pequeños de limonita, derivado de la lixiviación meteórica y en parte hidrotermal reciente. Las rocas se pueden clasificar como basaltos de textura afanítica.

### Zona Santiago

Las muestras de la zona Santiago están representadas por rocas que en su mayoría muestran una textura rugosa por la gran cantidad de amígdalas presentes. Las amígdalas presentan un espesor de 1 mm a 0.5 cm con una orientación caótica. Presenta una textura afanítica de grano muy fino. Las rocas se pueden clasificar como un basalto de estructura rugosa.

#### Zona Zempoala

Las muestras de Zempoala, megascópicamente presentan las siguientes características: son rocas masivas de color gris oscuro a pardo, las cuales presentan una matriz granulometría muy fina, muestran una estructura muy compacta sin amígdalas, en ocasiones a algunas muestras se les observa una tonalidad verdosa (olivino), este paquete volcánico puede ser clasificado como un basalto.

#### Zona Mixquiahuala

En la zona de Mixquiahuala, las muestras son masivas de color gris oscuro con estructura fluidal y presentan una granulometría muy fina (afanítica), con presencia de magnetita iridiscente y olivino, se presentan costras de calcita en sus clivajes, asociada a limonita y hematita y muy escasas amígdalas donde se observa la formación de zeolitas, las rocas se clasifican como andesita basáltica.

#### Zona Tezontepec

En la zona Tezontepec, las muestras se presentan masivas, compactas y de color negro rojizo con abundantes amígdalas de 1.0 mm a 5 mm, en algunos casos se encuentran rellenos de zeolitas cálcicas o calcita, ya que efervesce al HCl. El color rojizo es debido a la abundancia de hematita y magnetita, la roca presenta un cierto flujo y se puede clasificar como un basalto hematizado.

#### Zona Huasca

Las muestras de la zona Huasca, son rocas masivas de color gris oscuro a verdoso con estructura compacta y se observan amígdalas pequeñas rellenas de

crystalita y olivino muy fino en toda la muestra, en ocasiones se observan puntos de hematita, la roca se clasifica como basalto andesítico.

### **5.3 Difracción de rayos X de las rocas de basalto**

De un total de 30 muestras en verde, fueron seleccionadas 19 muestras representativas de las seis zonas de muestreo; zona 1 (S2, S4 y S5), zona 2 (PR6, R7, P9), zona 3 (CT, SM1, SMT2 y Z2), zona 4 (MIX 1 y MIX 4), zona 5 (TEZ, HUIT y TULA), zona 6 (ATO2, CC, HUA1, HUA3), esto es en función de los parámetros térmicos obtenidos en cada muestra. Una vez obtenidos los patrones de difracción, fue posible identificar las fases minerales cristalinas mayoritarias, minoritarias e indicios. En la mayoría de las muestras se identificó plagioclasa y piroxeno y en algunas de ellas anfíbol y cuarzo.

En la Figura 5.2, se muestran los patrones de difracción de tres muestras correspondientes a la zona de muestreo denominada Singuilucan; la identificación de cada uno de los picos permite notar la similitud en las muestras S2 y S5, debido a que las dos muestras mencionadas tienen como fases minerales mayoritarias plagioclasa (andesina y oligoclasa), así como piroxeno (hiperstena y diópsido), de igual forma se logró identificar magnetita en las tres muestras. En el caso de S4, la mayoría de las fases minerales identificadas corresponden a silicatos de hierro y magnesio.

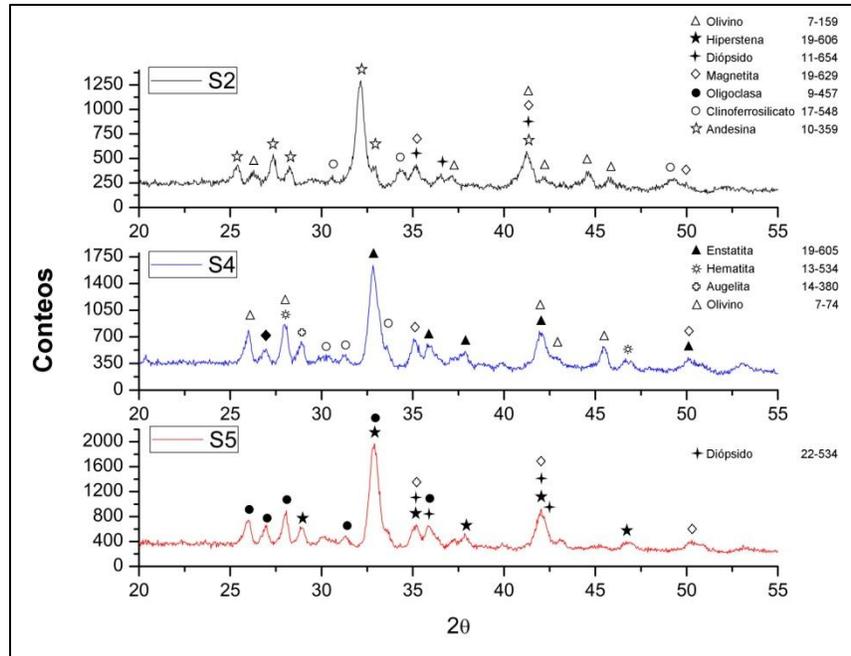


Figura 5.2 Resultados de DRX de las muestras S2, S4 y S5 de la zona Singuilucan mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.

En la zona de muestreo Santiago (Figura 5.3), se identificó la presencia de plagioclasa y piroxeno como fases cristalinas mayoritarias; resalta el olivino como fase mineral indicio en las muestras R7 y P9 y el cuarzo en ésta última muestra. Es importante resaltar la intensidad de los picos de andesina entre 25 y 28  $2\theta$  ya que están relacionados con las muestras que presentaron una menor temperatura en su punto de fusión.

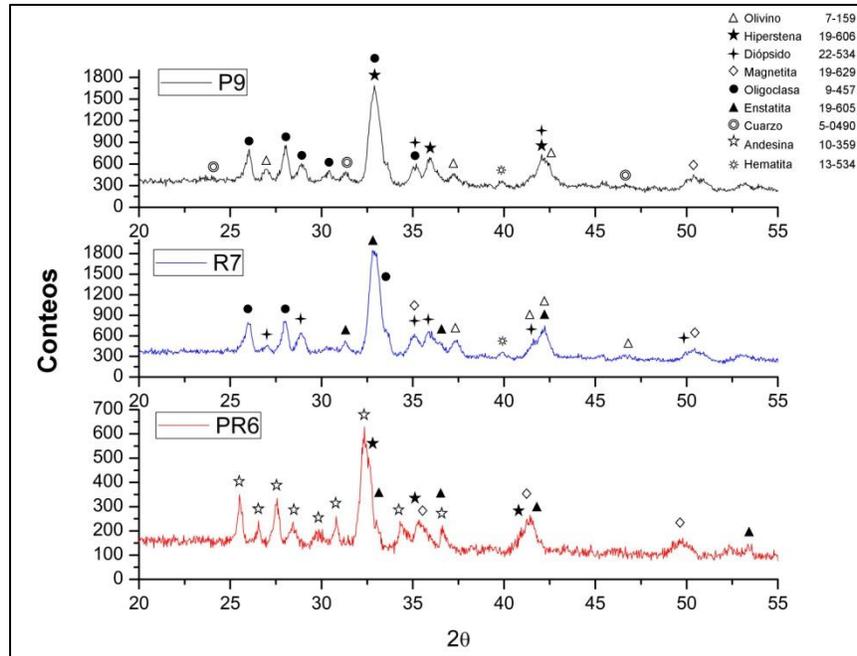


Figura 5.3 Resultados de DRX de las muestras PR6, R7 y P9 de la zona Santiago mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.

Dentro de la zona Zempoala, que comprende una mayor cantidad de localidades (Figura 5.4), es relevante la presencia de cristobalita como fase mineral indicio en las muestras CT y Z2. La identificación de albita (plagioclasa sódica), como fase mineral minoritaria en SMT2 y como fase mineral indicio de hematita en esta misma muestra. Al igual que la mayoría de las muestras las fases minerales cristalinas mayoritarias presentadas corresponden a plagioclasa y piroxeno.

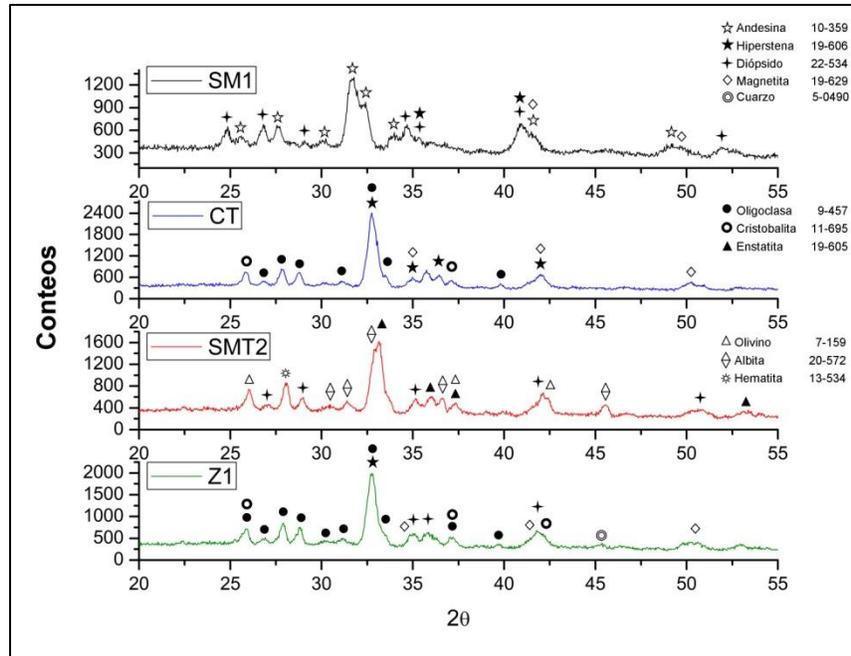


Figura 5.4 Resultados de DRX de las muestras SM1, CT, SMT2 y Z1 de la zona Zempoala mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.

En la zona Mixquiahuala, (Figura 5.5), los dos patrones de difracción analizados muestran gran similitud, teniendo para el caso de la muestra MIX1 como fase mineral mayoritaria a la hiperstena y a la andesina en la muestra MIX4. Cabe resaltar que la muestra MIX1 presenta mayor concentración de la fase mineral mayoritaria identificada, debido a una mayor definición de los picos del patrón de difracción, representada con una mayor número de conteos (relación de intensidad).

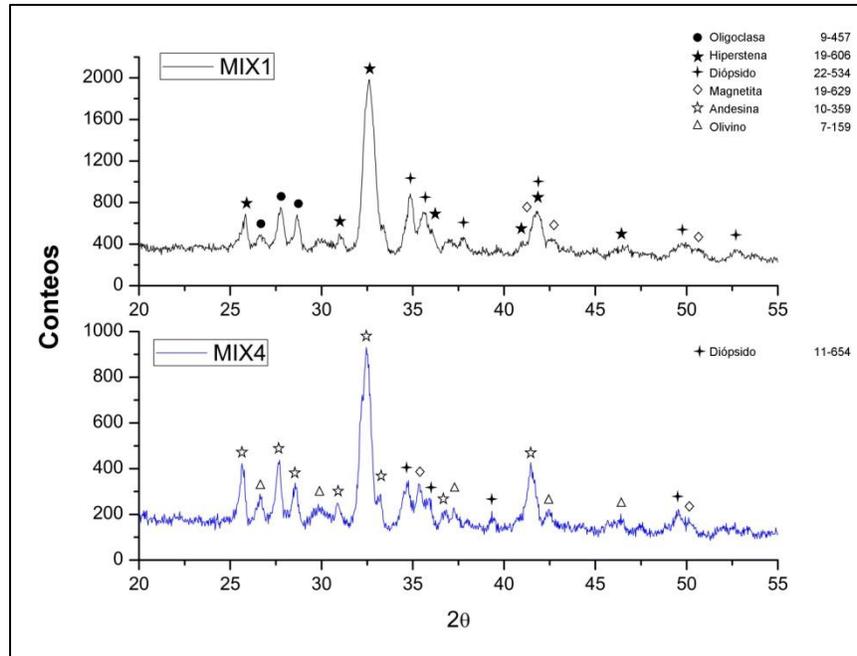


Figura 5.5 Resultados de DRX de las muestras MIX1 y MIX2 de la zona Mixquiahuala mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.

En la zona Tezontepec (Figura 5.6), es significativa la presencia de olivino como fase mineral indicio en las muestras TEZO y TULA, así como el diópsido como fase minoritaria en ésta última muestra. En estas dos muestras las principales fases minerales mayoritarias identificadas corresponden a plagioclasa y piroxeno. En el caso de la muestra HUIT, se identificó la fase mineral de augelita  $Al_2(PO_4)(OH)_3$ , la cual ocurre como un producto de metamorfismo de fosfato que contiene sedimentos peraluminosos (poco común en estas muestras) y la presencia de hematita como fase mineral minoritaria.

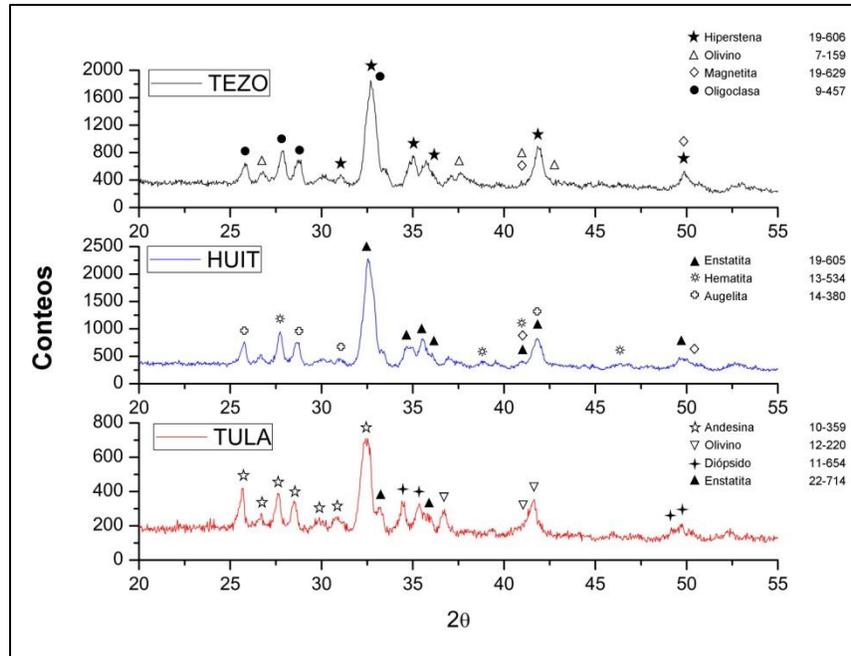


Figura 5.6 Resultados de DRX de las muestras TEZO, HUIT y TULA de la zona Tezontepec mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.

Dentro de la zona Huasca, las fases minerales que se identificaron corresponden a plagioclasa calco-sódica como fase cristalina mayoritaria en las muestras CC, HUA1 y HUA3 y piroxeno como fase mayoritaria en la muestra ATO2. Además de cuarzo como fase mineral indicio en CC y hematita en HUA1 y HUA3, (Figura 5.7).

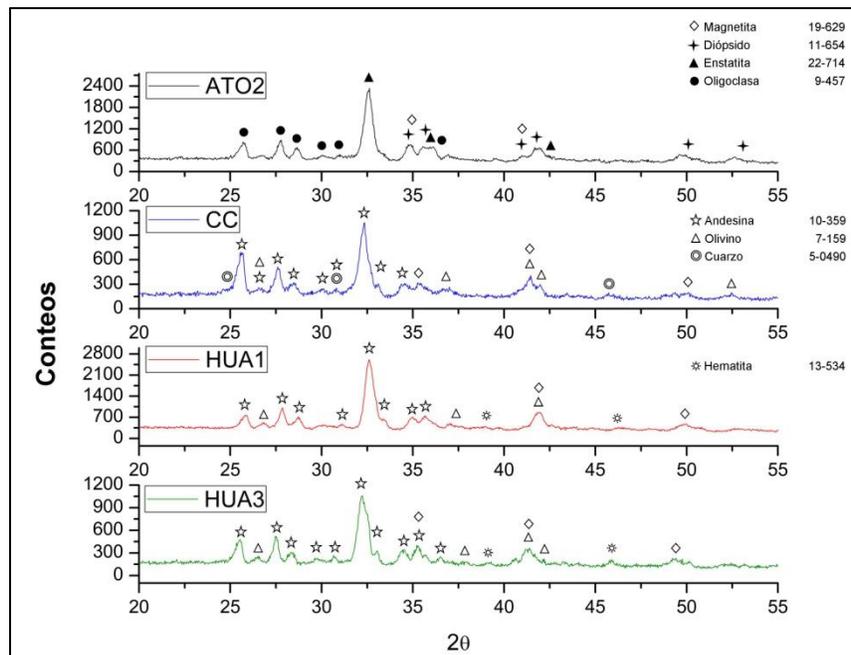


Figura 5.7 Resultados de DRX de las muestras ATO2, CC, HUA1 y HUA2 de la zona Huasca mostrando las fases minerales identificadas con su tarjeta correspondiente.

En la Tabla 5.2 se identifican las fases cristalinas mayoritarias, minoritarias e indicios de las muestras mencionadas, así como las distancias interplanares e intensidades relativas de cada mineral.

