

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA Y
GEOQUÍMICA DE LAS ROCAS ÍGNEO-
METAMORFICAS PROTEROZOICAS EN LA
REGIÓN DE TUAPE, SONORA.**

TESIS

**Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.**



PRESENTA:

JUAN MANUEL HERNANDEZ CAZARES.

Hermosillo, Sonora, Noviembre de 2021.

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TÍTULO

“Caracterización Petroológica y Geoquímica de las
Rocas Ígneo-Metamórficas Proterozoicas en la
Región de Tuape, Sonora.”

Geol. Juan Manuel Hernandez Cazares
Estudiante de Posgrado

Dr. Inocente Guadalupe Espinoza Maldonado
Director de Tesis

Dr. José Luís Rodríguez Castañeda
Codirector de Tesis

Comité Tutorial:

Dr. Rafael Del Río Salas

Dr. Lucas Ochoa Landín



Hermosillo, Sonora.
Noviembre, 2021



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISION DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
MAESTRÍA EN CIENCIAS-GEOLOGÍA

Hermosillo, Sonora, a 22 de septiembre de 2021

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por este conducto y de la manera más atenta, nos permitimos informarle que el alumno Juan Manuel Hernández Cazares con expediente 207207206 ha concluido con su trabajo de tesis bajo nuestra dirección y consideramos que es adecuado para continuar con el trámite para la obtención del grado de Maestría en Ciencias-Geología., por tanto, sometemos a su consideración para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

"Caracterización Petrológica y Geoquímica de las Rocas Ígneo-Metamórficas Proterozoicas en la Región de Tuape, Sonora."

Adjuntamos a la presente los borradores del trabajo de tesis para su revisión por el comité de Tesis.

Sin otro en particular quedamos de Usted.

ATENTAMENTE



Dr. Inocente Guadalupe Espinoza Maldonado
Director de Tesis



Dr. José Luis Rodríguez Castañeda
Co-Director de Tesis

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

FORMATO F01



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISION DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
MAESTRÍA EN CIENCIAS-GEOLOGÍA

Hermosillo, Sonora, a 25 de octubre de 2021

Dr. Inocente Guadalupe Espinoza Maldonado
Director de Tesis
Dr. José Luís Rodríguez Castañeda
Codirector de Tesis

Por este conducto les comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Ustedes, intitulado:

**“Caracterización Petroológica y Geoquímica de las Rocas Ígneo-Metamórficas
Proterozoicas en la Región de Tuape, Sonora”**

Esto, con el fin de que el alumno: **Juan Manuel Hernández Cázares** pueda presentar su examen de grado, para la obtención del título de Maestro en Ciencias Geología. Asimismo les comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

| | |
|---|-------------------|
| Dr. Lucas Ochoa Landín | Presidente |
| Dr. Inocente Guadalupe Espinoza Maldonado | Secretario |
| Dr. José Luís Rodríguez Castañeda | Vocal |
| Dr. Rafel Del Río Salas | Vocal |

Sin otro en particular quedo de Usted.

A t e n t a m e n t e

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

FORMATO F02



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISION DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
MAESTRÍA EN CIENCIAS-GEOLOGÍA

NOMBRE DE LA TESIS:

**"Caracterización Petroológica y Geoquímica de las Rocas Ígneo-Metamórficas
Proterozoicas en la Región de Tuape, Sonora"**

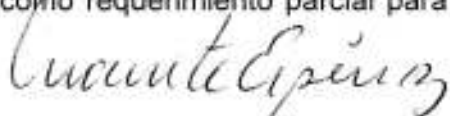
NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

Juan Manuel Hernandez Cazares

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Lucas Ochoa Landín

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Inocente Guadalupe Espinoza Maldonado

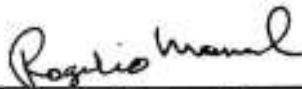
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. José Luis Rodríguez Castañeda

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Rafael Del Rio Salas

Atentamente



Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología

RESUMEN

El área El Teguachi se localiza en la parte norte-centro del Estado de Sonora, donde afloran rocas ígneas Proterozoicas como el granito Santa Margarita y la granodiorita El Jacalón. Ambas litologías se encuentran intrusionadas por una serie de diques máficos que no están asociados a estos eventos ígneos. En este trabajo se realizó cartografía geológica y geología estructural en un área de 700 Ha, se tomaron 16 muestras para análisis petrográficos, SEM y geoquímicos (mayores y traza). La granodiorita El Jacalón ($1,702 \pm 10$ Ma) se encuentra como base estratigráfica del área, y pertenece a la serie calcoalcalina de alto K, de carácter metaluminoso-peraluminoso, con $\Sigma\text{REE}=138.5$ ppm, $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.85$ y $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}}=5.1$, con patrones normalizados que la asocian a un ambiente de arco de islas dentro de la provincia Yavapai. El granito Santa Margarita ($1,104 \pm 21$ Ma) se clasifica geoquímicamente como un granito anorogénico, de tipo A y “ferroan” con textura gráfica, ferromagnesianos ricos en hierro ($\text{FeOT}/(\text{FeOT}+\text{MgO})=0.88$), $\text{CaO}=0.78\%$ wt., $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=8.3\%$ wt., $\text{Ba}=622$ ppm, $\text{Nb}=31$ ppm, $\Sigma\text{REE}=405$ ppm, $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.29$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}}=6.5$ y un carácter peraluminoso que sugiere un alto grado de asimilación cortical en un ambiente extensional. Muy posiblemente el granito Santa Margarita se generó por la fusión de la granodiorita El Jacalón, al cual intrusiona. Los diques máficos afloran con rumbos preferenciales N-NW y algunos E-NE con espesores de entre 1 y 25 m. Geoquímicamente, se clasifican como ferrobasaltos cuarzo-toleííticos con circones rómbicos y circones de habito redondeado heredados, escasos apatitos, ilmenita y firmas geoquímicas de trasarco (BABB) que revela un empobrecimiento progresivo en LILE, REE y HFSE divididos en 4 grupos (Grupo I: $\#mg=0.25$, $\Sigma\text{REE}=141.5$ ppm, $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.87$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}}=3$; Grupo II: $\#mg=0.26$, $\Sigma\text{REE}=97.7$ ppm, $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.83$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}}=2.4$; Grupo III: $\#mg=0.33$, $\Sigma\text{REE}=50.4$ ppm, $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.89$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}}=1.4$; Grupo IV: $\#mg=0.44$, $\Sigma\text{REE}=47.8$ ppm, $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.68$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}}=3.9$). Los patrones normalizados a N-MORB revelan anomalías negativas de Nb y positivas de K, anomalías muy dispares de P y valores centrados de Sr que sugieren que los diques se formaron en un ambiente extensional de trasarco que implica la mezcla de un componente mantélico similar al reservorio N-MORB con un componente de manto astenosférico tipo E-MORB y un componente de