Tabla 5.2 Fases minerales cristalinas mayoritarias, minoritarias e indicios determinadas en muestras de basalto

Muestra	Mineralogía	Fase Mayoritaria	Fase Minoritaria	Indicio	$d_1$ (Å)	$I/I_1$ (%)	$d_2$ (Å)	$I/I_2$ (%)	$d_3$ (Å)	$I/I_3$ (%)	$d_4$ (Å)	$I/I_4$ (%)
<b>Zona Singuilucan</b>												
S2	Andesina	X			3.21	100	4.04	17.1	3.76	25.6	2.53	31.32
	Diópsido		X		2.99	18.16	2.52	31.3	2.89	10.8	2.56	9.67
	Magnetita			X	2.53	31.32	1.61	4.5	2.96	18.2	2.1	5.33
	Clinoferrosilicato		X		3.03	14.94	3.35	7.54	3.23	100	2.91	18.16
	Forsterita			X	2.79	8.93	2.53	31.3	2.47	7.28	3.91	9.35
S4	Enstatita	X			3.15	100	2.86	20.2	2.48	36.9	2.93	26.54
	Forsterita		X		2.46	7.16	3.88	31.4	2.51	36.9	5.1	5.6
	Augelita		X		3.33	-	3.5	19.5	4	-	2.49	36.91
	Magnetita			X	2.53	-	1.61	8.26	2.96	18.2	2.1	5.33
	Clinoferrosilicato			X	3.03	5.89	3.35	6.7	3.23	8.97	2.91	26.54
	Hematita			X	2.69	-	1.69	6.01	2.51	-	3.66	40.25
S5	Hiperstena	X			3.18	100	2.88	3.67	2.51	35	2.96	19.58
	Diópsido		X		2.98	19.58	2.91	18.2	2.52	35	2.49	8.33
	Magnetita			X	2.53	34.96	1.61	7.29	2.96	19.6	2.1	3.5
	Oligoclasa		X		3.18	100	4.03	24.2	2.93	18.2	3.76	29.66
<b>Zona Santiago</b>												
PR6	Hiperstena		X		3.18	42.15	2.88	5.68	2.56	18.3	2.96	23.69
	Magnetita			X	2.53	27.97	1.61	4.22	2.96	23.7	2.1	11.32
	Enstatita			X	3.15	4.45	2.86	17.9	2.48	6.13	2.52	9.63
	Andesina	X			3.21	100	3.18	42.2	4.04	36.4	3.76	35.75
R7	Magnetita			X	2.53	16.19	1.61	4.97	2.96	17.4	2.1	8.34
	Diópsido		X		2.98	17.37	2.91	20	2.52	16.2	2.49	23.8
	Enstatita	X			3.15	100	2.86	5.99	2.48	23.8	2.52	16.18
	Forsterita			X	2.79	13.55	2.53	16.2	2.47	23.8	3.91	27.95
P9	Hiperstena		X		3.18	100	2.88	3.67	2.51	30.8	2.96	3.5
	Diópsido		X		2.98	18.04	2.91	25.2	2.52	30.8	2.49	11.91
	Enstatita		X		3.15	16.59	2.86	3.68	2.48	11.9	2.52	30.82
	Forsterita			X	2.79	10.31	2.53	30.8	2.47	11.9	3.91	11.02
	Cuarzo			X	3.34	9.606	4.26	3.86	1.82	5.75	2.28	3.525
	Magnetita			X	2.53	30.82	1.61	5.96	2.96	3.5	2.1	10.88
	Oligoclasa	X			3.18	100	3.76	34.6	2.93	25.2	3.66	15.45
<b>Zona Zempoala</b>												
CT	Hiperstena	X			3.18	100	2.88	13.7	2.51	19.1	2.96	10.88
	Magnetita		X		2.53	19.08	1.61	3.59	2.96	10.9	2.1	10.11
	Cristobalita			X	4.05	18.31	2.48	3.47	2.84	7.43	3.14	16.39
	Oligoclasa		X		3.18	100	3.2	-	4.03	18.3	3.76	21.96
SM1	Andesina	X			3.21	100	3.18	51.5	4.04	13.2	2.53	13.92
	Diópsido		X		2.98	29.3	2.91	10.9	2.52	13.9	2.49	10.01
	Magnetita			X	2.53	13.88	1.61	6.23	2.96	5.53	2.1	8.67
	Hiperstena		X		3.18	51.46	2.88	9.76	2.55	39.4	2.96	5.53

<b>SMT2</b>	Enstatita	X		3.15	100	2.86	22.1	2.48	13.4	2.93	29.46
	Albita		X	3.21	-	3.18	-	3.13	90	2.94	18.85
	Diópsido		X	2.98	18.85	2.91	22.1	2.52	29.5	2.49	13.38
	Hematita		X	2.69	3.29	1.69	3.68	2.51	29.5	3.66	38.64
	Forsterita		X	2.79	12.76	2.53	29.5	2.47	13.4	3.91	28.42
<b>Z1</b>	Hiperstena	X		3.18	100	2.88	4.05	2.51	22.6	2.96	3.45
	Magnetita		X	2.53	22.56	1.61	3.97	2.96	3.45	2.1	7.4
	Cristobalita		X	4.05	19.56	2.48	9.73	2.84	12.3	3.14	4.93
	Diópsido		X	2.98	15.9	2.91	16.5	2.52	22.6	2.49	9.73
	Oligoclasa		X	3.18	100	4.03	19.6	3.2	-	3.76	27.54
<b>Zona Mixquiahuala</b>											
<b>MIX1</b>	Hiperstena	X		3.18	100	2.88	4.17	2.55	6.66	2.51	24.45
	Diópsido		X	2.98	32.39	2.91	19.2	2.52	24.5	2.49	5.25
	Oligoclasa		X	3.18	100	4.03	17.4	3.2	-	3.76	22.8
	Magnetita		X	2.53	6.62	1.61	5.36	2.96	32.4	2.1	4.21
<b>MIX4</b>	Andesina	X		3.21	100	3.18	-	4.04	31	3.76	33.2
	Diópsido		X	2.991	23.96	2.52	5.95	2.89	11.6	2.56	6.64
	Magnetita		X	2.53	34.47	1.61	8.78	2.96	21.4	2.1	6.29
	Forsterita		X	2.79	7.75	2.53	34.5	2.47	9.15	3.91	12.78
<b>Zona Tezontepec</b>											
<b>TEZ</b>	Hiperstena	X		3.18	100	2.88	3.7	2.51	39.1	2.96	27.55
	Magnetita		X	2.53	3.66	1.61	4.86	2.96	27.5	2.1	17.43
	Forsterita		X	2.79	10.8	2.53	3.66	2.47	3.84	3.91	10.01
	Oligoclasa		X	3.18	100	3.2	-	4.03	19.1	3.76	31.62
<b>HUIT</b>	Augelita		X	3.33	5.23	3.5	19.9	4	19.4	2.49	26.89
	Enstatita	X		3.15	100	2.86	5.3	2.49	26.9	2.53	5.55
	Magnetita		X	2.53	5.55	1.61	6.43	2.96	7.99	2.1	5.32
	Hematita		X	2.69	4.78	1.69	2.93	2.51	26.9	3.66	28.75
<b>TULA</b>	Andesina	X		3.21	100	3.18	28	4.04	40.3	3.76	36.8
	Fayalita		X	2.86	20.92	2.53	37.5	1.79	14.4	2.59	7.78
	Enstatita		X	2.87	36.6	2.97	47.2	3.17	95	2.45	20.87
	Diópsido		X	2.99	29.2	2.52	37.5	2.89	5.7	2.95	27.2
<b>Zona Huasca</b>											
<b>ATO2</b>	Diópsido		X	2.991	21.76	2.528	2.76	2.89	14.8	2.52	16.96
	Oligoclasa	X		3.18	100	4.03	22.9	3.2	-	3.76	24.88
	Enstatita	X		3.18	100	2.94	14.8	2.54	2.76	2.47	2.76
	Magnetita		X	2.53	2.76	1.61	2.98	2.96	17	2.1	3.85
<b>CC</b>	Andesina	X		3.21	100	3.18	9.67	4.04	60	2.53	27.6
	Magnetita		X	2.53	27.6	1.61	3.16	2.96	15.9	2.1	6.73
	Cuarzo		X	3.34	6.63	4.26	7.16	1.82	8.73	2.28	5.086
	Forsterita		X	2.79	6.31	2.53	27.6	2.47	12.4	3.91	5.94
<b>HUA1</b>	Andesina	X		3.21	100	3.18	15.2	4.04	18.9	2.53	25.53
	Magnetita		X	2.53	25.53	1.61	3.09	2.96	16.7	2.1	9.17
	Hematita		X	2.69	3.15	1.69	3.36	2.51	2.69	1.84	6.26
	Forsterita		X	2.79	2.81	2.53	25.5	2.47	3.79	3.91	6.9
<b>HUA3</b>	Andesina	X		3.21	100	3.18	31.5	4.04	33.8	2.53	23.26
	Magnetita		X	2.53	23.26	1.61	5.66	2.96	24.4	2.1	10.83
	Hematita		X	2.69	3.05	1.69	6.25	2.51	6.17	1.84	8.8
	Forsterita		X	2.79	2.76	2.53	23.3	2.47	3.27	3.91	7.19

En general, las principales fases cristalinas mayoritarias identificadas en las seis zonas de muestreo corresponden a plagioclasas calco sódicas, principalmente andesina y oligoclasa, así como piroxenos como la hiperstena y diópsido, las muestras de roca que presentaron fases cristalinas atípicas en este estudio fueron SMT2 con la presencia de albita como fase minoritaria y la muestra HUIT con la

fase mineral augelita. En la Tabla 7.1 de anexos se presentan las fórmulas estructurales de cada mineral identificado por DRX.

#### 5.4 Fluorescencia de rayos X

Los resultados de análisis químico de las muestras de basalto recolectadas en las zonas de estudio se reportan en la Tabla 5.3, para los elementos mayores dados en % peso, además de la media ( $\bar{x}$ ) y (S) desviación estándar de cada zona.

En las muestras se puede observar que las concentraciones de estos elementos son más o menos homogéneas en las seis zonas de estudio, y en donde se puede señalar que la Zona Singuilucan tiene una mayor concentración de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con un promedio de 20.2 % y una desviación estándar de  $\pm 1.3$ , así como un 12.1 en % peso de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\pm 0.64$  en su S.

La mayor concentración de  $\text{SiO}_2$  se observó en las muestras recolectadas en las zonas de Zempoala y Huasca, con un promedio aproximado del 50 % y desviación estándar de entre  $\pm 1.79$  a 3.32, para cada una de las zonas mencionadas.

Las muestras de Mixquiahuala presentaron en promedio los mayores valores en concentración de CaO con 9.84 % y una S de  $\pm 0.66$ , y 4.43 en % peso de MgO, con una desviación estándar de  $\pm 0.46$ .

Los valores en mayor concentración de  $\text{Na}_2\text{O}$ , corresponden a la zona Tezontepec con un valor promedio de 5.72%, con una dispersión de  $\pm 0.661$  S, que contrastan con el menor valor reportado en la zona Zempoala con 4.57 % y un valor de 0.62 en su desviación estándar.

En cuanto a óxidos en menor concentración, resalta el  $\text{TiO}_2$  observado en mayor proporción en el promedio de la zona Tezontepec con 1.89% en peso, seguido de 1.85 en % peso identificado en la zona Singuilucan, es importante resaltar que la máxima variación presentada fue de 0.43 desviaciones estándar, lo que representa poca dispersión de los valores obtenidos en este óxido.

Los valores más grandes de  $\text{K}_2\text{O}$  se presentaron en la zona Huasca, con 1.51 en % peso y 1.46% en la zona Santiago. Para el caso del  $\text{P}_2\text{O}_5$  como uno de los principales formadores de la parte vítrea, la mayor proporción identificada fue en la zona Huasca con 0.41 en % peso. Tanto la zona Mixquiahuala como la zona

Singuilucan presentaron 0.21 en % peso en concentración de MnO, con valores de 0.01 S, lo que representa la menor dispersión observada en todas las mediciones realizadas.

Tabla 5.3 Composición química de las treinta muestras de roca basáltica expresada en % peso de óxidos mayoritarios

Óxidos (% peso)										
Muestra	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>Zona Singuilucan</b>										
<b>S1</b>	21.72	45.14	2.65	7.975	12.368	0.83	3.842	2.02	0.22	0.589
<b>S2</b>	21.65	47.40	2.57	8.246	11.785	0.84	4.738	1.88	0.20	0.696
<b>S3</b>	18.87	47.92	3.27	8.577	11.424	1.22	5.095	1.67	0.19	0.385
<b>S4</b>	19.42	48.00	3.28	8.631	11.858	1.09	5.17	1.85	0.20	0.501
<b>S5</b>	19.19	47.45	3.66	8.162	13.063	1.04	4.939	1.83	0.22	0.441
$\bar{x}$	20.17	47.18	3.09	8.318	12.100	1.00	4.757	1.85	0.21	0.523
S	1.39	1.17	0.46	0.279	0.635	0.17	0.538	0.13	0.01	0.123
<b>Zona Santiago</b>										
<b>PR6</b>	18.76	49.42	2.17	7.430	8.2785	1.49	5.459	1.28	0.12	0.000
<b>R7</b>	18.28	50.27	2.16	7.430	7.7066	1.69	5.567	1.12	0.12	0.000
<b>R8</b>	20.21	50.49	2.09	7.486	8.7647	1.48	4.799	1.38	0.15	0.038
<b>P9</b>	19.64	50.70	2.24	7.612	8.8934	1.35	4.920	1.43	0.14	0.016
<b>P10</b>	18.86	48.49	3.36	8.802	11.935	1.31	4.805	1.80	0.21	0.426
$\bar{x}$	19.15	49.87	2.40	7.752	9.1157	1.46	5.110	1.40	0.15	0.096
S	0.76	0.91	0.54	0.592	1.6439	0.15	0.373	0.25	0.04	0.185
<b>Zona Zempoala</b>										
<b>SM1</b>	19.21	47.79	3.37	9.290	12.1290	0.77	5.436	1.68	0.22	0.090
<b>CT</b>	19.83	49.42	2.22	7.584	8.1928	0.95	5.041	1.18	0.14	0.000
<b>SMT1</b>	20.40	49.63	1.86	7.122	9.0935	1.30	4.287	1.57	0.15	0.116
<b>SMT2</b>	18.25	51.13	2.14	7.080	8.2642	1.59	4.610	1.22	0.13	0.197
<b>Z1</b>	19.64	50.91	2.09	7.486	8.9219	1.49	4.408	1.44	0.14	0.271
<b>Z2</b>	19.83	53.05	1.94	7.248	9.1793	1.39	3.653	1.20	0.14	0.000
$\bar{x}$	19.53	50.32	2.27	7.635	9.2968	1.25	4.572	1.38	0.15	0.112
S	0.73	1.79	0.56	0.835	1.4492	0.32	0.62	0.21	0.03	0.108
<b>Zona Mixquiahuala</b>										
<b>MIX1</b>	18.31	46.82	4.20	10.80	11.721	0.87	5.176	1.84	0.22	0.042
<b>MIX2</b>	18.77	46.64	4.29	9.731	11.861	0.88	5.513	2.01	0.20	0.112
<b>MIX3</b>	17.52	49.02	5.11	9.475	12.216	0.61	4.689	1.16	0.20	0.000
<b>MIX4</b>	19.64	46.42	4.13	9.347	11.925	0.89	5.432	1.87	0.20	0.122
$\bar{x}$	18.56	47.22	4.43	9.838	11.931	0.81	5.203	1.72	0.21	0.069
S	0.88	1.20	0.46	0.66	0.2085	0.13	0.371	0.38	0.01	0.058
<b>Zona Tezontepec</b>										
<b>TEZO1</b>	18.70	46.37	3.81	9.28	12.781	0.85	5.244	2.33	0.27	0.363
<b>HUIT</b>	19.78	45.61	3.44	10.9	11.372	0.78	6.041	1.87	0.17	0.026
<b>TLAH</b>	19.64	47.22	3.11	8.661	11.796	0.86	6.493	1.83	0.19	0.197
<b>TULA</b>	18.46	50.63	2.37	7.885	12.334	1.50	5.10	1.52	0.16	0.029
$\bar{x}$	19.15	47.46	3.18	9.182	12.071	1.00	5.719	1.89	0.20	0.154
S	0.66	2.21	0.61	1.282	0.6156	0.34	0.661	0.33	0.05	0.161
<b>Zona Huasca</b>										
<b>ATO1</b>	16.07	47.72	1.88	7.789	16.229	1.66	4.883	2.40	0.26	1.097
<b>ATO2</b>	18.53	49.97	3.15	9.023	11.432	1.20	4.75	1.59	0.17	0.179
<b>CC1</b>	15.76	56.49	0.96	4.779	12.395	2.56	5.61	1.14	0.22	0.072
<b>HUA1</b>	18.36	47.28	2.84	8.605	10.223	1.12	5.567	1.99	0.16	0.243
<b>HUA2</b>	17.98	49.84	2.40	8.017	9.1078	1.26	5.608	1.65	0.16	0.077
<b>HUA3</b>	18.10	51.13	2.40	8.003	8.8648	1.26	5.527	1.51	0.15	0.024
$\bar{x}$	17.47	50.40	2.27	7.703	11.375	1.51	5.324	1.71	0.19	0.282
S	1.22	3.32	0.77	1.504	2.7341	0.55	0.397	0.43	0.04	0.407

De acuerdo a lo reportado por (Cáceres et al, 1996) para obtener fibras más uniformes y más delgadas, los contenidos en % peso de  $\text{SiO}_2$  deben ser menores a 49% y suma  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  se debe ubicar entre 6-8%, además de tener un mayor contenido en % peso de  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$ , las muestras que más se apegan a estas condiciones son: de la zona Singuilucan: S3, S4 y S5, de la zona Santiago: P10, de la zona Zempoala: SM1, zona Mixquiahuala: MIX1, MIX2 y MIX3, de la zona Tezonatepec: TEZO, HUIT y TLAH y de la zona Huasca: ATO1 y HUA1.

### **5.5 Clasificación de las muestras de roca basáltica en un diagrama TAS**

La clasificación TAS, permitió identificar el tipo de basalto encontrado en cada localidad de muestreo; en la Figura 5.8 se identifican las treinta muestras de roca en un diagrama TAS, de las cuales: 13 muestras corresponden a traquibasalto, 5 a basalto traquiandesítico, 9 a tefrita basanita, 1 a basalto, 1 de traquiandesita y una más de andesita basáltica.

El traquibasalto es una roca volcánica alcalina y básica, con un contenido en  $\text{SiO}_2$  entre 45 % y 52 %, formada esencialmente por plagioclasa y piroxeno con contenidos menores de olivino. Si es sódica, se denomina hawaiiita (VCTRAC<sup>5</sup>, 2018). Tefrita y basanita son dos tipos de rocas volcánicas que se proyectan en el mismo campo a nivel de clasificación modal, diferenciándose porque la basanita posee más de un 10 % de olivino normativo (Le Bas et al., 1986). Ambas rocas se caracterizan por la abundancia de la plagioclasa dentro del grupo de los feldespatos, así como por la presencia importante de algún feldespatoide que podría definir el nombre de la roca, por ejemplo la tefrita nefelínica por la presencia de nefelina (UCM, 2018).

Las muestras en amarillo representan a la zona 1 Singuilucan, aquellas en naranja a la zona de Santiago Tulantepec, en azul fuerte están las muestras de la zona de Zempoala, zona Mixquiahuala en color verde, azul cielo la zona de Tezonatepec y por último la zona de Huasca en color rojo (Figura 5.8).

---

<sup>5</sup> Vocabulario Científico y Técnico de la Real Academia de Ciencias

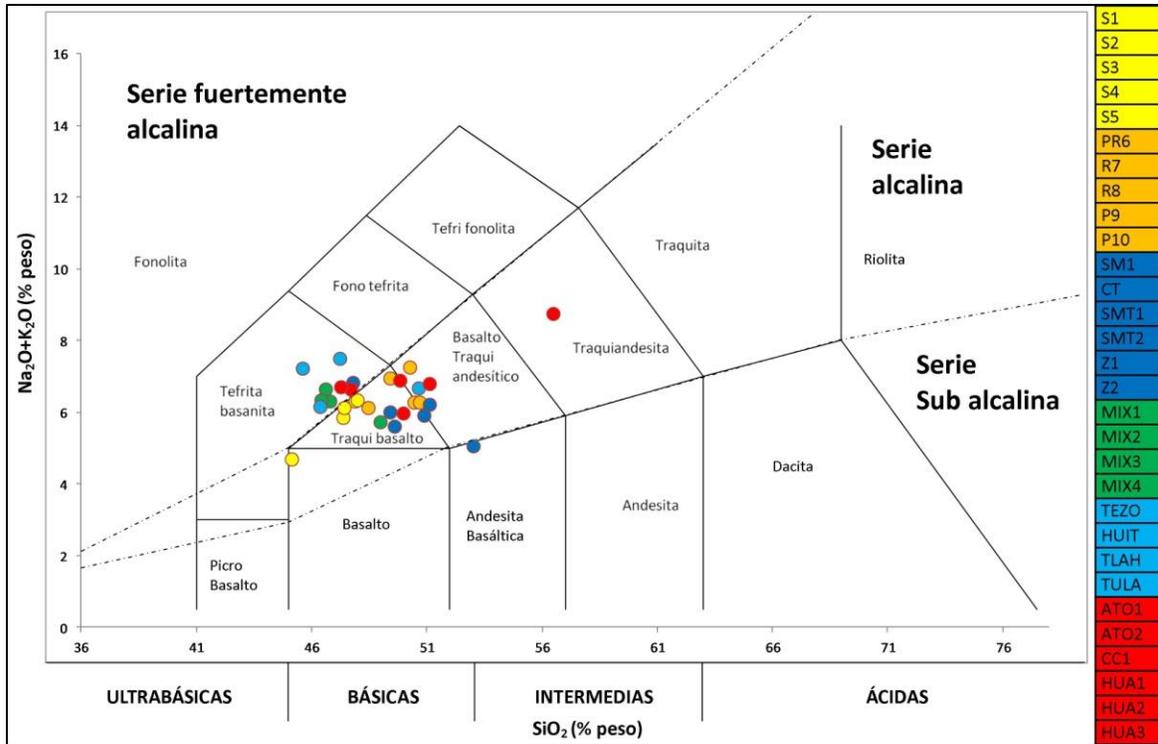


Figura 5.8 Clasificación TAS de las treinta muestras de basalto del estado de Hidalgo analizadas

De acuerdo a la clasificación TAS, al menos nueve de las treinta muestras representadas en el diagrama de la Figura 5.8, identificadas como tefrita basanita, son ideales para obtener fibras de basalto con un diámetro más controlado y uniforme (Cáceres et al, 1996).

### 5.6 Identificación de minerales en las muestras de roca basáltica con la aplicación de la norma CIPW

Para la aplicación de la norma CIPW se tomó como base el programa diseñado por (Hollocher, 2005) en el cual se toman como base los resultados del análisis químico por FRX, considerando los contenidos en % peso de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$  y  $\text{Cl}$ , así como las concentraciones en ppm de: Sr, Ba, Ni, Cr y Zr. Cabe mencionar que el diseño de dicho programa está basado en el cálculo de la norma de (Johannsen, 1931). En la Tabla 5.4 se muestran los minerales normativos identificados en base a la

aplicación de la norma CIPW, en general el mayor contenido en % peso corresponde a plagioclasa, diópsido y olivino.

Tabla 5.4 Contenido estimado de minerales en % peso de las treinta muestras de basalto analizadas de acuerdo a la norma CIPW

Minerales en % peso de acuerdo a norma CIPW																
Muestra	Plagioclasa	Ortoclasa	Nefelina	Corindón	Diópsido	Hiperstena	Olivino	Ilmenita	Magnetita	Apatito	Zirconia	Cromita	Halita	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Calcita	Cuarzo
<b>Zona Singuilucan</b>																
S1	64.57	5.41	1.54	1.45	-	-	16.2	3.84	2.42	1.37	0.57	0.03	0.04	0.18	-	-
S2	65.43	5.47	5.02	-	0.8	-	15.46	3.57	2.33	1.6	0.45	0.03	0.06	0.12	-	-
S3	50.56	7.57	9.21	-	12.56	-	11.91	3.17	2.23	0.9	0.52	0.03	0.04	0.16	-	-
S4	52.67	6.95	9.16	-	10.85	-	12.98	3.51	2.35	1.16	0.49	0.04	0.04	0.2	-	-
S5	54.25	6.51	7.58	-	8.68	-	15.6	3.48	2.52	1.02	0.48	0.03	0.06	0.16	-	-
<b>Zona Santiago</b>																
PR6	53.91	9.17	7.62	-	12.28	-	6.96	2.43	1.62	-	0.48	0.01	0.04	0.11	-	-
R7	52.07	10.35	7.81	-	14.25	-	5.77	2.13	1.51	-	0.54	0.01	0.04	0.12	-	-
R8	64.13	9.18	2.79	-	6.46	-	9.46	2.62	1.71	0.09	0.51	0.03	0.04	0.12	-	-
P9	62.48	8.41	3.07	-	8.98	-	8.84	2.72	1.74	0.05	0.57	0.03	0.04	0.09	-	-
P10	51.93	8.1	7.71	-	12.47	-	12.55	3.42	2.33	1	0.51	0.04	0.04	0.12	-	-
<b>Zona Zempoala</b>																
SM1	47.34	5.64	12.5	-	16.6	-	12.26	3.19	2.52	0.21	0.57	0.03	0.04	0.35	-	-
CT	64.65	5.98	3.27	-	7.44	-	8.92	2.24	1.61	-	0.48	0.01	0.06	0.14	-	-
SMT1	68.06	8.48	-	-	1.74	3.17	8.6	2.98	1.78	0.28	0.57	0.03	0.02	0.2	-	-
SMT2	62.78	9.83	-	-	8.24	2.05	6.96	2.32	1.62	0.3	0.48	0.01	0.04	0.16	-	-
Z1	65.83	9.24	-	-	4.03	5.62	6.26	2.73	1.74	0.32	0.54	0.03	0.04	0.3	0.61	-
Z2	63.85	8.5	-	-	1.75	15.51	-	2.28	1.8	-	0.51	0.01	0.04	0.21	-	3.41
<b>Zona Mixquiahuala</b>																
MIX1	39.34	5.37	15.22	-	24.24	-	9.46	3.49	2.32	0.09	0.48	0.04	0.02	0.18	-	-
MIX2	40.83	5.49	15.86	-	19.79	-	11.2	3.82	2.32	0.25	0.48	0.04	0.02	0.11	-	-
MIX3	50.56	3.9	7.32	-	18.27	-	15.24	2.2	2.49	-	0.54	0.06	0.02	0.18	-	-
MIX4	44.05	5.62	15.21	-	15.95	-	12.5	3.55	2.33	0.28	0.48	0.04	0.02	0.09	-	-
<b>Zona Tezontepec</b>																
TEZO1	45.63	5.24	12.61	-	15.65	-	12.67	4.43	2.52	0.83	0.54	0.03	0.02	0.14	-	-
HUIT	34.29	5.12	22.1	-	24.79	-	7.61	3.55	2.28	0.05	0.54	0.04	0.04	0.11	-	-
TLAH	42.49	5.37	18.42	-	16.75	-	10.18	3.48	2.28	0.46	0.54	0.01	0.02	0.07	-	-
TULA	52.57	10.17	6.71	-	13.64	-	11.12	2.89	2.44	0.07	0.64	0.03	0.04	0.27	-	-
<b>Zona Huasca</b>																
ATO1	45.95	10.13	6.07	-	12.38	-	13.62	4.62	3.13	2.5	0.48	0.01	0.06	0.07	-	-
ATO2	54.94	7.38	5.77	-	15.06	-	10.83	3.02	2.25	0.42	0.46	0.04	0.04	0.05	-	-
CC1	56.88	15.85	-	-	11.27	2.71	8.39	2.17	2.51	0.16	0.52	0.01	0.06	0.16	-	-
HUA1	46.65	6.7	11.95	-	16.29	-	7.98	3.78	2	0.56	0.52	0.01	0.02	0.04	-	-
HUA2	52.17	7.65	8.2	-	16.11	-	6.42	3.13	1.78	0.19	0.49	0.01	0.02	0.09	-	-
HUA3	55.33	7.72	6.52	-	15.89	-	6.41	2.87	1.74	0.05	0.54	0.01	0.02	0.04	-	-

Los minerales normativos identificados en los resultados del cálculo de la norma CIPW confirman la presencia de las fases minerales identificadas por DRX, entre las que se encuentran: plagioclasa, diópsido, olivino y magnetita.

## 5.7 Clasificación de las muestras de roca basáltica estudiadas de acuerdo al diagrama QAPF

La base para la identificación de los contenidos de cuarzo, feldespatos alcalinos, plagioclasas y feldespatoideos, es la aplicación de la norma CIPW, la cual permite obtener el contenido en % peso de cada componente y así clasificar el tipo de roca correspondiente a cada zona de muestreo, tal como se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Clasificación de las rocas de acuerdo a su contenido normativo de Q: cuarzo, A feldespatos alcalinos, P: plagioclasas y F: feldespatoideos.

<b>Diagrama QAPF para las treinta muestras de roca basáltica</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Q</b>	<b>A</b>	<b>P</b>	<b>F</b>	<b>Clasificación</b>
<b>Zona Singuilucan</b>					
<b>S1</b>	0	5.41	64.57	1.54	Basalto alcalino y hawaiiita
<b>S2</b>	0	5.47	65.43	5.02	Basalto alcalino y hawaiiita
<b>S3</b>	0	7.57	50.56	9.21	Basanita
<b>S4</b>	0	6.95	52.67	9.16	Basanita
<b>S5</b>	0	6.51	54.25	7.58	Basanita
<b>Zona Santiago</b>					
<b>PR6</b>	0	9.17	53.91	7.62	Tefrita fonolítica
<b>R7</b>	0	10.35	52.07	7.81	Tefrita fonolítica
<b>R8</b>	0	9.18	64.13	2.79	Mugarita (variedad de traquiandesita basáltica)
<b>P9</b>	0	8.41	62.48	3.07	Mugarita
<b>P10</b>	0	8.1	51.93	7.71	Basanita
<b>Zona Zempoala</b>					
<b>SM1</b>	0	5.64	47.34	12.5	Basanita
<b>CT</b>	0	5.98	64.65	3.27	Basalto alcalino y hawaiiita
<b>SMT1</b>	0	8.48	68.06	0	Basalto alcalino y hawaiiita
<b>SMT2</b>	0	9.83	62.78	0	Basalto alcalino y hawaiiita
<b>Z1</b>	0	9.24	65.83	0	Basalto alcalino y hawaiiita
<b>Z2</b>	3.41	8.5	63.85	0	Mugarita
<b>Zona Mixquiahuala</b>					
<b>MIX1</b>	0	5.37	39.34	15.22	Tefrita fonolítica
<b>MIX2</b>	0	5.49	40.83	15.86	Basanita
<b>MIX3</b>	0	3.9	50.56	7.32	Basanita
<b>MIX4</b>	0	5.62	44.05	15.21	Basanita
<b>Zona Tezontepec</b>					
<b>TEZO1</b>	0	5.24	45.63	12.61	Basanita
<b>HUIT</b>	0	5.12	34.29	22.1	Tefrita fonolítica
<b>TLAH</b>	0	5.37	42.49	18.42	Basanita
<b>TULA</b>	0	10.17	52.57	6.71	Mugarita
<b>Zona Huasca</b>					
<b>ATO1</b>	0	10.13	45.95	6.07	Mugarita
<b>ATO2</b>	0	7.38	54.94	5.77	Mugarita
<b>CC1</b>	0	15.85	56.88	0	Mugarita
<b>HUA1</b>	0	6.7	46.65	11.95	Tefrita fonolítica
<b>HUA2</b>	0	7.65	52.17	8.2	Tefrita fonolítica
<b>HUA3</b>	0	7.72	55.33	6.52	Mugarita

La clasificación QAPF permitió identificar 10 muestras de basanita, 8 muestras de mugearita (variedad de traquiandesita basáltica), seis muestras de tefrita fonolítica y seis más de basalto alcalino (hawaiita), cabe mencionar que en esta clasificación es considerado el porcentaje en peso normativo de olivino para definir subclasificaciones dentro del diagrama.

### **5.8 Microscopía óptica de polarización de las rocas analizadas**

En las muestras analizadas de la zona Singuilucan, al microscopio óptico de polarización se puede observar que tienen una textura intersertal fluidal fina, constituidas en su mayor proporción por baguetas de plagioclasa cálcica con cierta alineación que envuelven algunos fenocristales de olivino, que al igual que los anfíboles tienen un ligero halo de alteración meteórica (Figura 5.9). En los intersticios se desarrolla principalmente anfíbol. En este paquete se observa un poco el desarrollo de epidota, la cual no representa una alteración sino parte de la paragénesis, ya que no reemplaza minerales primarios. Este paquete presenta finas agujas de anfíbol que son cogenéticas con la plagioclasa ya que se desarrollan dentro de las mismas. Se observa magnetita, la cual es muy abundante, de tipo euhedral y diseminada en todo el paquete. Finalmente, la presencia de vidrio es mínima.

Por lo que se aprecia microscópicamente, este paquete corresponde a una roca volcánica básica, totalmente lávica, de enfriamiento lento por no observar suficiente vidrio; es decir se considera en la parte intermedia del paquete lávico.

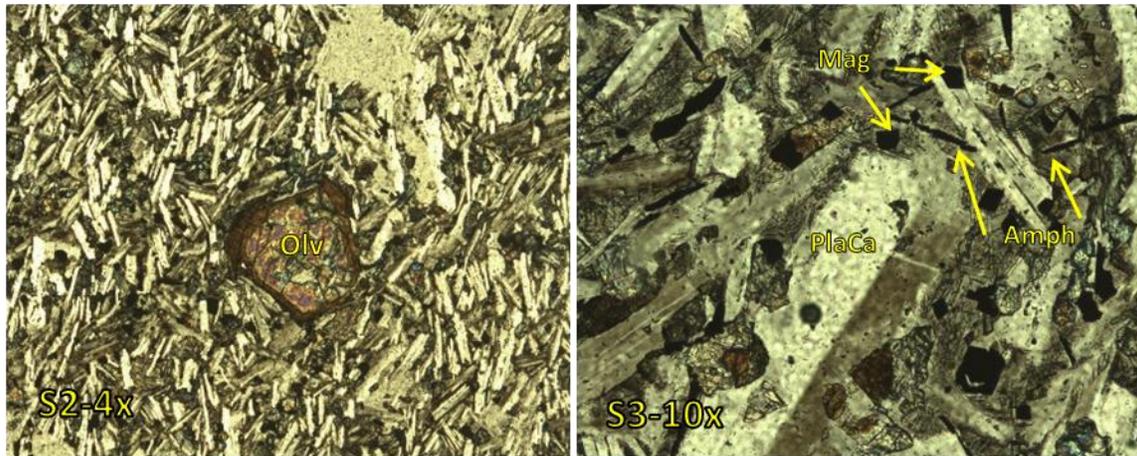


Figura 5.9 Fotomicrografías mostrando olivino (Olv), plagioclasa (PlaCa), anfíbol (Amph) y magnetita (Mag) en las muestras S2 y S3 de la zona de Singuilucan. Fotomicrografías tomadas al microscopio óptico de polarización, luz transmitida con falso color para el realce de minerales, nicoles cruzados, muestras S2 objetivo 4X, S3 objetivo 10X, campo horizontal de las microfotografías 2.00 y 0.98 mm respectivamente.

En el análisis al microscopio, las muestras de la zona Santiago presentan una textura intersertal compuesta principalmente por baguetas de plagioclasa cálcica, que en sus intersticios se desarrollan anfíboles y menor proporción de olivinos, se observó escaso piroxeno. Las muestras presentan minerales opacos (metálicos) cúbicos que deben corresponder a magnetita de grano muy fino y diseminado a través del paquete volcánico. A mayores aumentos se observa que existen baguetas de anfíboles en intersección con las plagioclasas cálcicas (Figura 5.10). Este paquete muestra en algunos niveles una relativa mayor presencia de vidrio. No presenta alteración hidrotermal, lo que puede ser confirmado por la limpieza de los cristales de plagioclasa. Lo significativo son los halos de alteración meteórica en los anfíboles. Por la textura y cohesión de cristales, el paquete corresponde a una roca de tipo lava volcánica básica (basalto).

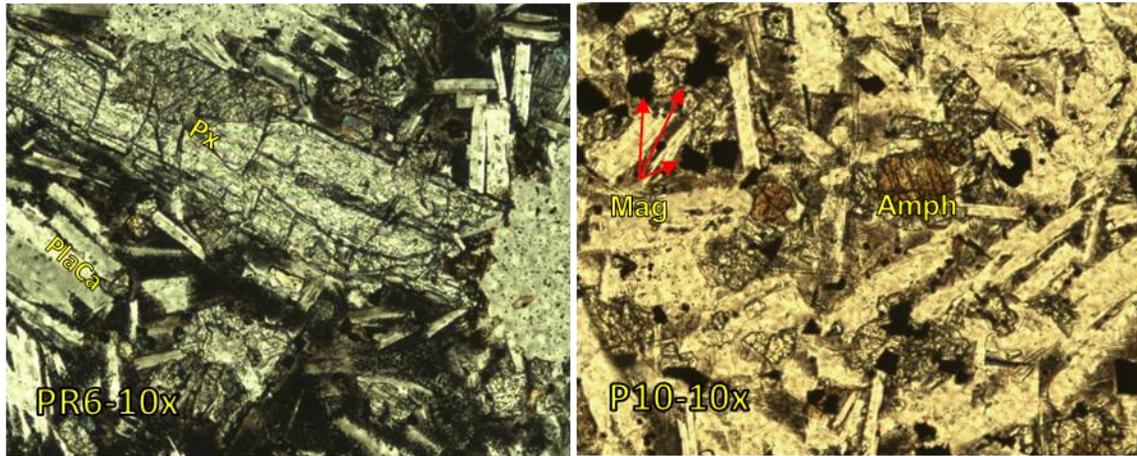


Figura 5.10 Fotomicrografías mostrando piroxeno (Px) y plagioclasa cálcica (PlaCa) en muestra PR6, anfíbol (Amph) y magnetita (Mag) en muestra P10 de la zona Santiago. Fotomicrografías tomadas al MOP, luz transmitida, con falso color para el realce de minerales, muestra PR6 nicoles cruzados, muestra P10 nicoles paralelos, objetivo 10X, campo horizontal de las micrografías 0.98 mm.

En el análisis realizado por microscopía óptica de polarización, en las muestras de la zona Zempoala, se observó que son de grano muy fino, intersertal fluidal, constituido de abundante plagioclasa cálcica y abundante olivino (son las muestras que contienen más olivino); pero también es relevante su cantidad de vidrio (Figura 5.11). En algunas muestras se observan un poco de arcillas en las oquedades que posiblemente sean zeolitas. Este paquete corresponde a un nivel volcánico que enfrió de manera muy superficial dada la cantidad de vidrio existente. Este dato es importante por la meta-estabilidad de los minerales que al ser fusionados deberán responder de una manera particular, en estas muestras sólo se puede observar la presencia de una alteración meteórica.