corteza sublitosférica subducida, generando una alta tasa de fusión parcial. El granito Santa Margarita y el granito Aibo se formaron por un proceso muy similar a relativamente poca profundidad. Sin embargo, el granito Aibo es más tardío, tiene un mayor grado de asimilación cortical, emplazado en un ambiente post-colisional y está ligado espacial y temporalmente con anortositas. Los datos geoquímicos del granito Santa Margarita y los diques máficos asociados, comparados con otras localidades de Sonora y el SW de E.U.A., son congruentes y favorecen la extensión de las hipótesis actuales sobre la orogenia *Greenville* en Texas, donde existió una colisión continental, el desprendimiento de la raíz del orógeno y el ascenso del manto astenosférico. Los datos generados en esta investigación son conflictivos con las configuraciones de los basamentos Proterozoicos propuestas en Sonora. Sin embargo, el área estudiada se considera solo una localidad de muchas otras en Sonora donde los datos de diques e intrusiones máficas con edades de 1,100 Ma podrían influir enormemente en futuras reconstrucciones paleogeográficas del margen SW de Laurencia y el ensamblaje del Supercontinente Rodinia durante la orogenia *Greenville*, como lo ha hecho en E.U.A. y Canadá.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo financiero (solicitud 2019-000037-02NACF-04710 en el programa de Becas Nacional Tradicional) durante la realización de esta tesis en el periodo del 1/08/2019 al 31/07/2021.

Agradezco a la Universidad de Sonora, División de Ciencias Exactas y Naturales (DCEN) y al Programa de Apoyo Académico por el apoyo económico para realizar los análisis químicos. Agradezco especialmente al Departamento de Geología y a la Coordinación Maestría en Ciencias Geología por el apoyo para trabajos de campo.

Agradezco profundamente a mi director de tesis, Dr. Inocente Guadalupe Espinoza Maldonado, por aceptarme como estudiante y a mi co-director Dr. José Luis Rodríguez Castañeda por darme la oportunidad de realizar este trabajo. Agradezco también a mi comité tutorial conformado por el Dr. Rafael Del Río Salas y el Dr. Lucas Hilario Ochoa Landín, aprecio mucho el tiempo que dedicaron a mi trabajo.

Agradezco de forma especial al Señor Jesús Alberto Romo y al Señor Francisco Salazar, de Banámichi, por permitirme el acceso a su propiedad para llevar a cabo los trabajos de campo. Agradezco a Marco Padilla por acompañarme en los primeros trabajos de campo y al Dr. Paz Moreno por prestarme el yunque para triturar las muestras, agradezco a mis compañeritos de maestría por la buena vibra que compartimos durante nuestra convivencia. Los aprecio mucho y espero volver a coincidir con ustedes de nuevo. Agradezco a la M. C. Alejandra Montijo por ayudarme siempre, a la Dra. Belem González a la Dra. Diana Meza Figueroa por los análisis SEM y a Jorge el laminero que me saco del peor apuro que tuve durante la maestría. Este trabajo está dedicado a mi familia y en especial a mi padre, quien es la muestra clara de que, si se quieren las cosas, se pueden, sin importar los tiempos.

ÍNDICE

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | GENERALIDADES..... | 1 |
| 1.1 | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.2 | LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO..... | 6 |
| 1.3 | FISIOGRAFÍA..... | 7 |
| 1.4 | ANTECEDENTES..... | 8 |
| 1.5 | METODOLOGÍA..... | 9 |
| 1.5.1 | BLOQUE I: RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 9 |
| 1.5.2 | BLOQUE II: TRABAJO DE CAMPO..... | 9 |
| 1.5.3 | BLOQUE III: ANÁLISIS QUÍMICOS..... | 12 |
| 1.5.4 | BLOQUE IV: TRABAJO DE GABINETE..... | 18 |
| 2 | MARCO GEOLÓGICO REGIONAL..... | 21 |
| 3 | GEOLOGÍA LOCAL..... | 24 |
| 3.1 | GRANODIORITA EL JACALÓN (PtiGd)..... | 24 |
| 3.2 | GRANITO SANTA MARGARITA (pTmGr)..... | 27 |
| 3.3 | CUARCITA LOS CHANGOS (pTiC)..... | 29 |
| 3.4 | RIOLÍTA-TOBA ANDESÍTICA (Jm(?)R-TA)..... | 30 |
| 3.5 | PÓRFIDO ANDESÍTICO (ToPA)..... | 30 |
| 4 | GELOGÍA ESTRUCTURAL..... | 31 |
| 5 | ANÁLISIS PETROGRÁFICO..... | 35 |
| 5.1 | GRANODIORITA EL JACALÓN (PtiGd)..... | 35 |
| 5.2 | GRANITO SANTA MARGARITA (pTmGr)..... | 37 |
| 5.3 | DIQUES MÁFICOS..... | 38 |
| 6 | RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS..... | 42 |
| 6.1 | ELEMENTOS MAYORES..... | 42 |
| 6.2 | ELEMENTOS TRAZA..... | 47 |
| 7 | DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN Y CONTEXTO TECTÓNICO..... | 54 |
| 7.1 | MAGMATISMO FÉLSICO DE 1,100 Ma..... | 54 |
| 7.2 | MAGMATISMO MÁFICO DE 1,100 Ma..... | 56 |

| | |
|---|--------------|
| 7.3 CAZADORES DE GRANITOS..... | 58 |
| 7.4 LA GRANODIORITA EL JACALÓN..... | 65 |
| 7.5 LA OTRA HISTORIA DE LOS DIQUES..... | 67 |
| 8 DISCUSIÓN..... | 71 |
| 8.1 GRANITOS TIPO A Y SU RELACION CON MAGMATISMO MÁFICO CONTEMPORÁNEO EN EL MARGEN SW DE LAURENCIA..... | 71 |
| 8.2 PLUMA MANTÉLICA VS SUBDUCCIÓN EN EL MARGEN SUR DE LAURENCIA | 75 |
| 9 IMPLICACIONES DE LOS DATOS GEOQUÍMICOS DEL ÁREA EL TEGUACHI EN EL CONTEXTO REGIONAL Y GLOBAL DE SONORA: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 83 |
| 10 REFERENCIAS..... | 87 |
| RESUMEN..... | <i>i</i> |
| LISTA DE FIGURAS Y TABLAS..... | <i>vi</i> |