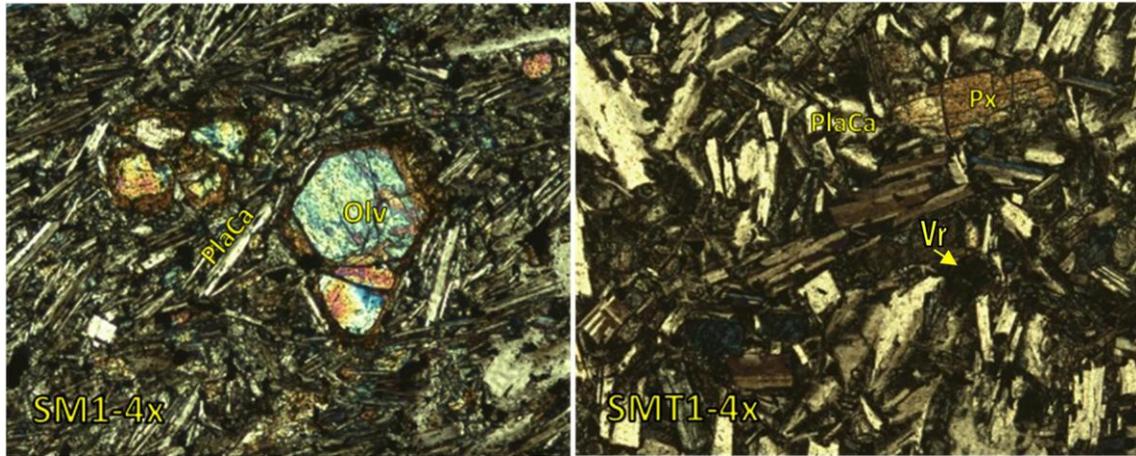


Figura 5.11 Fotomicrografías mostrando olivino y plagioclasa cálcica (SM1), plagioclasa cálcica, piroxeno (px) y abundante vidrio (Vr) en la muestra SMT1 de la zona Zempoala. Fotomicrografías tomadas al MOP luz transmitida con falso color para el realce de minerales, objetivo 4X, nicoles cruzados, campo horizontal de las micrografías 2.00 mm.

Los basaltos de la zona de Mixquiahuala se caracterizan por presentar una textura intersertal constituida por una masa de plagioclasa cálcica, no alterada, de manera intrincada se desarrolla en los intersticios piroxenos (Figura 5.12). Algunos de ellos se desarrollan en pequeños fenocristales con morfología que va desde subhedral a euhedral y se observa una ligera uralitización. Se observan algunos olivinos en fenocristales, diseminados y generalmente presentan un halo de oxidación. Desde el punto de vista microscópico, estas muestras se clasifican como basaltos de olivino, dada la presencia cardinal de plagioclasa cálcica y por la de olivino, son basaltos de olivino sin alteración hidrotermal, por lo cual es evidente su posición Plio-cuaternaria.

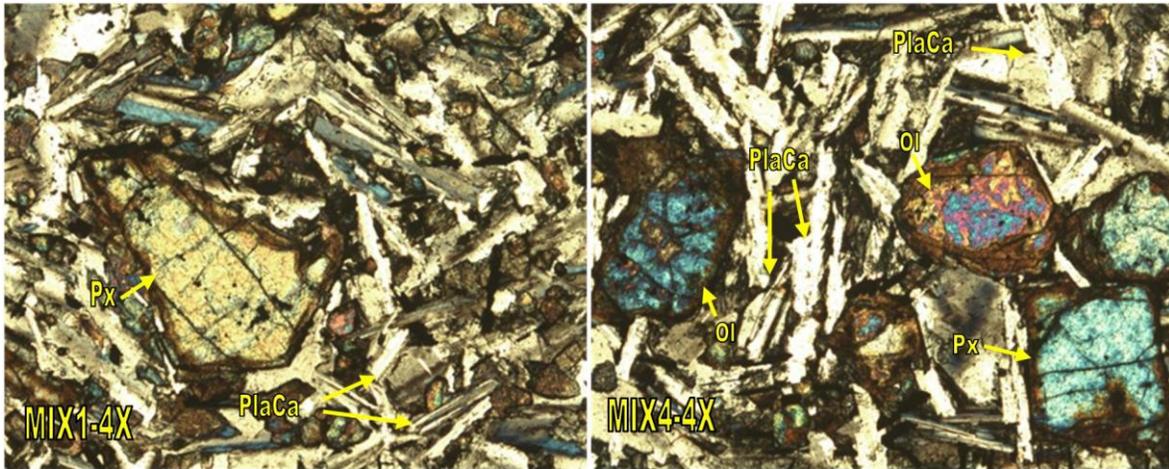


Figura 5.12 Fotomicrografías mostrando textura intersertal constituida por plagioclasa cálcica (PlaCa) y pequeños fenocristales de piroxeno (Px) en muestra MIX1, pequeños fenocristales de olivino (Ol) y piroxeno (Px) en muestra MIX4 de la zona Mixquiahuala. Fotomicrografías tomadas al MOP luz transmitida con falso color para el realce de minerales, objetivo 4X, nicoles cruzados, campo horizontal de las micrografías 2.00 mm.

Las muestras estudiadas de la zona Tezontepec corresponden a basalto fresco constituido de dos niveles, el nivel HUIT está compuesto de baguetas de plagioclasa cálcica bien formada con claro maclado polisintético y fenocristales de morfología de tipo euhedral: Esto es indicativo de que se trata de un nivel de basalto pliocuaternario de lento enfriamiento. Pero también existen niveles de rápido enfriamiento (Tula), constituido de baguetas de plagioclasa en su eje c, se observa desarrollo de poco piroxeno y sin alteración, embebidos en una matriz de vidrio Figura 5.13.

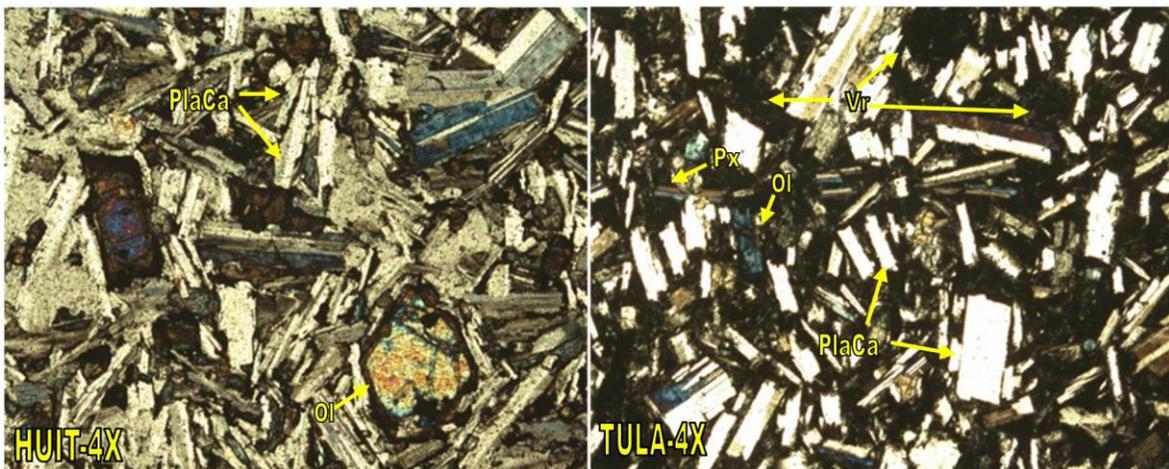


Figura 5.13 Fotomicrografías mostrando textura intersertal constituida por baguetas de plagioclasa (PlaCa) con olivino (Ol) de tipo subhedral, en la muestra HUIT; textura hialocristalina constituida por plagioclasa (PlaCa) polisintética con menor piroxeno (Px) y olivino (Ol) en matriz de vidrio (Vr), Fotomicrografías tomadas al MOP luz transmitida con falso color para el realce de minerales, objetivo 4X, nicoles cruzados, campo horizontal de las micrografías 2.00 mm.

Las muestras analizadas en la zona Huasca corresponden a dos tipos de basalto: fresco pliocuaternario y alterado hidrotermalmente de posible origen terciario. El basalto pliocuaternario (ATO-2) presenta una textura compacta microsertal porfirica, constituida por finas baguetas de plagioclasa cálcica no alterada que envuelve a pequeños fenocristales de piroxeno y olivino con típicos halos de oxidación Figura 5.14. Por las características microscópicas, la muestras corresponden a un basalto de olivino. La muestra HUA-3 presenta textura intersertal, constituida por baguetas de plagioclasa cálcica, algunas de ellas zonadas con desarrollo de epidota al centro y otras un poco argilizadas. Se observa la presencia de clorita, también alterando a la plagioclasa e intersertalmente se observa piroxeno y olivino. Por las características mineralógicas, estas muestras corresponden a un basalto terciario ya que su alteración es hidrotermal.

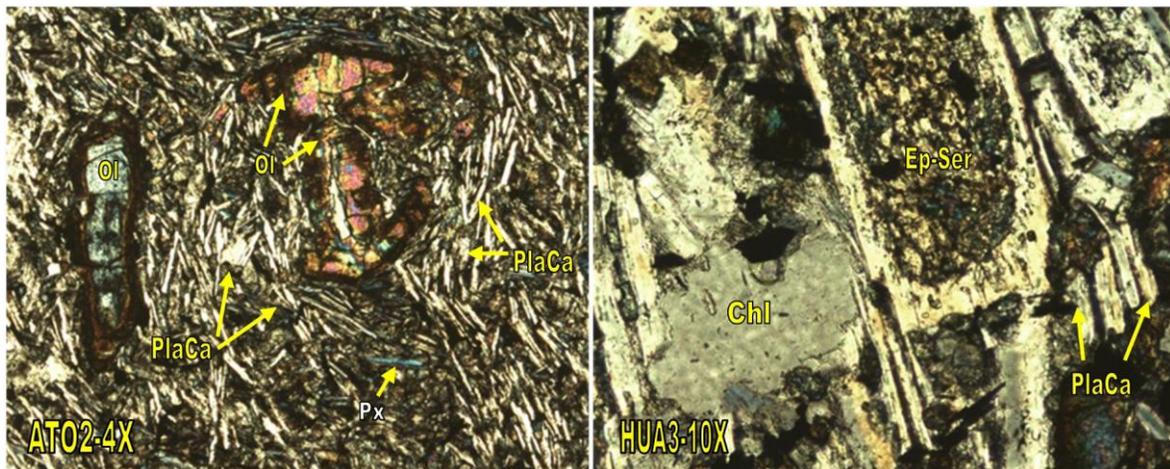


Figura 5.14 Fotomicrografías mostrando textura intersertal fluidal constituida por plagioclasa cálcica (PlaCa), con fenocristales de piroxeno (Px) y olivino (Ol) con halo de alteración en muestra ATO-2; plagioclasa que ha sido reemplaza por epidota-sericita (Ep-Ser) y clorita (Chl), en muestra HUA3. Fotomicrografías tomadas al MOP luz transmitida con falso color para el realce de minerales, objetivo 4X en muestra ATO-2 y 10 X en muestra HUA3, nicoles cruzados, campo horizontal de las micrografías 2.00 y 0.98 mm respectivamente.

## 5.9 Módulos de acidez y viscosidad de las treinta muestras de roca analizadas

De acuerdo a los datos arrojados por los análisis de FRX, fue posible calcular los módulos de acidez y viscosidad de las muestras recolectadas (ver Tabla 5.6), de acuerdo a las relaciones mostradas en la Ecuación 2.2 para obtener el módulo de acidez y en la Ecuación 2.3 para calcular el módulo de viscosidad.

Tabla 5.6 Módulos de acidez y viscosidad de las muestras de roca

<b>Muestra</b>	<b>Ma</b>	<b>Mv</b>	<b>Muestra</b>	<b>Ma</b>	<b>Mv</b>
<b>PR6</b>	7.1	2.8	<b>S1</b>	6.29	2.36
<b>R7</b>	7.15	2.88	<b>S2</b>	6.39	2.4
<b>R8</b>	7.38	2.92	<b>S3</b>	5.64	2.25
<b>P9</b>	7.14	2.84	<b>S4</b>	5.66	2.22
<b>P10</b>	5.54	2.22	<b>S5</b>	5.64	2.12
<b>MIX1</b>	4.34	1.96	<b>TEZO</b>	4.97	1.99
<b>MIX2</b>	4.67	1.99	<b>HUIT</b>	4.56	1.97
<b>MIX3</b>	4.56	2.02	<b>TLAH</b>	5.68	2.12
<b>MIX4</b>	4.9	2.05	<b>TULA</b>	6.74	2.37
<b>SM1</b>	5.29	2.11	<b>ATO1</b>	6.6	1.95
<b>CT</b>	7.06	2.88	<b>ATO2</b>	5.63	2.3
<b>SMT1</b>	7.8	2.99	<b>CC1</b>	12.58	2.86
<b>SMT2</b>	7.52	3.01	<b>HUA1</b>	5.74	2.31
<b>Z1</b>	7.37	2.94	<b>HUA2</b>	6.51	2.59
<b>Z2</b>	7.93	3.15	<b>HUA3</b>	6.65	2.68

De acuerdo a los resultados obtenidos por Perevozchikova, el total de las muestras de roca analizada se ubican por encima de 1.8 en su módulo de acidez, cuando esta roca se utiliza como materia prima para fabricar fibras, éstas deberán ser nombradas como: lana de roca, cuando el material base es basalto, entonces se le denomina lana de basalto o fibra de basalto.

## 5.10 Comparativo de pruebas térmicas en probetas antes y después del tratamiento térmico

Con la finalidad de distinguir con mayor claridad el efecto del calor en las probetas de roca, se agruparon en dos etapas de muestreo de acuerdo al orden en que este fue realizado.

En la Figura 5.15 se observa un comparativo de la primer etapa de muestreo, que agrupa a 16 muestras de basalto correspondientes a las primeras tres zonas de muestreo, Singuilucan, Santiago y Zempoala; en las imágenes es posible identificar las diferencias en la apariencia de las muestras en verde y posterior al tratamiento térmico.

En la zona de Singuilucan se observa un comportamiento similar entre las muestras S1 y S2 debido a sus altos contenidos de  $Al_2O_3$ , los cuales fueron los más altos de todas las muestras, en cuanto al  $TiO_2$  dentro de la zona Singuilucan fueron las muestras con mayor % en peso, por otra parte presentaron los menores contenidos en % peso de  $K_2O$  dentro de su zona de muestreo.

Las tres muestras restantes S3, S4 y S5 tienen una apariencia similar posterior al tratamiento térmico, con una ligera diferencia en lo pronunciado de los bordes, ya que S5 presentó menor contracción en éstos debido probablemente a su mayor contenido de  $Fe_2O_3$  y  $MgO$ , en comparación con S3 y S4, de acuerdo a los resultados del análisis químico por FRX.

En la zona Santiago se observó un comportamiento similar en las muestras R8 y P9 con la aparición de burbujas en la superficie de la pastilla, los contenidos en % peso de los principales óxidos en estas dos muestras tienen poca variación. Entre R7, PR6 y P10 hay diferencias de aspecto aunque de manera general los valores en % peso son muy parecidos, el tono mate en P10 se debe a un mayor contenido de  $MgO$  que funge como estabilizante entre el efecto de los vitrificantes como el  $SiO_2$  y el efecto de los fundentes, como el  $K_2O$ .

En la zona Zempoala la mayor contracción de las muestras Z1 y SMT2 se debe a los mayores contenidos en % peso de  $K_2O$ , en ésta última está asociada a la fase mineral albita identificada por DRX.

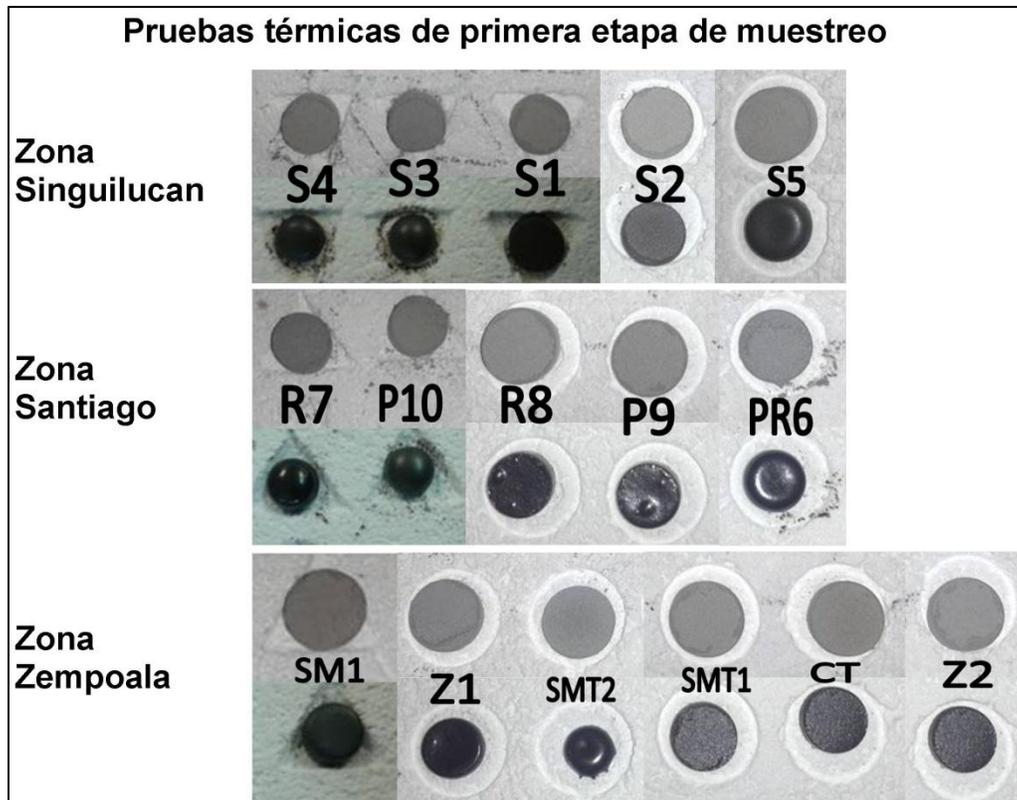


Figura 5.15 Pruebas térmicas de primera etapa de muestreo, zonas: Singuilucan, Santiago y Zempoala a 1100 °C a una tasa de calentamiento de 5 °Cmin<sup>-1</sup> en atmósfera de aire.

La Figura 5.16 presenta las catorce muestras correspondientes a la segunda etapa de muestreo que agrupa las últimas tres zonas, Mixquiahuala, Tezontepec y Huasca. Las muestras de basalto de la zona de Mixquiahuala fueron las que presentaron un mayor contenido en % peso de CaO y MgO, su comportamiento posterior al tratamiento térmico es similar en las cuatro muestras de la zona, con una ligera diferencia en la burbuja mostrada en MIX4 debido probablemente al menor contenido en % peso de dióxido normativo identificado en los resultados del CIPW.

En la serie de la zona de Tezontepec son notorias las diferencias entre la muestra TULA y HUIT, en la primera resalta el mayor contenido en % peso de SiO<sub>2</sub> como principal formador de la parte vítrea, así como el mayor contenido en % peso de ortoclasa de acuerdo a los resultados del CIPW, por otra parte, la muestra que presentó el mayor contenido en % peso de CaO fue HUIT con 10.9 %, así como la notoria diferencia en % peso de dióxido conforme al CIPW.

De las muestras de la zona de Huasca, la muestra CC1 se ubica en la clasificación TAS como traquiandesita con una apariencia más brillante que las demás debido al mayor contenido en % peso de  $\text{SiO}_2$  y de suma de álcalis  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ , estos dos últimos de naturaleza fundente. En esta muestra es evidente su mayor contenido en % peso de ortoclasa (de acuerdo al CIPW) en relación con las demás muestras de su zona.

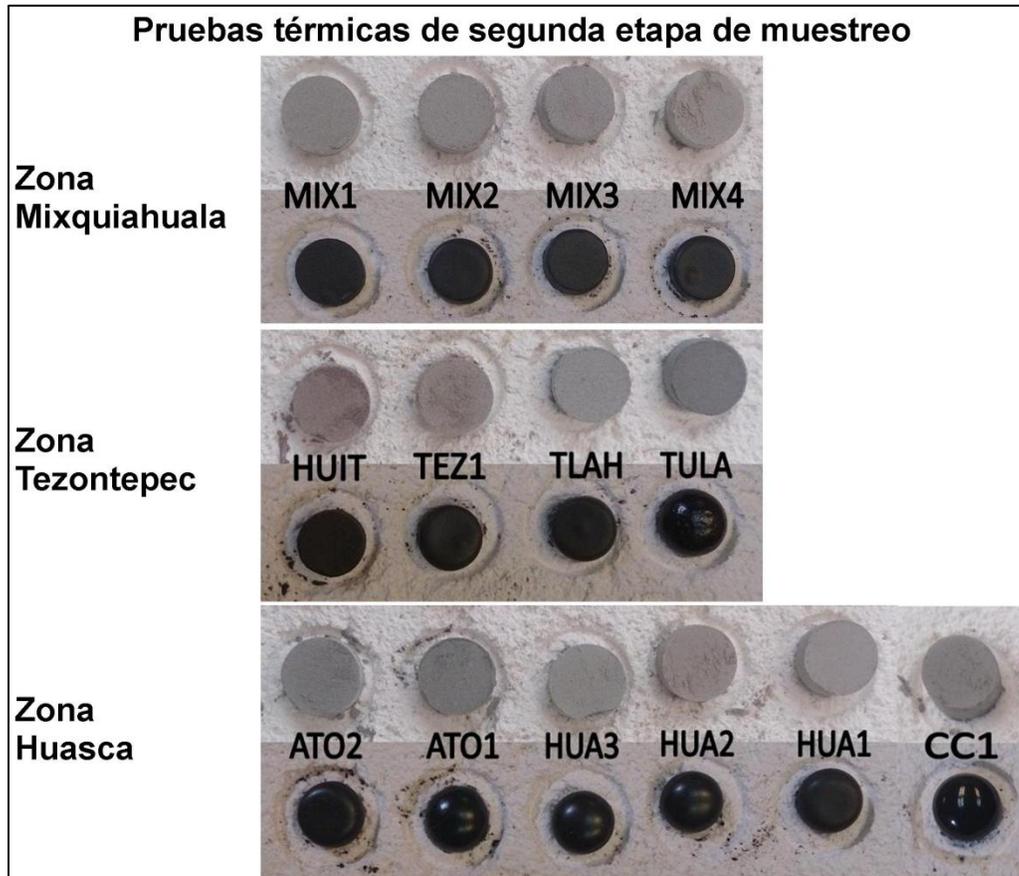


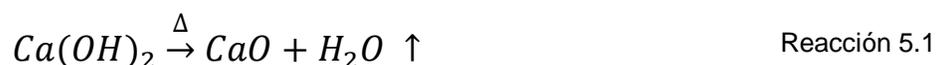
Figura 5.16 Pruebas térmicas de segunda etapa de muestreo, zonas: Mixquiahuala, Tezontepec y Huasca a  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  a una tasa de calentamiento de  $5\text{ }^\circ\text{Cmin}^{-1}$  en atmósfera oxidante.

Las muestras que experimentaron una menor temperatura en su punto de ablandamiento fueron: SMT2, PR6, P10, S3, S4, R7, ATO1, CC01, TULA, HUA2 y HUA3, esto reflejado en la mayor pronunciación de los bordes en las probetas después del tratamiento térmico asociado, en parte, a la mayor intensidad del pico presentado en DRX a una  $d=4.04$  que corresponde a la fase mineral andesina; en un punto intermedio se encuentran: Z1, Z2, S5, R8, P9, SM1, ATO2, HUA 1, TLAH

Y TEZ1 mostrando una apariencia intermedia entre las pastillas que no experimentaron deformación en sus bordes y aquellas con apariencia semi esférica, por otra parte aquellas que más resistieron al tratamiento térmico fueron: S1, S2, SMT1, CT, HUIT, MIX y MIX3 relacionado con un menor contenido en % peso de ortoclasa de acuerdo a los datos obtenidos en los resultados del CIPW.

### **5.11 Análisis termogravimétrico de ocho muestras de roca analizadas**

Como parte de las pruebas térmicas realizadas a la roca basáltica, se encuentra el análisis termogravimétrico, por sus siglas en inglés (TGA), el cual fue realizado en 8 muestras representativas de las seis zonas de muestreo, tomando como referencia las diferencias observadas en la apariencia de las probetas compactadas antes y después del tratamiento térmico, mostradas en el apartado 5.9. En las curvas ATG (Figura 5.17) se observan dos muestras (S2 - línea roja y CT- línea azul oscuro) con un comportamiento similar alrededor de los 425 °C, este efecto es más evidente en los picos identificados a la temperatura mencionada en la gráfica (DTG) que corresponde a la primera derivada de la masa con respecto del tiempo ver Figura 5.18. De acuerdo a lo reportado por (El Didamony et al., 2012) se debe a la descomposición del portlandita (hidróxido de calcio) que pertenece a la serie sólida de la brucita y que surge como producto del intemperismo de estas rocas, ver (Reacción 5.1).



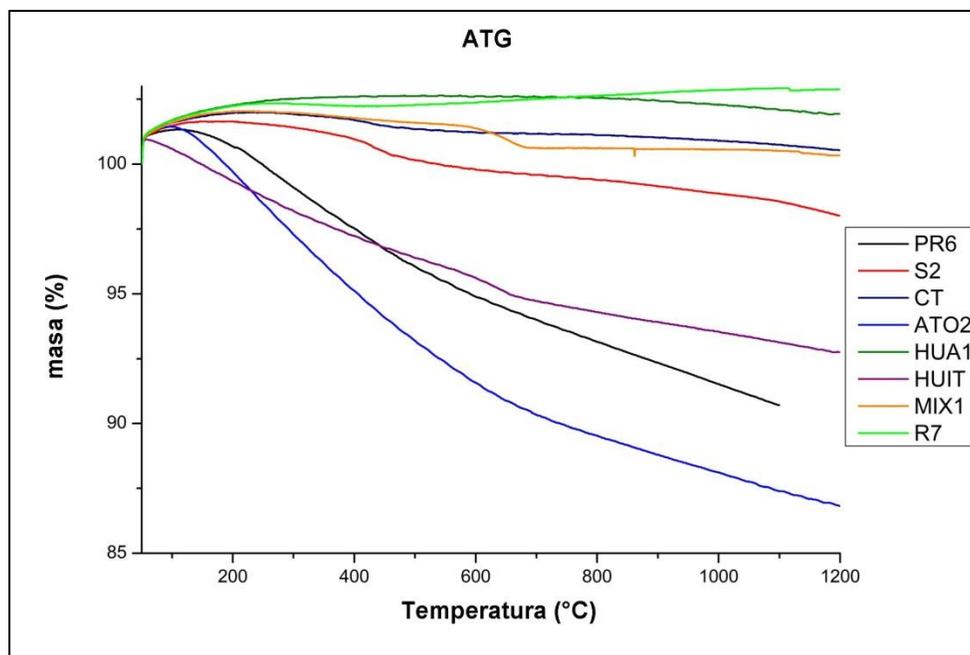
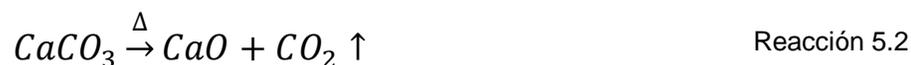


Figura 5.17 TGA de muestras de roca representativas de las seis zonas de muestreo: zona Singuilucan (S2), zona Santiago (PR6 y R7), zona Zempoala (CT), zona Mixquiahuala (MIX1), zona Tezontepec (HUIT) y zona Huasca (ATO2 y HUA1)

### 5.11.1 Primera derivada del ATG de muestras de roca representativas

En la Figura 5.18 b) es posible identificar dos muestras (MIX1- línea naranja y HUIT- línea morada) con picos endotérmicos pronunciados en un mismo rango de temperaturas (557 °C - 700 °C), con la mayor intensidad en 643 °C en la muestra MIX1 y en 632 °C en la muestra HUITEL debido a la descomposición del carbonato de calcio (El Didamony et al., 2012) presente en zeolitas y anfíboles (MMG<sup>6</sup>, 2018) ver Reacción 5.2.



<sup>6</sup> MMG- Museo Mineralógico Geológico

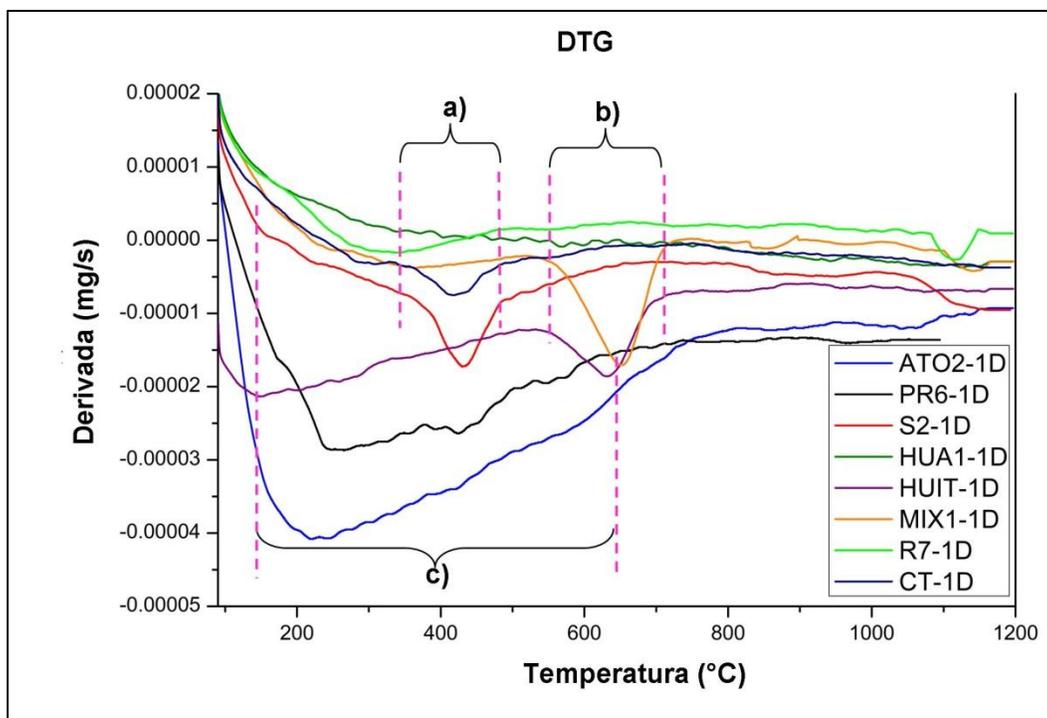


Figura 5.18 DTG de muestras de roca representativas de las seis zonas de muestreo: zona Singuilucan (S2), zona Santiago (PR6 y R7), zona Zempoala (CT), zona Mixquiahuala (MIX1), zona Tezontepec (HUIT) y zona Huasca (ATO2 y HUA1)

La pérdida de masa en un rango (150-600°C) asociada a las muestras (ATO2 en azul claro, PR6 en negro, HUIT en morado y R7 en verde claro) representadas en la Figura 5.18 se debe a la deshidratación y cambios en la estructura cristalina de distintos tipos de zeolitas (Gelves, 2017), identificadas en muestras de roca basáltica.

### 5.11.2 Análisis termogravimétrico de fibras comerciales FV01, FV02 y LR

En la Figura 5.19 se presenta el termograma de tres fibras comerciales analizadas utilizadas como aislante (FV01-color rojo, FV02-color negro y LR-color azul). Aparentemente la fibra FV02 presenta un comportamiento más estable antes de los 800 °C, sin embargo alrededor de los 820 °C experimenta un pico endotérmico que representa la degradación de esta fibra Figura 5.20 f), lo cual se confirma en el comparativo de degradación de las fibras (FV01, FV02 y LR) después de realizado el análisis ATG, ver Figura 5.21. En la fibra LR se muestra un ligero

escalón alrededor de 600 °C que es más evidente en la gráfica DTG, en la fibra FV02 los cambios más evidentes se presentan aproximadamente a 250 °C y el más pronunciado entre 600 y 700 °C, estos cambio se interpretan en la gráfica DTG.

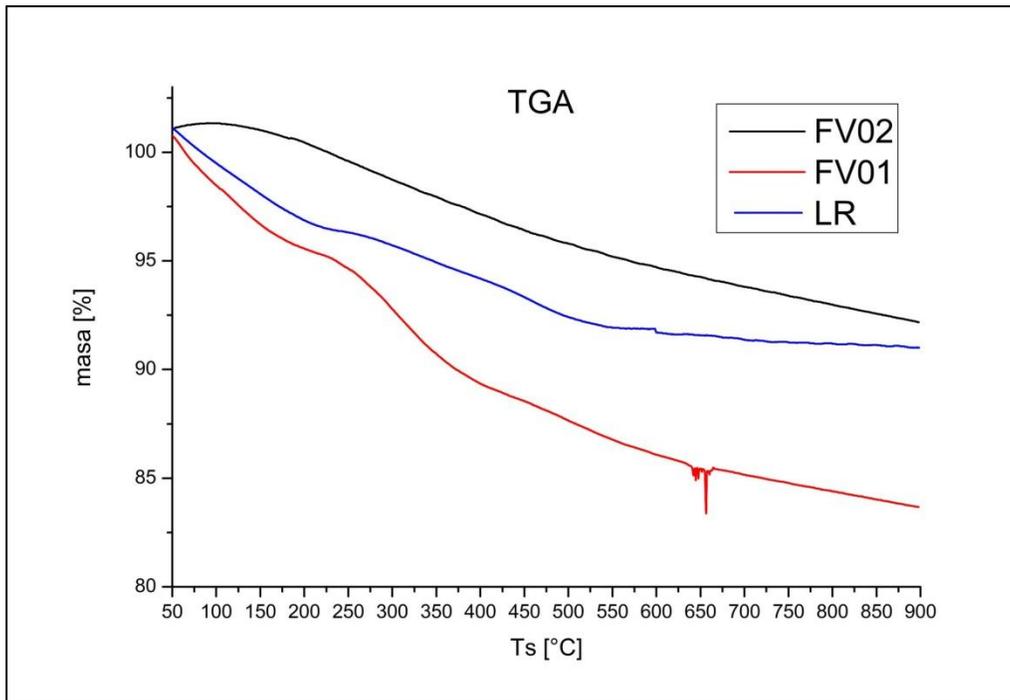


Figura 5.19 ATG de fibras comerciales analizadas utilizadas como aislante térmico (FV01-rojo, FV02-negro y LR-azul)

En la primera derivada de la masa con respecto del tiempo (DTG) de las fibras comerciales se muestra en la Figura 5.20, donde la fibra FV01 presenta un pico endotérmico pronunciado a 300 °C a) relacionado con el inicio de la degradación de la fibra, posteriormente muestra dos picos endotérmicos siendo el más intenso alrededor de los 650 °C b), se observa lo que podría representar la fusión de la fibra, aparentemente después de los 700 °C alcanza su estabilidad, sin embargo esta fibra se fundió completamente al terminar el análisis ATG. En el caso de la fibra LR presenta los principales picos endotérmicos a 450 °C y 600 °C c), los cuales no representan alteración visible de la fibra después del análisis ATG a 900 °C, ver (Figura 5.21).

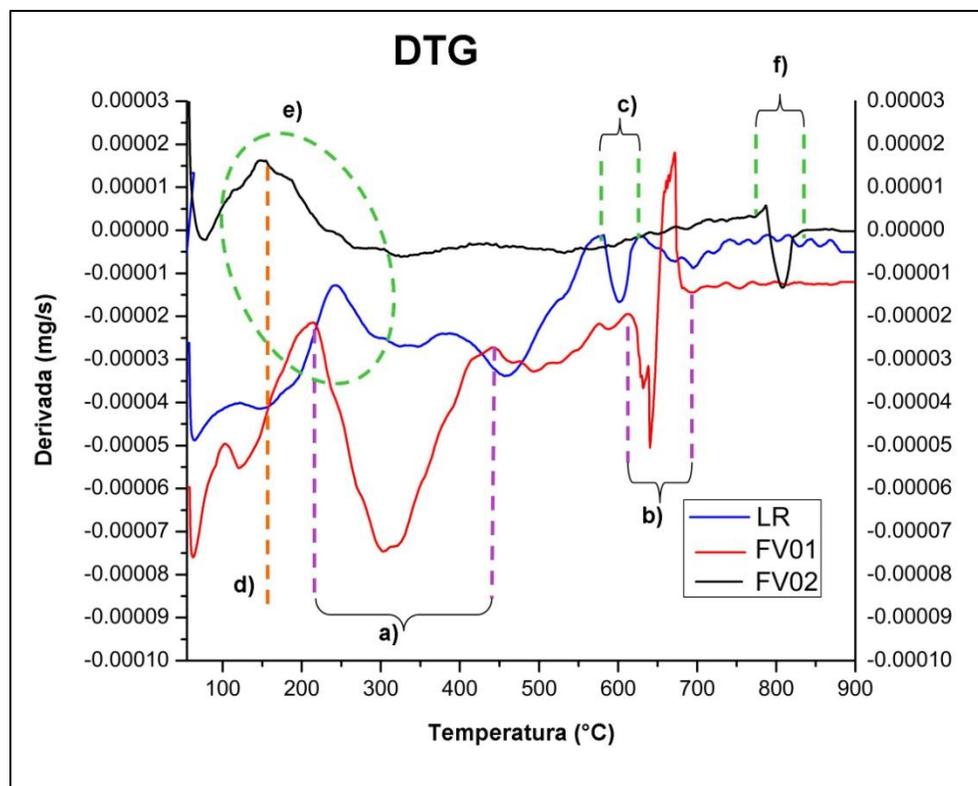


Figura 5.20 Primera derivada DTG fibras comerciales analizadas utilizadas como aislante térmico (FV01-rojo, FV02-negro y LR-azul)

Antes de los 150 °C las tres muestras de fibra presentan pérdida de masa asociada a la pérdida de humedad de las fibras, posteriormente tienen un comportamiento similar con picos exotérmicos entre 150- 250 °C e) ocasionados por la interacción de las fibras en la atmósfera de aire.