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Plano de localización de la región de Tuape, en donde se muestran las áreas de estudio... | 6 |
| Figura 2. Plano de localización de los polígonos propuestos para trabajos a detalle..... | 11 |
| Figura 3. A) Equipo utilizado para la trituration de muestras por métodos manuales. B) Pulverizadora de anillos Marca HERZOG utilizada para la pulverización..... | 13 |
| Figura 4. Muestras seleccionadas para el análisis SEM. Clave de muestras 1 y 2: P-30, 3 y 4-P27b, 5: P-15..... | 16 |
| Figura 5. Procedimiento para cálculos minerales de Deer et al. (1992)..... | 19 |
| Figura 6. Procedimiento para calcular el contenido de Fe ⁺³ en los cálculos cristalquímicos según Droop (1987)..... | 20 |
| Figura 7. Plano geológico del área El Teguachi. Modificado de Corral-Gastelum & Hernandez-Morales, 2007..... | 22 |
| Figura 8. Plano geológico-estructural del polígono 1..... | 25 |
| Figura 9. A) afloramiento de Granodiorita con enclaves alargados y sigmoidales, B) otro afloramiento de la granodiorita en donde se observa un enclave de más de 20 cm de largo..... | 26 |
| Figura 10. Vista panorámica del afloramiento de un dique máfico que afecta a la granodiorita, con un espesor de más de 15 m..... | 26 |
| Figura 11. A) afloramiento del granito Santa Margarita, B) diques máficos que cortan al granito, nótese los parches o manchones de hematita..... | 28 |
| Figura 12. Afloramiento de la cuarcita Los Changos en las faldas del Cerro el Monito. Nótese la estratificación de las capas..... | 29 |

| | |
|--|----|
| Figura 13. Plano geológico-estructural que incluye el esquema y relaciones estructurales del Sistema 1. El diagrama de rosas muestra el rumbo preferencial de estructuras lineales (diques, fracturas y fallas)..... | 32 |
| Figura 14. Plano geológico-estructural que incluye el esquema y relaciones estructurales del Sistema 2..... | 34 |
| Figura 15. Deformación documentada en los diques máficos, en donde se observan vetillas de cuarzo deformadas y rellenando las fracturas. La deformación de las fotografías corresponde con el componente P del sistema 2..... | 33 |
| Figura 16. Microfotografías representativas de láminas delgadas de la granodiorita El Jacalón. A) Cristales de plagioclasa con su macla polisintética. B) Cristal de hornblenda esqueletal con cristales de apatito. C) Cuarzo dentro de hornblenda con textura consertal. D) Cristal de zircón dentro de un cristal de hornblenda. Hbd=hornblenda, apt=apatito, Plg=plagioclasa, Qz=cuarzo, Zr=Circon..... | 36 |
| Figura 17. Microfotografías representativas de láminas delgadas pertenecientes al granito Santa Margarita. A) Texturas de intercrecimiento entre cuarzo y feldespatos. B) Biotita con halo de alteración o textura corona. C) Cristal de circón. D) Cristal de monacita. Gra=textura gráfica, Grp=textura granofírica, Qz= cuarzo, Bt= biotita, Opq= minerales opacos, Zr= circon..... | 38 |
| Figura 18. Microfotografías representativas de láminas de diques máficos. A) Vista general de las relaciones minerales y texturas de los diques máficos. B) Cristal de plagioclasa con macla polisintética afectado por una vetilla de epidota. C) Cristal de circón, se observa una plagioclasa fuertemente alterada. D) Cristales de circones dentro de ferromagnesianos mal preservados. Hbd=hornblenda, Plg=plagioclasa, Qz=cuarzo, Epd=epidota, Opq=minerales opacos, Zr=Circon.. | 40 |
| Figura 19. Microfotografías representativas de láminas de diques máficos alterados A) Cristales de cuarzo policristalino y enclaves de hematita en la matriz de plagioclasas. B) Fenocristales de plagioclasa en forma de aguja dentro de la matriz. C) Enclaves de hematita y D) Cristales relictos de ferromagnesianos rodeados de agujas de plagioclasa, posiblemente sean ferromagnesianos alterados. Plg=plagioclasa, Qz=cuarzo, He=hematita, Fmg=Ferromagnesiano..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 20. Diagrama de álcalis total vs sílice (TAS); A) diques máficos (LeBas et al., 1986). B) intrusivos graníticos (Middlemost, 1994)..... | 44 |
| Figura 21. A) Diagrama AFM para series subalcalinas (Irvine & Baragar, 1971). B) Diagrama de clasificación de granitoides basado en la norma CIPW (O'Connor, 1965). C) diagrama AKN para saturación de alúmina (Shand, 1943). D) diagrama de álcalis vs sílice para granitoides (Peccerillo & Taylor, 1976)..... | 45 |
| Figura 22. Diagrama de MgO vs óxidos mayores en %wt..... | 47 |
| Figura 23. Patrones de REE de las rocas del área El Teguachi normalizados a condrita (Boynnton, 1984)..... | 51 |
| Figura 24. Patrones de LILE, HFSE y REE del área El Teguachi normalizados al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989)..... | 53 |
| Figura 25. Localidades representativas del magmatismo de 1,100 Ma en el margen Sur de Laurencia. CS: Crystal Spring, BC: Basaltos Cárdenas, PPB: granito Pikes Peak, BG: Granito Bustamante, AG: Granito Aibo, ET: Área El Teguachi, RBGS: suite Red Bluff Granite, CP: Complejo Pecos, ERG, granito Enchanted Rock, TMG; granito Two Mountains, NL: Lago Nipigon, ML: Mineral Lake, EZ: Terreno Elzevir, AT: Terreno Adirondack. Referencias en el texto. Se incluyen los rasgos más representativos a nivel continental y regional como el frente Greenville, el Midcontinental Rift (tomados de Whitmeyer & Karlstrom, 2007) y la Mega Cizalla Mojave-Sonora (MCMS, Tomado de Anderson & Silver, 2005)..... | 56 |
| Figura 26. Diagrama de discriminación de ambiente para granitoides de Pearce et al. (1984)..... | 60 |
| Figura 27. Diagrama de diferenciación de granitoides de Whalen et al. (1987)..... | 61 |
| Figura 28. Patrones de los granitos Santa Margarita, Aibo y Bustamante normalizados a condrita (A) y manto primitivo (B)..... | 62 |
| Figura 29. Diagramas de discriminación de Frost & Frost (2008) para granitoides..... | 63 |
| Figura 30. Diagrama de clasificación de Grevenikov (2014). Los campos están basados en datos isotópicos de granitos en ambientes conocidos: Zona I: Islas Oceánicas, Zona II: Rifts | |