### 5.11.3 Alteración de fibras comerciales analizadas posterior al análisis ATG

Se realizó la comparación de las fibras analizadas por ATG una vez concluido el análisis, en la Figura 5.21 se observan diferencias en la degradación, independientemente de la pérdida de masa experimentada durante el análisis. En el caso de la muestra FV01 es evidente que la fibra se fundió completamente adhiriéndose a la tapa del crisol (a); la muestra de fibra FV02 se degradó haciendo evidente la contracción experimentada (b), además de mostrar un cambio en su coloración de rosa claro a un tono café claro; por último, la muestra de fibra LR

(lana de roca) muestra poco daño después de someterse a las mismas condiciones que las dos fibras de vidrio mencionadas con anterioridad (c). Tanto el análisis químico por ICP como los resultados del mapeo elemental de las fibras, indican mayores concentraciones en % peso de CaO, MgO y MnO en la fibra LR; así como un mayor contenido en % peso de K<sub>2</sub>O en FV01 relacionado con una menor temperatura de fusión con respecto de FV02. Es importante mencionar que la fibra FV02 debe soportar una mayor temperatura de operación en comparación con FV01 debido a su aplicación final como aislante térmico y acústico, ya que FV01 se utiliza como aislante en paredes y FV02 como aislante en techos de dos aguas.

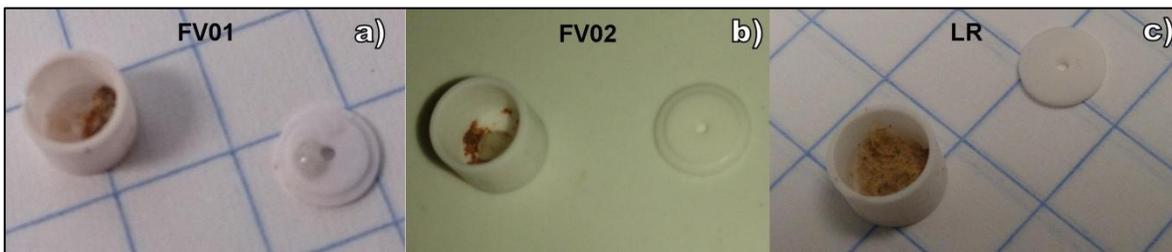


Figura 5.21 Apariencia de las fibras comerciales posterior a su análisis por ATG

## 5.12 Comparativo de análisis químico por ICP de fibras comerciales

Los resultados del análisis químico por espectrofotometría de acoplamiento inductivo de las cuatro fibras comerciales analizadas se muestran en la Tabla 5.7. La muestra FV01 se refiere a una fibra de vidrio de la marca *Owens Corning* utilizada como aislante térmico y acústico principalmente en paredes construidas con paneles de yeso, es comparada con la muestra de fibra de vidrio (FV02) también utilizada como aislante en techos de dos aguas. La muestra FV01 posee contenidos similares de SiO<sub>2</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub>; FV01 contiene ligeramente mayor % en peso de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, menor contenido de CaO, mayor contenido de K<sub>2</sub>O, mayores contenidos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y menor contenido de MnO, en comparación con la fibra de vidrio utilizada como aislante en techos. Cabe mencionar que en el

análisis de morfología, la muestra FV02 presenta una mayor proporción de fibras más delgadas que la muestra FV01.

La muestra de la fibra marca Rockwool (LR) está clasificada en la misma categoría que las fibras FV01 y FV02 debido a que todas ellas se utilizan principalmente como aislantes térmicos y acústicos en construcción residencial, LR es de color café, probablemente por su mayor contenido en % peso de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (6.47%), además del Hierro, contiene mayor proporción en % peso de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$ . Cabe señalar que el contenido en % peso en base a óxidos de esta fibra (LR) es el que más se asemeja al contenido de una roca basáltica, como las de las muestras de roca analizadas en este estudio. La muestra de fibra (MOR) es producida por la empresa *Morgan Advanced Materials* ubicada en la Ciudad de Pachuca, Hgo., ésta es una muestra de fibra cerámica cuya aplicación es de aislamiento térmico pero su uso es principalmente en la industria (temperatura máxima de operación alrededor de  $1200^\circ\text{C}$ ). Sin embargo se toma como referencia para identificar sus diferencias de morfología y composición química, en comparación con las otras muestras de fibra. Esta muestra (MOR) está constituida principalmente por  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  casi en la misma proporción, seguido de 3.52% en peso de  $\text{Na}_2\text{O}$ , menor contenido de  $\text{K}_2\text{O}$  y muy poco  $\text{TiO}_2$ .

Tabla 5.7 Análisis químico por ICP de fibras comerciales analizadas

FIBRA	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3^*$	$\text{MnO}$	$\text{TiO}_2$
FV01	1.96	75.65	4.17	2.46	0.84	14.32	0.31	0.24	0.04
FV02	1.59	74.26	5.72	2.52	0.59	14.44	0.14	0.70	0.03
LR	13.48	49.01	12.92	6.93	1.37	8.70	6.47	0.24	0.89
MOR	46.65	49.43	0.00	0.00	0.33	3.52	0.00	0.00	0.07

### 5.13 Resultados durante el proceso de fibrado

Al realizar pruebas con la traquiandesita CC1 no se logró el punto de fluidez adecuado para la generación de las fibras debido al rápido enfriamiento del material fundido en su traslado de la zona de fundido hacia el mecanismo de fibrado. Para mejorar las condiciones de fluidez adecuada para la elaboración de fibras de basalto se consideró la aplicación de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) en 20% en peso como aditivo fundente a una de las muestras ATO1 que teóricamente entraría en

la clasificación de condiciones ideales para obtención de fibra de basalto, cuyo contenido de  $\text{SiO}_2$  es menor a 50% en peso, el contenido de  $\text{K}_2\text{O}$  superior al 1% reduce su temperatura de fusión, esto aunado a los altos contenidos de  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$ , que mejoran las condiciones de fibrado en cuanto al diámetro y uniformidad en la obtención de las fibras, debido a su acción estabilizante entre los efectos de los óxidos formadores de red vítrea como el  $\text{SiO}_2$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  y los efectos de los fundentes, principalmente de los óxidos alcalinos como el  $\text{K}_2\text{O}$  y el  $\text{Na}_2\text{O}$ , el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tiene un efecto estabilizante en el proceso de fibrado, incrementando la resistencia mecánica, mejorando la estabilidad química a ácidos y álcalis, sin embargo incrementa la viscosidad y la tensión superficial del fundido.

La velocidad angular de los rodillos 1 y 2 en el proceso de fibrado fue de  $\omega=262$  rad/seg, logrando obtener fibras de hasta  $30\mu\text{m}$ , variando las condiciones de diámetro de rodillos y de la velocidad angular se lograrían obtener fibras más delgadas, sin embargo el principal objetivo del presente trabajo de investigación fue logrado al comprobar la calidad del basalto como materia prima para producir fibra de basalto.

Con un diámetro en los rodillos de 5 cm y la velocidad angular mencionada en el párrafo anterior se lograron obtener fibras del orden de 40 cm de largo, comprobando el tipo de aplicación que podría dársele a la mayoría de las muestras de basalto obtenidas, de acuerdo a la clasificación basada en sus módulos de acidez y viscosidad, en la cual se afirma que por encima de 1.8 en los módulos de acidez de la roca es factible su uso para elaborar fibras más largas y más resistentes, incluso para el método conocido como fibras de basalto continuas, por otra parte un módulo de viscosidad alto reduce la tendencia de cristalización de las fibras obtenidas.

#### **5.14 Comparación elemental por EDS de fibras obtenidas en laboratorio con las fibras comerciales**

El análisis del mapeo y/o cartografía elemental de las muestras de fibras comerciales y de las fibras obtenidas en laboratorio fue realizado en un microscopio electrónico de barrido marca JEOL, modelo 6300, con EDS acoplado.

La rutina de trabajo fue: para FV01, LR y MOR a 500 magnificaciones y FV02 a 5000 magnificaciones, con un voltaje de aceleración de 15Kv. Para la fibra obtenida en laboratorio FLAB fue, a 100 magnificaciones, con un voltaje de 20kV. Los resultados del mapeo elemental en las cinco fibras analizadas se presentan en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 Comparativo del mapeo elemental de fibras comerciales con las fibras obtenidas en laboratorio expresado en % peso de elementos identificados

MUESTRA	O K	Na K	Mg K	Al K	Si K	K K	Ca K	Mn K	Ti K	Fe K	Ba L
FV01	65.57	7.77	0.56	0.44	20.95	0.27	4.43	-	-	-	-
FV02	61.07	8.14	0.77	0.40	23.31	-	5.53	0.77	-	-	-
MOR	60.23	0.28	-	17.63	21.41	-	0.45	-	-	-	-
LR	55.55	1.27	3.32	4.90	14.72	0.68	13.37	-	0.20	4.95	1.04
FLAB	31.42	2.30	1.85	11.26	22.96	1.17	15.09	-	2.01	11.94	-

El mapeo de los elementos que conforman la muestra FV01 se muestra en la Figura 5.22, confirmando al silicio como elemento más abundante en la muestra, y en menor proporción al sodio, aluminio, calcio, magnesio y potasio.

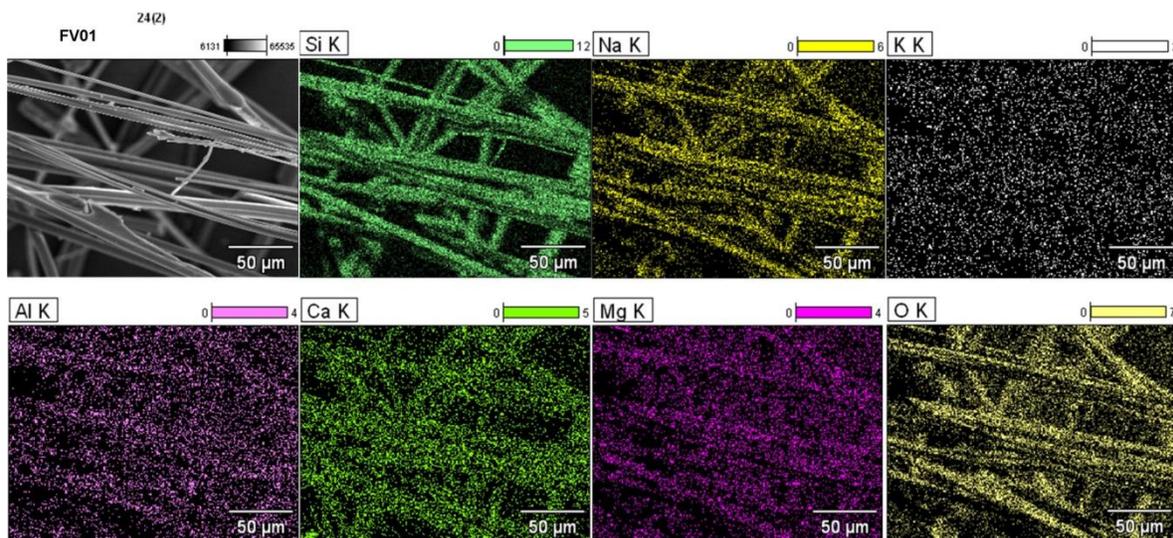


Figura 5.22 Mapeo de los elementos que conforman la fibra de vidrio FV01, 500X, 15Kv

La identificación elemental de la fibra FV02 se presenta en la Figura 5.23, la distribución elemental es muy parecida a la obtenida en FV01 con ligeras diferencias en los contenidos de calcio y magnesio, no se identificó potasio, sin

embargo en esta fibra se presenta manganeso como elemento constituyente en menor proporción de la fibra.

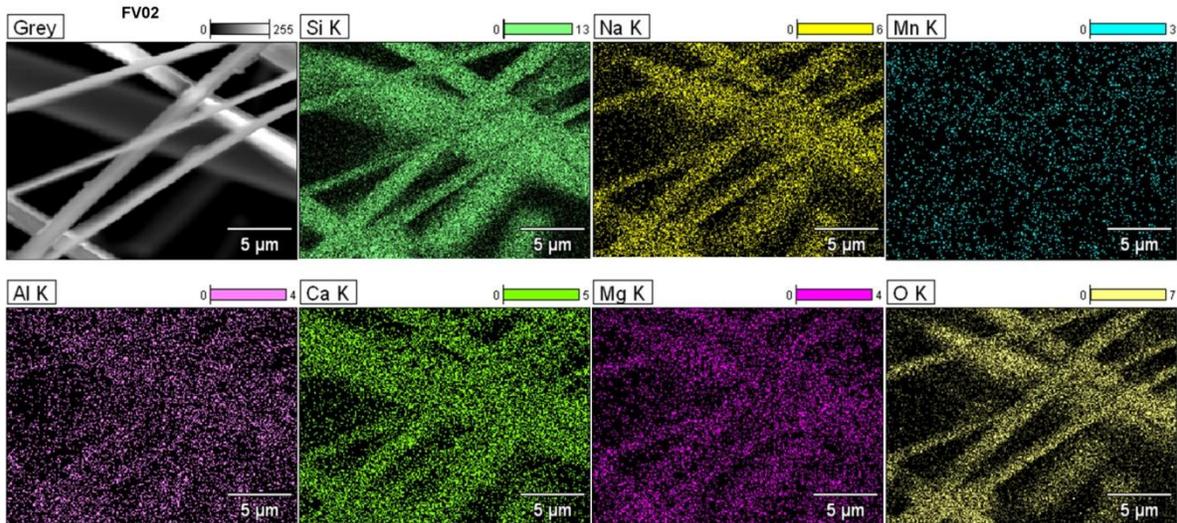


Figura 5.23 Mapeo de los elementos que conforman la fibra de vidrio FV02, 5000X, 15Kv

En la Figura 5.24 se muestra el mapeo realizado a la muestra de fibra comercial LR, en la cual fueron identificados una mayor cantidad de elementos, en comparación con la composición elemental de las otras fibras comerciales analizadas, tal es el caso del: Fe, Ti y Ba,

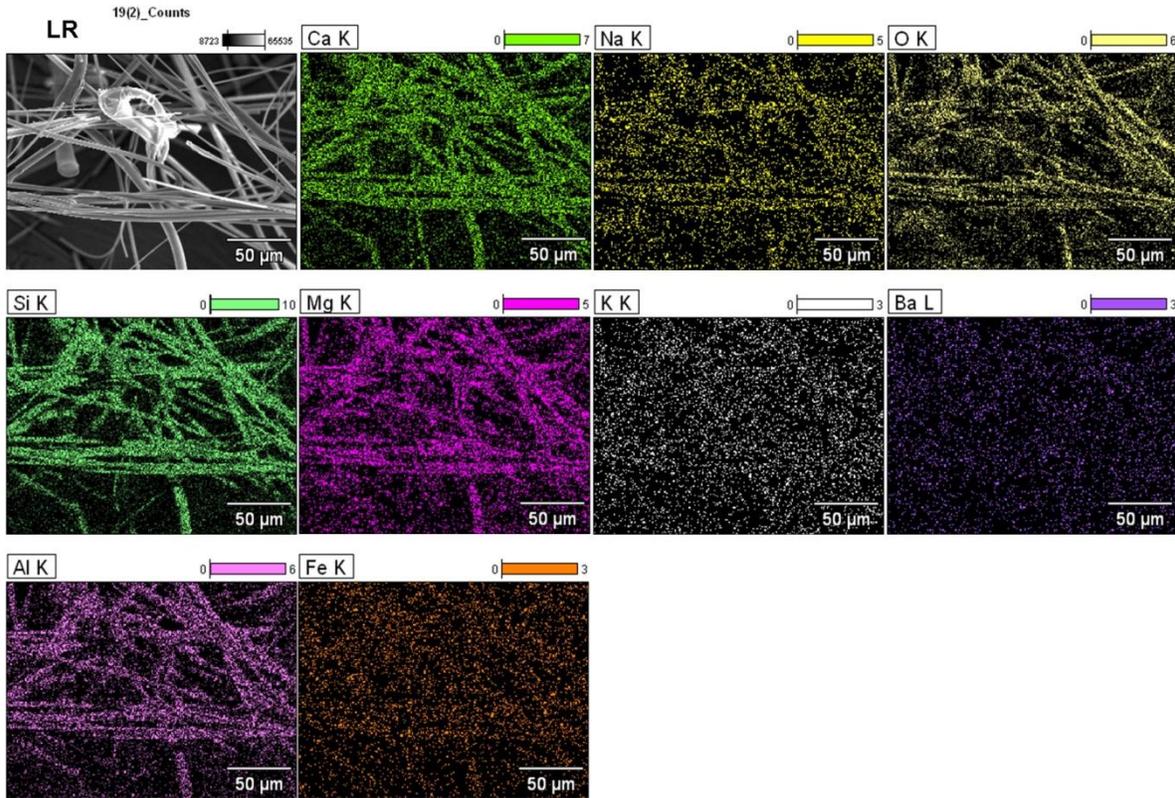


Figura 5.24 Mapeo de los elementos que conforman la fibra LR, 500X, 15Kv

Es importante señalar que los elementos identificados son los principales formadores de los óxidos que constituyen una roca basáltica, por otra parte, se identificó presencia de bario en esta fibra, cabe mencionar que este elemento se encuentra en forma de traza en los análisis de FRX realizados a las rocas basálticas estudiadas.

En el mapeo de la fibra MOR se observa al Si y Al como los principales elementos que la constituyen, es evidente que los contenidos de calcio y sodio en estas fibras es mínimo en comparación con el Si y Al (Figura 5.25). Esta fibra a diferencia de las otras tres fibras comerciales analizadas tiene un uso de tipo industrial y se clasifica de manera distinta de acuerdo a su máxima temperatura de operación alrededor de los 1200 °C.

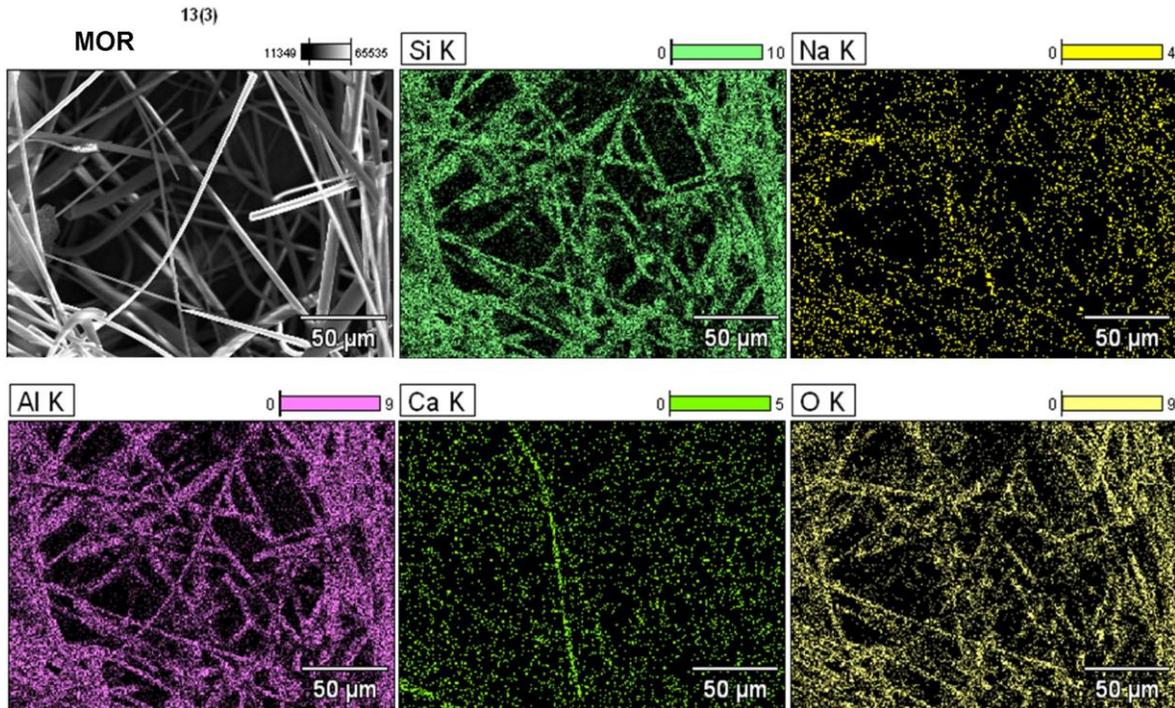


Figura 5.25 Mapeo de los elementos que conforman la fibra cerámica MOR, 500X, 15Kv

En los resultados del mapeo elemental de la fibra de basalto obtenida en laboratorio (FLAB), se tomó como materia prima a la muestra de roca ATO1 de la zona Huasca. Se observó que contiene una mayor proporción de silicio, seguido del calcio, esto es debido al 20 % en peso de carbonato de calcio utilizado como aditivo para reducir el punto de fusión de la roca y en menor proporción otros elementos como hierro, aluminio, sodio, titanio, magnesio y potasio (Figura 5.26).

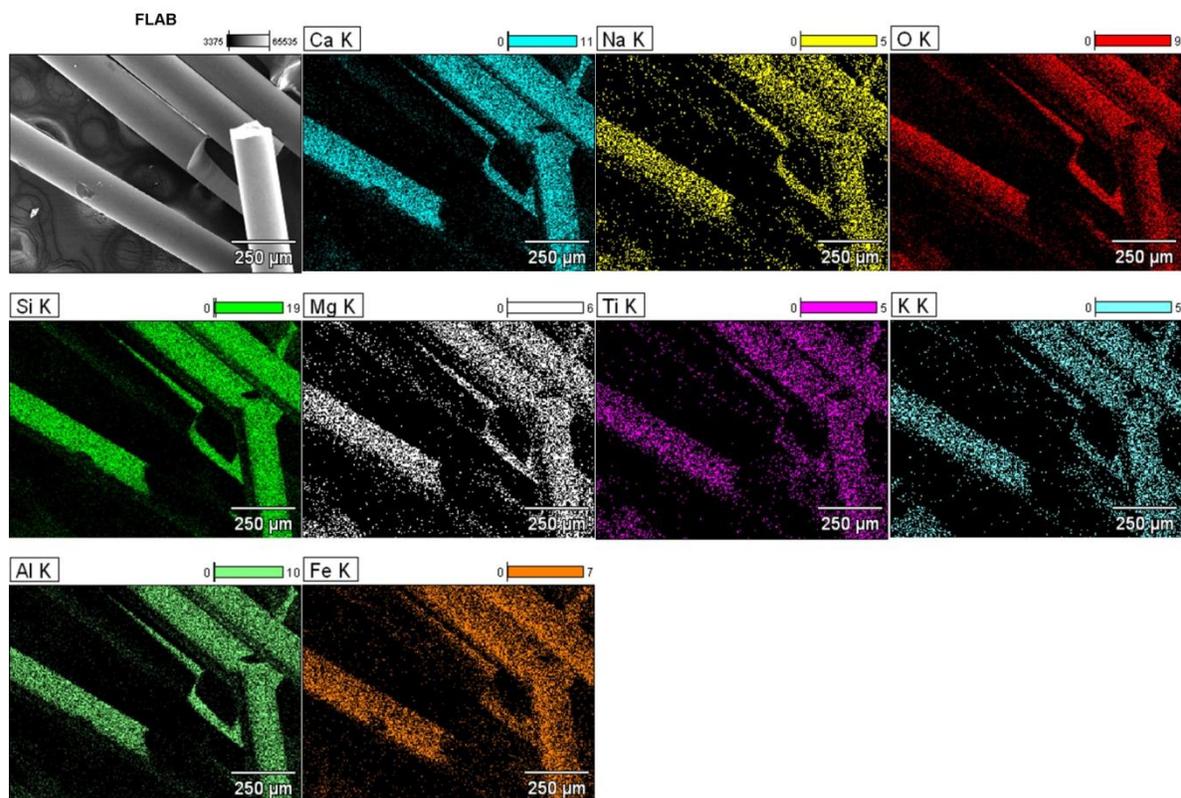


Figura 5.26 Mapeo de los elementos que conforman la fibra obtenida en laboratorio FLAB, 100X, 20 Kv

De acuerdo a los elementos identificados en el mapeo elemental realizado a las cuatro fibras comerciales utilizadas como referencia en el presente estudio, es evidente la homogeneidad de los elementos químicos en las fibras de vidrio analizadas.

Se nota una mayor proporción en los contenidos de sodio, calcio y magnesio en la muestra FV02 con respecto de FV01. Estos dos últimos elementos formadores del CaO y MgO utilizados en la industria para obtener fibras más delgadas y más uniformes. La muestra LR contiene elementos no identificados en las demás muestras de fibras comerciales, como son: el titanio, hierro y bario, sin embargo la fibra obtenida en laboratorio FLAB presenta titanio y un alto contenido de hierro.

En la muestra de la fibra comercial MOR se confirman los datos obtenidos en el análisis por ICP, identificando como elementos constituyentes, principalmente al silicio y aluminio.

Con el objetivo de tener un punto de comparación más claro sobre el contenido elemental de las fibras comerciales y la fibra obtenida en laboratorio, se realizaron los cálculos para obtener el contenido en % peso en óxidos de los elementos identificados, ver Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Comparativo en % peso de óxidos entre las fibras comerciales y la fibra obtenida en laboratorio.

FIBRA	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	MnO	TiO <sub>2</sub>	BaO
FV01	1.37	70.75	5.19	1.58	3.75	17.36	-	-	-	-
FV02	1.05	69.64	10.80	1.79	-	15.32	-	1.40	-	-
MOR	40.10	58.13	0.83	-	-	0.94	-	-	-	-
LR	11.87	42.03	24.22	7.07	0.97	2.22	9.45	-	0.43	1.74
FLAB	17.79	41.10	17.68	2.56	1.18	2.59	14.29	-	2.79	-

De acuerdo a la comparación de los óxidos entre la fibra comercial LR y la fibra obtenida en laboratorio FLAB (filas marcadas en gris en la Tabla 5.9) se puede deducir que es probable que en la muestra de fibra LR haya sido utilizada roca basáltica como principal materia prima para su elaboración, ya que las proporciones en % peso de los óxidos calculados son muy similares a los obtenidos en la fibra FLAB.

### 5.15 Comparativo de morfología de las fibras comerciales analizadas con las fibras obtenidas en laboratorio

En la micrografía mostrada en la Figura 5.27 correspondiente a la fibra FV01 (marca Owens Corning), utilizada principalmente como aislante térmico y acústico en paredes construidas con paneles de yeso se puede identificar la relativa uniformidad de los diámetros alrededor de los 10 µm. Se observa un menor contenido de fibras con un diámetro entre 2-3 µm, físicamente presenta un color rosa claro que puede ser dado por el tipo de resina utilizada en parte del proceso de producción.

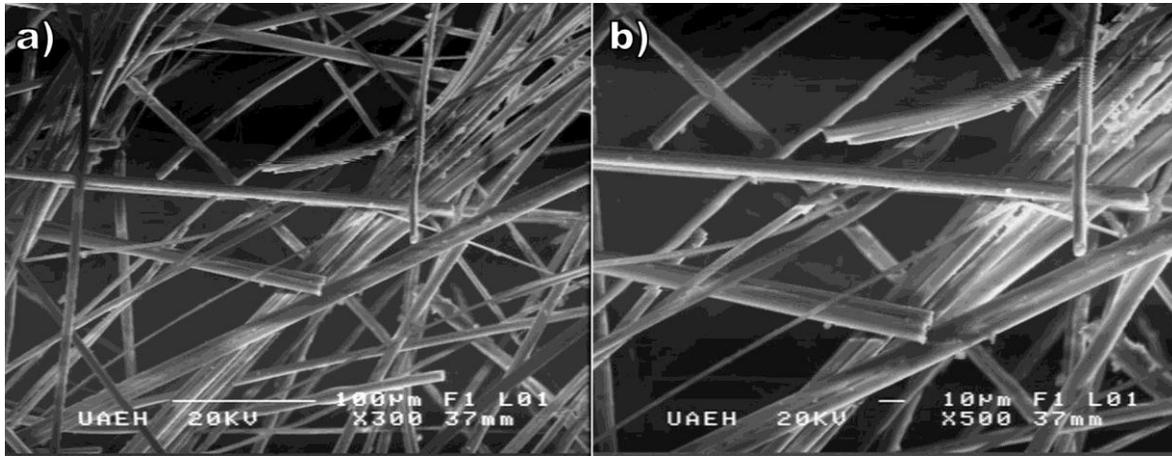


Figura 5.27 Micrografías de la muestra de fibra de vidrio FV01, a) 300X, b) 500X

La fibra de vidrio FV02 (Figura 5.28), del mismo fabricante que FV01 presenta mayor variación en los diámetros, observando una mayor cantidad de fibras más delgadas alrededor de 1 µm, esto es evidente al tacto, ya que la muestra FV02 se percibe más suave que la FV01. Esta diferencia es importante en el proceso de aplicación de la fibra ya que es abastecida con una manguera para su aplicación, mientras que, la FV01 es colocada en espacios entre los paneles que conforman un muro.

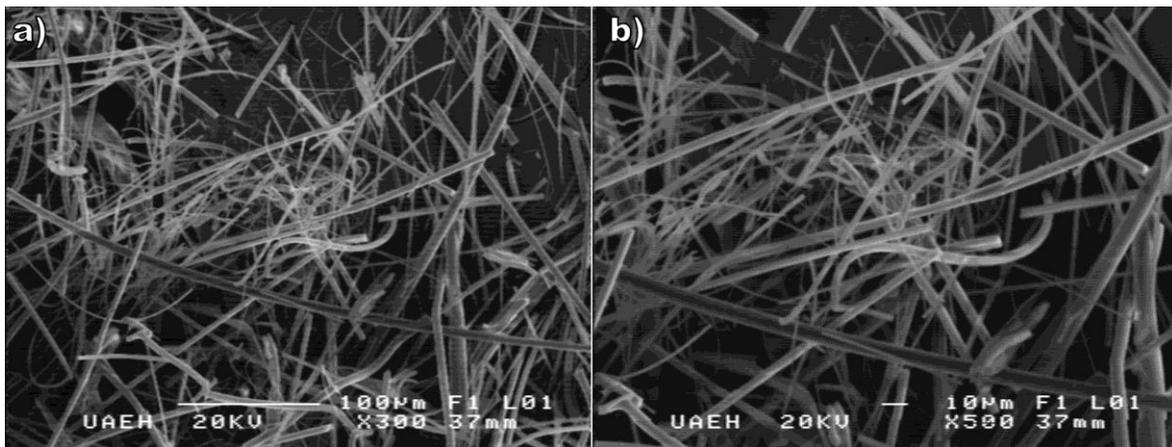


Figura 5.28 Micrografías de la muestra de fibra de vidrio FV02, a) 300X, b) 500X

En general, las micrografías de la Figura 5.29 de la fibra LR denominada “lana de roca” muestran una relativa uniformidad en los diámetros de las fibras, observando una mayor concentración en comparación con la fibra FV01. En su apariencia

externa presenta un color café claro, debido a su contenido de hierro, es probable que la principal materia prima para la elaboración de ésta fibra sea una roca de basalto, debido a su similitud en los valores (% peso) de los principales óxidos identificados en el análisis por FRX para las rocas analizadas en el presente estudio.

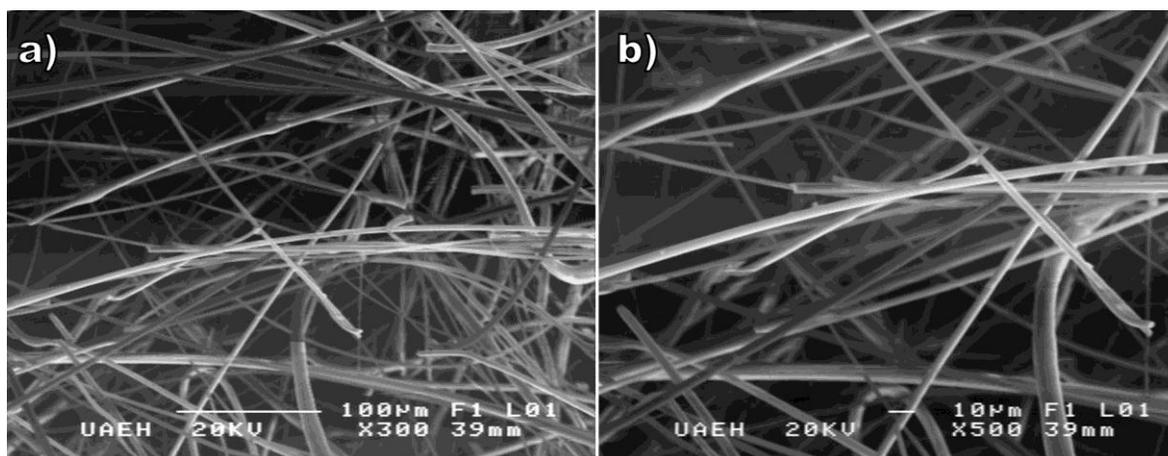


Figura 5.29 Micrografías de la muestra de fibra de lana de roca LR, a) 300X, b) 500X

La muestra de fibra comercial (MOR), (Figura 5.30), es una fibra cerámica utilizada como aislante térmico principalmente en la industria. A diferencia de las tres anteriores, ésta se compone principalmente de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en proporciones similares sumando casi el 96 % en peso, seguido de un bajo contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$ , aún menos proporción de  $\text{K}_2\text{O}$  y una mínima cantidad de  $\text{TiO}_2$ , de acuerdo a los valores obtenidos en el análisis químico por ICP.

Cabe mencionar que esta fibra es de color blanco, su diseño y aplicación permite que soporte una mayor temperatura de hasta 1200 °C, conservando sus propiedades de aislamiento. De esta manera queda clasificada en una categoría distinta a las dos fibras de vidrio analizadas (FV01 y FV02) y a la muestra de fibra de lana de roca (LR).

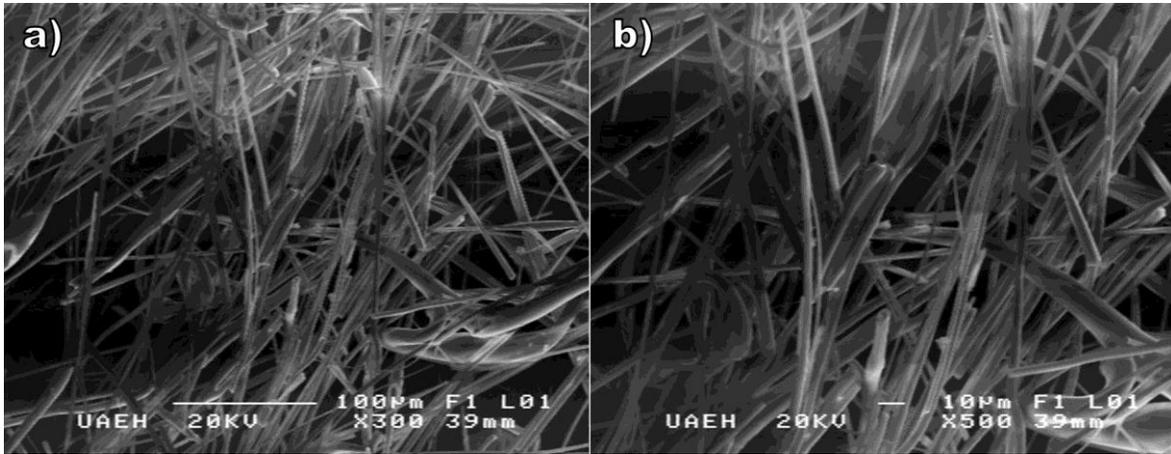


Figura 5.30 Micrografías de la muestra de fibra cerámica MOR, a) 300X, b) 500X

En el análisis de morfología de las fibras producidas en laboratorio FLAB (Figura 5.31) se presenta un diámetro de entre 30 a 100  $\mu\text{m}$ , con superficie lisa sin rasgos de grietas o defectos, la primera micrografía tomada a 300 magnificaciones a) muestra distintos diámetros obtenidos durante el proceso de fibrado, la segunda tomada a 500 X b) presenta fibras entre 40 y 50  $\mu\text{m}$ .

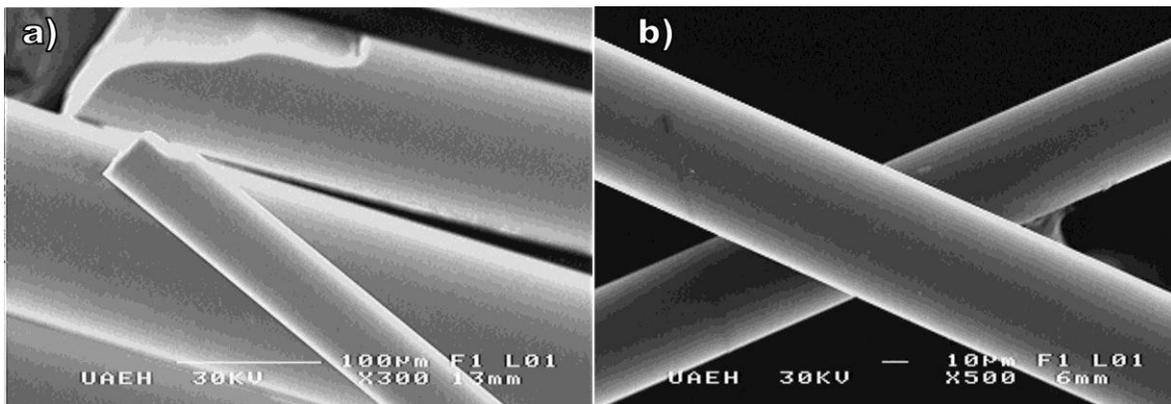


Figura 5.31 Micrografías de las fibras obtenidas en laboratorio, a) 300X WD 13mm, b) 500X WD 6mm

La Figura 5.32 a), muestra un conjunto de fibras experimentales a 50 X, las fracturas que se observan en los extremos de las fibras fueron realizadas intencionalmente para facilitar el montaje en el porta muestras. En la Figura 5.32

b) se aprecia una superficie uniforme en las fibras obtenidas, así como la variación en los diámetros de éstas.