| | |
|--|----|
| intracontinentales y Hotspots, Zona III: Magmatismo de arco de islas, Zona IV: Magmatismo de arco continental, Zona V: Magmatismo de Trascaro..... | 64 |
| Figura 31. Diagrama de discriminación para granitoides de Pearce et al. (1984) con los datos de Iriondo et al. (2004) y la granodiorita El Jacalón (este estudio)..... | 66 |
| Figura 32. Patrones de la granodiorita El Jacalón normalizados a condrita (A) y manto primitivo (B). Se incluyen los datos de Iriondo et al. (2004)..... | 67 |
| Figura 33. A) Diagrama de clasificación de Mullen (1983). B) Diagrama de clasificación de Holocher et al. (2012) basando en las relaciones La/Yb vs Th/Nb..... | 68 |
| Figura 34. Diagrama de Pearce (2008) para basaltos. A) arreglos de fuentes mantélicas y asimilación cortical. B) fuentes mantélicas profundas vs superficiales..... | 70 |
| Figura 35. Diagrama de clasificación de ambiente tectónico para basaltos de Saccani (2015)..... | 71 |
| Figura 36. Diagrama de flujo de los procesos que generan granitos “ferroan”. Modificado de Frost & Frost (2010)..... | 74 |
| Figura 37. Patrones de firmas geoquímicas del área El Teguachi y las localidades comparadas normalizadas al reservorio N-MORB de Sun & McDonough (1989)..... | 77 |
| Figura 38. Relaciones de Nb/Yb (A) y Nb/Ba (B) de las rocas del área El Teguachi y las localidades comparadas. Se añadieron las relaciones de los reservorios PM, N-MORB, E-MORB y OIB como comparación (Sun & McDonough, 1989)..... | 80 |
| TABLAS | |
| Tabla 1. Listado de muestras utilizadas en este trabajo..... | 14 |
| Tabla 2. Formulas mineras generales utilizadas para los cálculos cristaloquímicos..... | 17 |
| Tabla 3. Valores generales de los sistemas riedel identificados en el área El Teguachi..... | 31 |
| Tabla 4. Resultados de los análisis químicos de las rocas del área El Teguachi. Los valores con “*” fueron calculados como lo indica la metodología..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Tabla 5. Correlación de Spearman para elementos mayores de los diques máficos..... | 46 |
| Tabla 6. Valores de LILE y HFSE para las muestras del área El Teguachi..... | 48 |
| Tabla 7. Valores de la granodiorita El Jacalón junto con los datos de Iriondo et al. (2014).. | 65 |
| Tabla 8. Relaciones de elementos traza de la granodiorita El Jacalón comparados con los terrenos Caborca y Norteamérica definidos por Iriondo et al. (2014)..... | 66 |
| Tabla 9. Resumen de la clasificación obtenida en los diagramas de discriminación utilizados en las rocas graníticas de Sonora y las localidades de comparación..... | 72 |

1.- GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

La porción norte del Estado de Sonora forma parte del margen suroeste de Laurentia (Li et al., 2008), y los afloramientos de rocas Proterozoicas más marginales relacionados con el basamento Proterozoico se encuentran en el área de Tuape, Sonora central (Rodríguez-Castañeda, 1988). La historia geológica de Laurentia se remonta hasta el Arqueano, hace más de 2,500 Ma. Durante este periodo ya existían masas continentales que conformarían los cratones estables de Laurentia, como las provincias de Wyoming y Superior (Whitmeyer & Kalstrom, 2007). El crecimiento de Laurentia durante toda su historia geológica se debe a la acreción y eventual amalgamación de arcos y orógenos juveniles hasta el ensamblaje de Rodinia hace aproximadamente 1,100 Ma. En el margen sur de Laurentia ocurrieron dos grandes eventos de acreción de terrenos y arcos de islas. La primera acreción de corteza juvenil ocurrió durante el periodo de tiempo entre 1,810-1,620 Ma, cuando las provincias Mojave, Yavapai y Mazatzal se amalgamaron durante las orogénias Ivanpah, Yavapai y Mazatzal. La segunda acreción de corteza juvenil ocurrió en el periodo de 1,500-1,100 Ma culminando con la orogenia *Greenville* y la formación del supercontinente Rodinia. Algunos autores como Brown et al. (1975) sugieren que el ciclo orogénico *Greenville* duró aproximadamente 250 Ma e incluyen a la Provincia de Riolitas y Granitos (*Rhyolite-Granite Province*, RGP, en inglés) como la primera etapa de la orogenia *Greenville*, que generalmente se restringe únicamente a los afloramientos del NE de E.U.A. y Canadá. Sin embargo, en Texas también se reconoce la extensión de la deformación *Greenville* en el frente de “*El Llano uplift*”, aunque la deformación y la corteza involucrada es ligeramente diferente. Mosher (1998), Mosher et al. (2008), Mulder et al. (2016) y Davis & Mosher (2018) proponen un modelo tectónico para el margen SW de Laurentia en base a estudios estructurales, geoquímicos, isotópicos y de procedencia de circones y micas en unidades sedimentarias. El modelo trata sobre un continente (se propone el microcontinente Kalahari en base al trabajo de Li et al., 2008) que colisionó en Texas central hace 1,150-1,120 Ma, formando un orógeno y cerrando una cuenca de trasarco más antigua. El rebote isostático del

orógeno en “*El Llano Uplift*” provocó el desprendimiento de la raíz (la corteza subducida) y provocó el ascenso del manto astenosférico a niveles más superficiales de la corteza, fundiéndola y propiciando el magmatismo post-orogénico observado en todo el margen SW de Laurencia. El orógeno tuvo un componente de rotación en dirección de las manecillas del reloj que lo hizo colisionar con el oeste de Texas aproximadamente hace 1060-980 Ma. [Davis & Mosher \(2018\)](#) proponen que la subducción continuó hacia el oeste. [Li et al. \(2007\)](#) reconocen la extensión de la suite de Anortositas-Mangeritas-Charnockitas-Granitos (AMCG, en inglés) de la provincia *Greenville* hacia Texas, con edades de 1,120-1,090 Ma, mientras que [Haenggi \(2001\)](#) y [Franco-Rubio et al. \(2019\)](#) han reconocido rocas principalmente graníticas de edad *greenvilleana* que representan la extensión de las rocas de Texas en Chihuahua, aunque su trabajo está más enfocado a la sutura *Ouachita* y el “*Chihuahua Trough*”, más relacionado con la colisión de Gondwana y Laurencia durante el Paleozoico. Las rocas máficas en Texas con edades de alrededor de 1,100 Ma tienen un carácter principalmente toleítico y las rocas félsicas de edades similares presentan una afinidad con granitos de tipo A. Durante el periodo de 1,120-1,090 Ma, el esfuerzo compresional de la subducción en Texas fue acompañado por extensión intracontinental y magmatismo bimodal voluminoso, principalmente máfico, que se encuentra bien expuesto en la provincia de diques máficos del SW de E.U.A., con edades de 1,100-1,076 Ma ([Howard, 1991](#); [Larson et al., 1995](#); [Hammond, 1986](#)). Durante la orogenia *Greenville*, el ascenso de una pluma mantélica en la región de Lago Superior, Canadá, formó una estructura de ruptura cortical donde se emplazaron Basaltos de Meseta Continental (*Continental Flood Basalts*, en inglés) conocida como *Midcontinental Rift*, que fue afectada por esfuerzos compresivos de la orogenia *Greenville* ([Hollings et al., 2010](#)).

La configuración de Laurencia en el Proterozoico y el ensamblaje y rompimiento de Rodinia hace 1,100 Ma ha sido estudiado ampliamente en Norteamérica ([Miall & Blakey, 2019](#)). Sin embargo, en el NW de México, esta información está poco esclarecida debido a que muchos de los modelos propuestos siguen en debate ([Dickinson & Lawton, 2001](#); [Anderson & Silver, 2005](#); [Whitmeyer & Kalstrom, 2007](#); [Iriando & Premo, 2011](#); [Lawton et al., 2017](#)). Una de las hipótesis más influyentes es la Megacizalla Mojave-Sonora (MCMS), propuesta por

[Anderson & Silver \(1979\)](#) hace más de 40 años y que sigue teniendo gran relevancia en la comunidad científica ([Anderson & Silver, 2005](#)). La hipótesis de la megacizalla explica la yuxtaposición de basamentos proterozoicos observada en Sonora por medio de una falla regional izquierda que desplazó parte de la provincia Mojave de California más de 800 km hacia Sonora durante el Jurásico. La hipótesis fue construida en base a estudios de estilos de deformación, estudios petrográficos, correlaciones estratigráficas de unidades sedimentarias, edades U-PB e isotopía Sm-Nd. Recientemente, [Iriando & Premo \(2011\)](#) realizaron una revisión de la literatura de las rocas Proterozoicas de Sonora y el SW de E.U.A., incluyendo trabajos de geoquímica de elementos mayores, traza e isótopos de Sm-Nd ([Iriando et al., 2004](#); [Iriando et al 2008](#); [Enríquez-Castillo et al., 2009](#); [Izaguirre et al., 2008](#)). Los autores reconocen la extensión hacia Sonora de las provincias Mojave, Yavapai y Mazatzal del SW de E.U.A., indicando que el “Bloque Caborca”, definido por [Anderson & Silver \(2005\)](#), representa una amalgamación de las tres provincias que no pueden ser diferenciadas solamente en base a edades, por el solapamiento de edades de 1.77-1.61 Ma. Los autores proponen un “Doble Oroclinal” de las provincias proterozoicas provocado por la amalgamación de arcos de islas durante el Mesoproterozoico, acorde a los modelos propuestos como mecanismo de acreción continental en Laurentia ([Whitmeyer & Kalstrom, 2007](#)). El “Doble Oroclinal” se propone como una teoría alternativa a la MCMS e intenta explicar la persistencia de rasgos estructurales NW-SE en Sonora desde el Proterozoico.

Las rocas Proterozoicas de Sonora más estudiadas tanto en el siglo pasado como en el presente se encuentran en la región de Caborca. Existen otras regiones en Sonora donde afloran rocas Proterozoicas como las rocas del rancho La Lámina ([Stephens, 1988](#)) y el rancho El Tuli ([Rodríguez-Castañeda, 1988](#)) que han tenido un protagonismo mucho más secundario, y solo se mencionan en la literatura para ser correlacionadas con los intrusivos de Caborca en base principalmente a dataciones U-Pb y estudios petrográficos, como los granitos con la característica textura gráfica y edades que rondan los 1,100 Ma que son correlacionados por los investigadores con el granito Aibo.