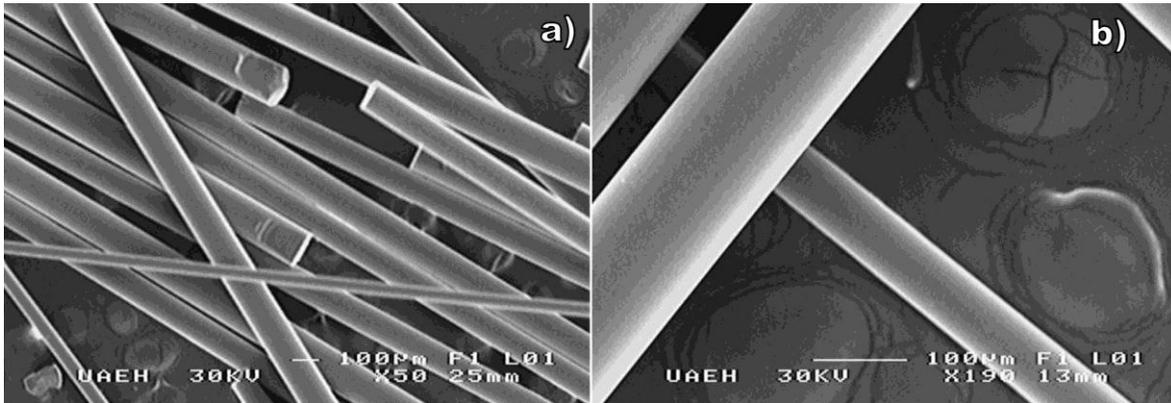


Figura 5.32 Micrografías de las fibras obtenidas en laboratorio, a) 50X WD 25mm, b) 190X WD 13mm

La mayoría de las fibras obtenidas con basalto de la zona Huasca (muestra ATO1) presentan un mayor diámetro en comparación con las fibras comerciales analizadas, sin embargo las características morfológicas de las fibras producidas indican que podrían ser utilizadas como material de refuerzo en concretos o como fase dispersa en distintos tipos de resinas.

## 6. CONCLUSIONES

El planteamiento del presente estudio fue basado en el aprovechamiento que se le ha dado a la roca de basalto en otros países para distintas aplicaciones, de las cuales, una de las más requeridas es la fabricación de fibras. Después de concluir la caracterización de las rocas de basalto recolectadas y de producir las fibras a escala laboratorio se concluye lo siguiente:

En el análisis por difracción de rayos X de las rocas analizadas, se identificaron las fases minerales cristalinas mayoritarias de plagioclasa, hiperstena y enstatita, las cuales son las que constituyen a los minerales primarios en los basaltos.

El análisis por fluorescencia de rayos X permitió identificar el promedio y la desviación estándar de los principales óxidos que conforman las rocas basálticas, resaltando que la mayoría presenta un contenido menor al 50 % en peso de  $\text{SiO}_2$ , entre 17 – 21 % en peso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y un contenido de entre 9 - 12 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Por medio de la microscopía óptica de polarización se confirmó la presencia de minerales de plagioclasas calco-sódicas, piroxenos, olivino y magnetita, confirmando el carácter de tipo basáltico de las muestras.

Los altos módulos calculados de acidez (6.37 en promedio) y viscosidad 2.44 en promedio) en las muestras de roca indican que pueden ser utilizadas para producir fibras con longitudes más largas y resistentes a ambientes alcalinos y ácidos.

A través del análisis termogravimétrico se identificó la pérdida de masa más evidente en un rango entre 150 °C y 600 °C asociada a la deshidratación de zeolitas presentes en vesículas de las rocas (ATO2, HUIT, PR6 Y R7), las cuales fueron descritas megascópicamente en las muestras de la zona de Tezontepec. Las fibras obtenidas a nivel laboratorio fueron producidas con la muestra de basalto ATO1 que corresponde a la zona de Huasca logrando obtener fibras de hasta 40 cm de largo. Fue seleccionada esta muestra ya que cumple inicialmente con las condiciones mencionadas por Cáceres (1996), de tener un contenido en % peso de  $\text{SiO}_2$  menor al 50 %, así como una suma de álcali ( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ ) entre 6 y 8 %.

El análisis de morfología por MEB de las fibras obtenidas en laboratorio permitió identificar un diámetro de entre 30 a 100  $\mu\text{m}$ , valores por encima del promedio (8  $\mu\text{m}$ ) identificado en las muestras de fibra comerciales.

Es factible obtener fibras de basalto por debajo de 30  $\mu\text{m}$ , mejorando las condiciones del proceso que consistiría en: - que el fundido se encuentre más cercano al acoplamiento mecánico de fibrado, - guías más delgadas en los rodillos, - mayor velocidad en los ejes rotacionales y - variación en los diámetros de los rodillos. En función de la aplicación final del tipo de fibra a obtener deberá seleccionarse un bajo contenido en % peso de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  cuando se pretenda utilizar como material aislante, ya que el hierro al ser un elemento conductor influiría negativamente en las propiedades de aislamiento térmico del producto final. Un módulo de acidez más alto mejora la resistencia a ambientes ácidos y alcalinos.

El presente trabajo contribuye a sentar las bases para que en México puedan ser producidas fibras de basalto para aplicaciones de refuerzo o de aislamiento. Como objetivo a mediano plazo, el trabajo a realizar es el muestreo en otras zonas donde exista este tipo de roca basáltica (diferentes regiones del Eje Neovolcánico), así como realizar compósitos, para que puedan ser comparadas sus propiedades químicas, mineralógicas y térmicas. De acuerdo a los resultados obtenidos, determinar cuál sería la aplicación más viable para el material obtenido.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arroyo Buezo, C. (01 de Enero de 2003). *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*. Obtenido de [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp\\_641.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_641.pdf)

Blagojevic, B., Sirok, B., & Stremfelj, B. (Junio de 2004). Simulation of the effect of melt composition on mineral wool fibre thickness. *Ljubljana*, 1, 7.

Blagojevic, B., Sirok, B., & Stremfelj, B. (2004). Simulation of the effect of melt composition on mineral wool fibre thickness. *Ceramics-Silikaty*, 129.

Brouwer, P. (01 de 11 de 2017). *Panalytical*. Obtenido de [www.panalytical.com](http://www.panalytical.com)

Buratti, C., Morettia, E., Belloni, E., & Agosti, F. (2015). Thermal and acoustic performance evaluation of new basalt fiber insulation panels for buildings. Perugia, Italy.

Cáceres Alvarado, J. M., Tejedor Salguero, M. L., Rincón López, J. M., & García Hernández, J. E. (1996). *Obtención de fibras de vidrio a partir de rocas volcánicas canarias*. Madrid, España: Universidad de la Laguna.

Cáceres, J., & García Hernández, J. (1996). Caracterización de fibras en forma de lana de roca para aislamiento a partir de basaltos canarios. Tenerife.

Cáncer, I. N. (Marzo de 2015). Obtenido de NIH: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/silice-cristalina>

Chen, X., Zhang, Y., Hui, D., Chen, M., & Wu, Z. (2017). Study of melting properties of basalt based on their mineral components. *Composites*, 53-60.

Ecured. (11 de 01 de 2018). *Ecured*. Obtenido de <https://www.ecured.cu>

El Didamony, H., Assal, H., ElSokkary, T., & Abdel Gawwad, H. (2012). Kinetics and physico-chemical properties of alkali activated blast-furnace slag/basalt pastes. *HBRC Journal*, 170-176.

Gelves Diaz, J. F. (2017). *Zeolitas naturales colombianas de la formación Combia, municipio de La Pintada: mineralogía, caracterización y aplicaciones*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co>

Geo-México. (14 de 01 de 2018). *Geo-México*. Obtenido de <http://geo-mexico.com>

- Hao, L., & Yu, W. (Diciembre de 2011). Comparison of thermal protective performance of aluminized fabrics of basalt fibre and glass fibre. *Fire and materials*, 35, 8.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la investigación*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Hollocher, K. (12 de 08 de 2005). CIPW norm. Geology Department, Union College. Schenectady, Nueva York, USA.
- Huang, W. T. (1968). *Petrología* (Primera edición en español ed.). (M.-H. B. Company, Ed.) México, D.F., México: Hispano-Americana.
- Hurlbut, D. (1960). *Manual de mineralogía* (2 ed.). (J. W. Sons, Ed.) Barcelona, España: Recerté.
- J C O P D, D. (1986). *Mineral Powder Diffraction File*. Swarthmore, Pa. U.S.A.: International Centre for Diffraction Data.
- Johannsen, A. (1931). *A Descriptive Petrography of the Igneous Rocks* (Vol. 1). Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Kim, J., Lim, J., & Huh, Y. (Enero de 2013). Melt-spinning Basalt Fibers Based on Dielectric Heating and Steady-state process characteristics. *Fibers and polymers*, 14(1148-1156), 9.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R., Steckeisen, A., & Zanettin, B. (1986). A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology Oxford*, vol. 27, nº 3, 745-750.
- Le Maitre, R. (1976). The Chemical Variability of some Common Igneous Rocks. *Petrology Oxford Journals*, 589-637.
- Le Maitre, R. W. (Febrero de 1976). The chemical variability of some common igneous rocks. *Oxford Journals*, 17(17.4.589), 10.
- Le Maitre, R. W. (1984). A proposal by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram. *Australian Journal of Earth Sciences*, vol. 31, nº 2, 243-255.
- Mingarro, I. (1992). *Estudio de los mecanismos de nucleación y cristalización en vidrios obtenidos a partir de rocas basálticas* (Primera ed.). (I. d. vidrio, Ed.) Madrid, España: ICV.

MMG. (20 de 05 de 2018). <https://revistas.unc.edu.ar>. Obtenido de Revistas Universidad Nacional de Córdoba: <https://revistas.unc.edu.ar>

Nasir, V., Karimipour, H., Taheri, F., & Shokrieh, M. (Julio de 2012). Corrosion behaviour and crack formation mechanism of basalt fibre in sulphuric acid. *Corrosion science*, 1(16846-13114), 7.

Ohberg, I. (1987). Technological development of the mineral wool industry in Europe. *Pergamon Journals Ltd.*, 529-545.

Pacharsky, V., & Zavalij, P. (2005). *Fundamentals of power diffraction and structural characterization of materials*. Nueva York, EUA: Springer.

Perevozchikova, B., Pisciotta, A., Osovetsky, B., Menshikov, E., & Kazymov, K. (2014). Quality evaluation of the Kuluevskaya basalt outcrop for the production of mineral fiber, Southern Urals, Russia. Perm, Russia.

Pisciotta, A., Perevozchikova, B., Osovetsky, B., Menshikova, E., & Kazymov, K. (2014). Quality Assessment of Melanocratic Basalt for Mineral Fiber. *Natural Resources Research*, 1-8.

Poveda Bernal, J. (2012). *Metodología de diseño de materiales*. Valladolid: Universidad de Valladolid.

RAE. (12 de 02 de 2018). *Real academia española de la lengua*. Obtenido de <http://dle.rae.es>

Rivera Mantilla, H. (2005). *Geología general* (Segunda ed.). (U. N. Marcos, Ed.) Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Rockwool. (10 de 2016). *Rockwool*. Obtenido de Rockwool: <http://www.rockwool.in/>

Sabet, S., Akhlaghi, F., & Eslami, R. (Julio de 2012). Production and Optimization of AluminumBasalt composites by handlay-out technique. *World Congress on Engineering*, 3, 4.

SGM. (01 de Marzo de 2009). *Servicio Geológico Mexicano*. Obtenido de [http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas\\_Ed50.jsp](http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed50.jsp)

SGM. (22 de 03 de 2017). *Servicio Geológico Mexicano*. Recuperado el 23 de 11 de 2017, de <http://www.sgm.gob.mx>

Sim, J. (Junio de 2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Sciencedirect*, 1(1), 9.

Sudaglass. (14 de 01 de 2018). *Sudaglass*. Obtenido de <http://www.sudaglass.com>

UCM. (20 de 02 de 2018). *Atlas de rocas ígneas Universidad Caputlense de Madrid*. Obtenido de <https://petroignea.wordpress.com>

UCM. (s.f.). *Atlas de rocas ígneas*. (Universidad Complutense de Madrid) Recuperado el 26 de 09 de 2016, de <https://petroignea.wordpress.com/tipos-rocosos/clasificacion/rocas-volcanicas/>

VCTRAC. (20 de 2 de 2018). *Real Academia de Ciencias*. Obtenido de <https://vctrac.es>

Vek, K. (11 de 2016). Obtenido de Kamenny Vek: <http://www.basfiber.com/>

Webmineral. (10 de 2016). Obtenido de Webmineral: <http://webmineral.com/crystal/Orthorhombic-Dipyramidal.shtml#list>

Wikipedia. (10 de 2016). Obtenido de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Mineral#/media/File:Silica3.png>

## GLOSARIO

Afanítica: rocas ígneas volcánicas que presentan una textura de granulometría que va de fina a muy fina.

Amígdalas: vacuolas de las rocas volcánicas que pueden rellenarse con minerales secundarios producto de la circulación por las rocas de fluidos de composición variada, con el resultado de la cristalización de minerales de baja temperatura como carbonatos, calcedonia o zeolitas.

Anfíbol: mineral del grupo de los silicatos, de color verde oscuro o negro y brillo nacarado, que se caracteriza por tener dos direcciones de exfoliación que se cortan en ángulo de  $124^\circ$ .

Anfíboles: conjunto de minerales de la clase de los silicatos, del grupo de los inosilicatos.

Apatito: es un mineral con sistema cristalino hexagonal. Su composición química aproximada es  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ .

ATG: análisis termogravimétrico, o bien (TGA) por sus siglas en inglés.

Brucita: Mineral formado por hidróxido de magnesio,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ .

CIPW: sistema de clasificación de rocas ígneas propuesto por Cross, Iddings, Pirsson y Washington en 1903, el sistema está basado en la composición química de la roca.

Cono cinerítico: es la acumulación de piroclastos expulsados del conducto del volcán alrededor del cráter.

Corindón: es un mineral que está formado por óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Cromita: es un mineral de composición  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ .

Diópsido: es un piroxeno con sistema cristalino monoclinico de fórmula  $MgCaSi_2O_6$ .

DRX: difracción de rayos X.

Feldespato: grupo de minerales tecto y aluminosilicatos.

Fenocristales: cuando la roca ígnea posee dos tamaños de grano marcadamente distintos. Los cristales de mayor tamaño reciben el nombre de fenocristales y los cristales considerablemente menores que los engloban se denominan matriz.

Fibras: partículas elongadas cuya longitud es varias veces superior al diámetro.

FRX: fluorescencia de rayos X.

Halita: es un mineral sedimentario, el cual se puede formar por la evaporación de agua salada, en depósitos sedimentarios y domos salinos, (NaCl).

Hiperstena: es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo inosilicatos y dentro de ellos pertenece a los piroxenos cuya fórmula es  $(Fe, Mg)_2Si_2O_6$ .

Ilmenita: es un mineral de la familia de los óxidos de composición  $Fe^{2+}Ti^{4+}O_3$ .

Lámina polaroide: consiste en una película de un polímero transparente (revestida de cristales minúsculos de sulfato de iodoquinina orientados en la misma dirección) interpuesta entre dos placas de vidrio.

Magnetita: es un mineral de hierro constituido por óxido ferroso-diférrico ( $Fe^{2+}Fe^{3+}_2O_4$ ).

Nefelina: es un tectosilicato de aluminio y sodio, en el que el sodio es en parte sustituido por potasio o algunas veces por calcio.

Olivino: también denominado peridoto, es un silicato ferromagnesiano de fórmula  $\text{SiO}_4(\text{Fe},\text{Mg})_2$ . La proporción relativa de hierro y magnesio es variable formándose así una serie isomorfa de minerales que, genéricamente se llaman olivino, pero que cuando hay ausencia de hierro se conoce por forsterita y cuando hay magnesio se denomina fayalita.

Ortoclasa: es un mineral de la clase de los silicatos, subgrupo tectosilicatos, y dentro de ellos pertenece a los feldespatos, según la clasificación de Strunz. Con fórmula química  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ .

Piroclasto: cualquier fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva arrojado al aire durante una erupción volcánica.

Piroxeno: grupo de silicatos que forman parte de rocas ígneas y metamórficas.

Plagioclasas: feldespatos calcio sódicos.

Portlandita: es un mineral de la clase de los minerales óxidos y pertenece al llamado “grupo de la brucita”.

TAS: Siglas que representan (*Total alkali silica*), clasificación de rocas volcánicas.

Textura porfídica: mosaico cristalino en el que existen cristales de mayor tamaño (fenocristales) inmersos en una masa de fondo de tamaño cristalino inferior.

Urutilización: La alteración de un piroxeno original de una roca ígnea, en una masa de anfíbol fibroso.

Zirconia: es un óxido cristalino blanco de zirconio, ( $\text{ZrO}_2$ ).

## 7. ANEXOS

Tabla 7.1 Fórmulas estructurales de minerales identificados por difracción de rayos X en las rocas de basalto

Mineralogía	Fórmula	Tarjeta
Andesina	$.62\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \times .38\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	10-359
Diópsido	$\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$	11-654
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	19-629
Clinoferrosilicato	$\text{FeSiO}_3$	17-548
Olivino-forsterita	$(\text{Mg}.64\text{Fe}.36)_2\text{SiO}_4$	7-159
Enstatita Fe	$.88\text{MgSiO}_3 \times .12\text{FeSiO}_3$	19-605
Forsterita	$2(\text{Mg}.96\text{Fe}.04)\text{OSiO}_2$	7-74
Augelita	$\text{Al}_2\text{PO}_4(\text{OH})_3$	14-380
Hematita	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	13-534
Hyperstena	$.47\text{MgSiO}_3 \times .53\text{FeSiO}_3$	19-606
Diópsido	$(\text{Ca}, \text{Mn})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{mn})\text{Si}_2\text{O}_6$	22-534
Oligoclasa	$.84\text{NaAlSi}_2\text{O}_8 \times .16\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	9-457
Cuarzo	$\text{SiO}_2$	5-0490
Cristobalita	$\text{SiO}_2$	11-695
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	20-572
Enstatita	$\text{MgSiO}_3$	22-714
Olivino-fayalita	$(\text{Fe}, \text{Mn})_2\text{SiO}_4$	12-220