Un elemento fundamental en las reconstrucciones paleogeográficas de supercontinentes son las intrusiones, derrames y enjambres de diques máficos, ya que su presencia generalmente indica las zonas de debilidad en donde se manifiestan procesos geológicos de escala regional, por lo que controlar sus características geoquímicas y estructurales es fundamental (Ernst & Buchan, 2001; Campbell, 2005; Chiarenzelli et al., 2010; Lui et al., 2013; Ciborowski et al., 2014; Olsson et al., 2016). Este tipo de rocas han sido estudiadas ampliamente alrededor del mundo, siendo clave en la asociación de las masas continentales durante el rompimiento o ensamblaje de supercontinentes a través de la historia geológica (Srivastava et al., 2019). En Sonora, sin embargo, se les ha prestado poca o nula atención, se infieren de edad *grenvilleana* y correlacionables con la provincia de intrusiones máficas de 1,100-1,076 Ma en Arizona, California y Texas, por lo que solamente son reportadas (Iriondo et al., 2004; Nourse et al., 2005; Enríquez-Castillo et al., 2009) y en algunos casos aislados, discutidas (Iriondo & Premo, 2011). La verdadera naturaleza, ambiente de formación y contexto tectónico del magmatismo máfico de 1,100 Ma en Sonora es prácticamente desconocido. Una excepción es el trabajo de Barrón-Díaz (2013), que identificó metabasanitas en el cerro San Agustín y un metagrabro con ankaramita asociadas en el Cerro Clemente, al sur de Pitiquito, ligados al rompimiento del supercontinente Rodinia. Otro caso particular son las anortositas del rancho El Tecolote, estudiadas por Espinoza et al. (2003) y Campillo-Castelo, 2008. Las anortositas de Caborca y los granitos tipo Aibo se han correlacionado genéticamente con enjambres de diques e intrusiones de anortositas y granitos similares en el SW de E.U. en un pulso de magmatismo máfico de 1,100 Ma que se extiende desde el norte de México hasta Canadá (Bright et al., 2014).

La generación de información nueva que complemente la literatura clásica abre la puerta a reevaluar el conocimiento generado en las últimas décadas por medio del análisis de elementos de mayores y trazas junto con relaciones isotópicas de Nd, geocronología U-Pb, y más recientemente, firmas isotópicas de Hf (Goodge & Vervoort, 2006). Este trabajo se enfoca en la generación e interpretación de datos estructurales, análisis petrográficos y especialmente análisis de elementos mayores y trazas para las rocas Proterozoicas estudiadas por Rodríguez-Castañeda (1988; 1990; 1994; 1996) en la región de Tuape, para contrastarlos

con rocas de características similares en el margen SW de Laurencia. Actualmente no existen datos geoquímicos sobre estas rocas. La información más significativa son los datos geoquímicos de los diques máficos, de los cuales existen pocos trabajos enfocados en este tipo de rocas en Sonora. Los datos geoquímicos de rocas máficas Proterozoicas pueden ser utilizados como indicadores de ambientes tectónicos (Rifting continental, actividad magmática relacionada a plumas mantélicas, orogénesis y márgenes continentales activos). Con este trabajo se espera una aportación a la literatura sobre la distribución de los diferentes tipos de corteza en el noroeste de México y su relación con el contexto tectónico tanto regional como global.

1.2 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área El Teguachi se encuentra dentro de la región de Tuape, en las inmediaciones de los poblados de Tuape, Opodepe, Huepac, Banámichi y Sinoquipe. El área El Teguachi se encuentra aproximadamente a 118 km en línea recta al NE de Hermosillo (Figura 1), en la porción inferior derecha de la carta topográfica Santa Ana (H12B82). El acceso al área se hace partiendo de Hermosillo por la carretera estatal No. 14 con rumbo al poblado de Mazocahui. De aquí se toma la carretera estatal No. 89, pasando por los poblados de Baviacora, Aconchi, Huépac, hasta llegar a Banamichi.

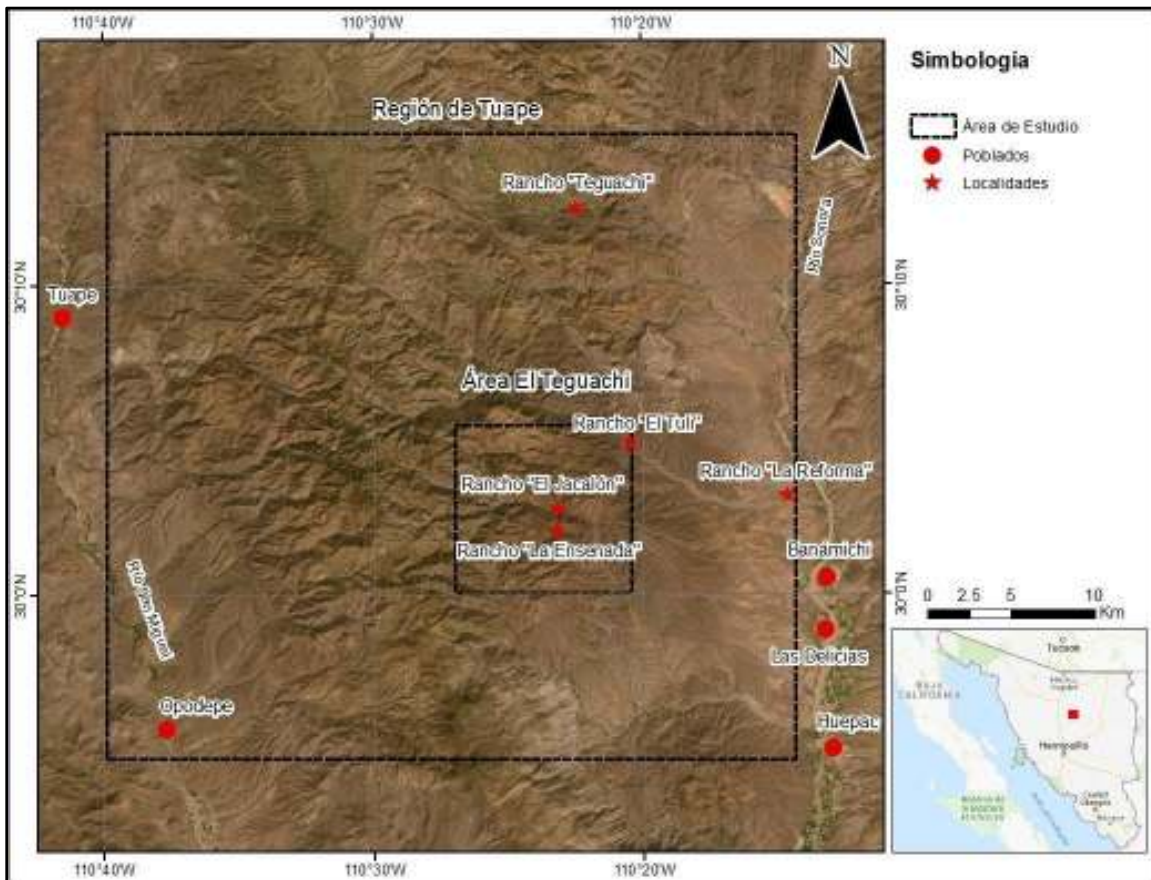


Figura 1. Plano de localización de la región de Tuape, en donde se muestran las áreas de estudio.

Para llegar al rancho El Tuli que se encuentra en la esquina noreste del área El Teguachi se toma un camino de terracería a 5 km de Banamichi que continua hacia el oeste pasando el rancho La Reforma, recorriendo aproximadamente 20 km hasta llegar al rancho El Tuli. Para entrar a la porción centro-sur del área El Teguachi, el acceso se realiza por el poblado de Las Delicias, el cual se encuentra a 3 km al sur de Banamichi por la Carretera estatal No. 89. De las Delicias se toma un camino ejidal de Terracería que se recorre por aproximadamente 16 km para llegar al rancho La Ensenada.

1.3 FISIOGRAFÍA

El área El Teguachi se encuentra dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental (SMO), dentro de la subprovincia de Sierras Alargadas (Raisz, 1964), la cual se caracteriza por sierras y alargadas y angostas. En las inmediaciones del rancho La Ensenada, los elementos topográficos más prominentes son los cerros el Monito y Puerta El Cajón superando apenas los 1,100 m.s.n.m., en la parte norte del área El Teguachi se encuentra la Sierra el Juracal, de forma alargada este-oeste con una elevación de 1,400 m.s.n.m. La corriente de agua más importante en el área es el río San Miguel, el cual pasa al este del área El Teguachi; el afluente más importante del río San Miguel dentro del área es el arroyo El Carrizo, el cual fluye hacia el norte y es de naturaleza intermitente, llevando agua en la temporada de lluvias.

Debido a la edad de las rocas estudiadas, en el campo se observa un ciclo de erosión maduro en donde la topografía es de pendientes suaves y no muy prominentes, alcanzando alturas relativas de 400 mts. También es posible observar una expresión topográfica diferencial en las unidades geológicas reconocidas. La granodiorita El Jacalón se observa mal preservada y fuertemente erosionada, por lo que sus afloramientos no son muy prominentes, en cambio el granito Santa Margarita se encuentra formando las topografías más sobresalientes. La cuarcita Los Changos se dispone en forma de parches aislados en general poco prominentes.

Sin embargo, la cuarcita Los Changos se preserva mejor que los intrusivos debido a su composición y cubre a las litologías anteriores.

1.4 ANTECEDENTES

La información del granito Santa Margarita y la granodiorita El Jacalón es limitado en la literatura. El Área El Teguachi fue primeramente estudiada por [Rodríguez-Castañeda \(1988; 1990; 1994; 1996\)](#). En el trabajo de 1988 se reconocieron por primera vez la granodiorita El Jacalón y el granito Santa Margarita (nombres informales) junto con otras rocas Proterozoicas de la región de Tuape, como el Complejo Metamórfico El Alamito. En estos trabajos no se fecharon las rocas estudiadas, si no que se correlacionaron con rocas de la región de Caborca en base a petrografía. Se menciona la presencia de intrusiones de reducidas dimensiones y diques de composición máfica asociados al granito Santa Margarita y la granodiorita El Jacalón. El trabajo de [Rodríguez-Castañeda \(1996\)](#) se enfoca más a la deformación dúctil asociada a los Complejos Metamórficos Complejos (MCC, o “Metamorphic Core Complexes” en inglés) que afectan a rocas Proterozoicas cerca del poblado de Opodepe que involucra corteza Proterozoica en donde afloran el granito Santa Margarita y la granodiorita El Jacalón. [Corral-Gastelum & Hernandez-Morales \(2007\)](#), por parte del Servicio Geológico Mexicano (SGM), llevaron a cabo la cartografía geológico-minera de la carta Santa Ana (H12B82) a escala 1:50,000, que incluye la región de Tuape estudiada por Rodríguez-Castañeda. Después de esos trabajos iniciales, en la literatura existen pocos trabajos en donde se presentan datos sobre estas rocas ([Amato et al., 2009](#); [González-León et al., 2011](#)). [Anderson & Silver \(2005\)](#) fecharon finalmente la granodiorita El Jacalón y el granito Santa Margarita en $1,702 \pm 10$ Ma y $1,104 \pm 21$ Ma respectivamente. [Bright et al. \(2014\)](#) correlacionan todas las intrusiones de 1,100-1,070 Ma desde California, pasando por Sonora y Texas hasta Canadá, en base a fechamientos U-Pb e isotopía de Sm-Nd. Los autores incluyen las rocas máficas y félsicas de Sonora de 1,100 Ma (en particular las anortositas del rancho El Tecolote y los granitos Aibo y Santa Margarita) con enjambres de diques, intrusiones máficas y félsicas que afloran en todo el margen sur de Laurencia y proponen un magmatismo bimodal relacionado a una LIP denominada “Southwestern

Laurencia Large Igneous Province” (SWLLIP). Su emplazamiento ocurre ligeramente después de la Orogenia *Greenville* y el acoplamiento de Rodinia, y se proponen dos mecanismos para el emplazamiento de estas rocas que involucran el adelgazamiento de la corteza litosférica y/o el ascenso de una pluma mantélica.

1.5 METODOLOGÍA

La metodología utilizada para realizar el presente trabajo puede ser dividida en cuatro bloques fundamentales. A continuación, se detallan cada uno de ellos.

1.5.1 BLOQUE 1: RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Se realizó una búsqueda bibliográfica en la literatura dividida en 3 fases. La primera fase tuvo como fin familiarizarse con ideas clásicas de la geología del Proterozoico de Norteamérica y el NW de México que sentaron las bases para los modelos y teorías actuales, además de documentarse sobre el estado actual del contexto local, siendo prioritarios los trabajos que presentaran datos geoquímicos de cualquier tipo, como dataciones U/Pb y/o relaciones isotópicas. La segunda fase se enfocó en un contexto global, sobre estudios en diferentes partes del mundo con resultados principalmente de geoquímica de elementos trazas y relaciones isotópicas para intrusiones y diques de composición máfica y otras litologías más exóticas, como granitos anorogénicos *rapakivi* y anortositas que se asocian a magmatismo anorogénico, ascenso de plumas mantélicas, la formación de Supercontinentes y eventos de *rifting* Proterozoicos. La tercera etapa de recopilación bibliográfica está enfocada exclusivamente al tema de caracterización geoquímica de rocas y diagramas de discriminación en base a elementos incompatibles y relaciones isotópicas. La recopilación bibliográfica fue un proceso continuo y finalizó una vez que el texto de tesis entró en las últimas fases de redacción, revisión y aprobación.

1.5.2 BLOQUE 2: TRABAJO DE CAMPO

Antes de comenzar con los trabajos de campo se realizó una visita a los poblados de Banámichi y Aconchi con el fin de conseguir el permiso por parte de los propietarios para el acceso a los ranchos El Tuli, La Ensenada y El Jacalón. Solamente la propietaria del rancho El Jacalón se negó a proporcionarnos acceso. Una vez conseguidos los permisos correspondientes se realizó una visita de verificación para corroborar la información obtenida de la recopilación bibliográfica, reconocer las litologías que afloran dentro del área El Teguachi y proponer áreas viables para realizar trabajos a detalle que incluyen: muestreo para análisis petrográfico, muestreo de esquilas para geocronología y análisis geoquímicos, generación de datos estructurales y cartografía geológica a 1:10,000 o en su caso 1:5,000. Debido a la pandemia causada por el virus SARS-COVID-19, solo fue posible realizar trabajo de campo en uno de los 2 polígonos propuestos para trabajo de campo, con una extensión de 700 Has, denominado polígono 1 (Figura 2), ubicado en la porción centro-sur del área El Teguachi; el rancho La Ensenada se ubica en la esquina NE del polígono. El trabajo de campo se centró en la descripción local de las unidades geológicas reconocidas, aunque la prioridad fue la identificación de afloramientos sanos de diques máficos.

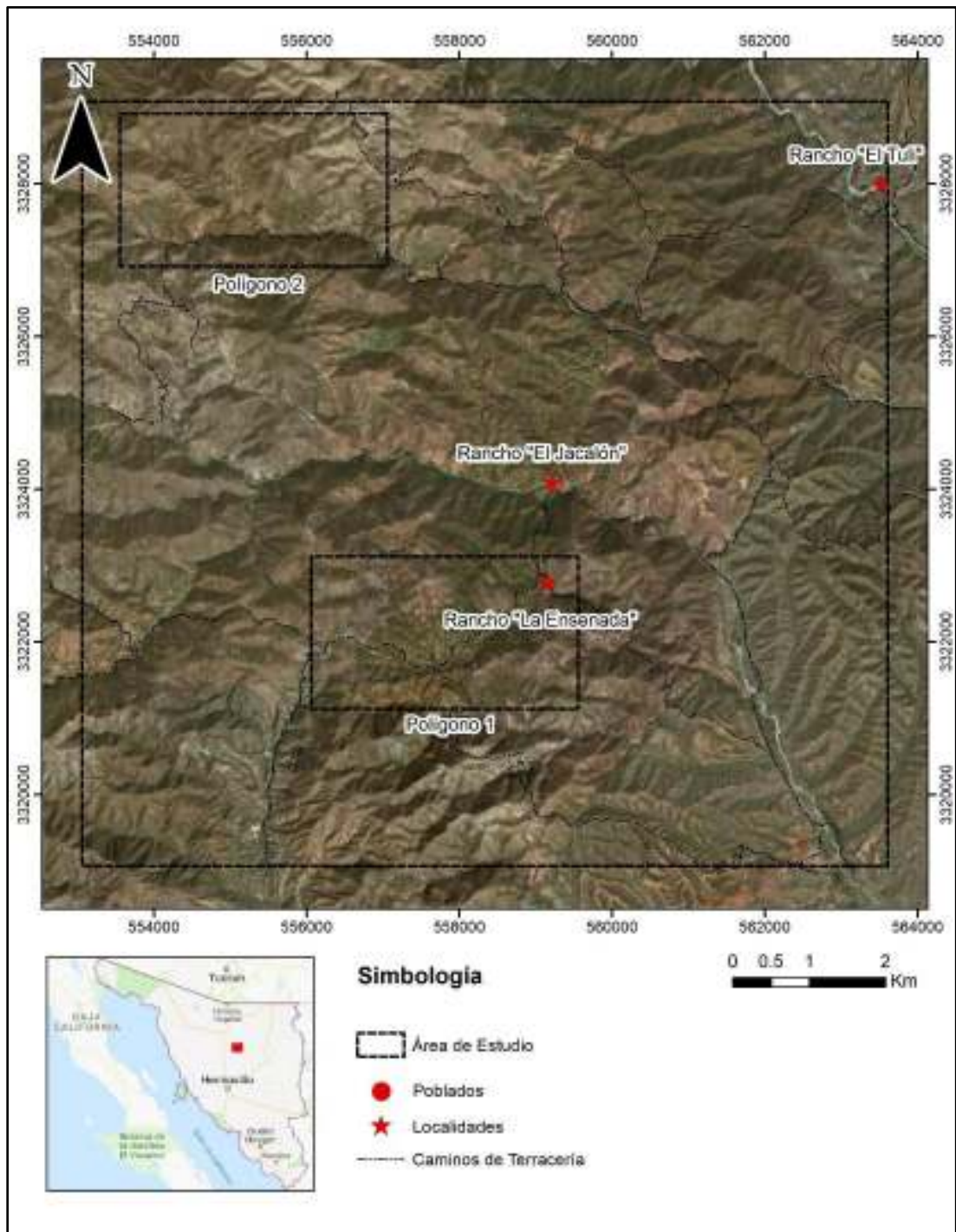


Figura 2. Plano de localización de los polígonos propuestos para trabajos a detalle.

1.5.3 BLOQUE 3: ANÁLISIS QUÍMICOS

Para los análisis químicos se obtuvieron un total de 27 muestras de esquirlas aleatoriamente distribuidas en el polígono de trabajos a detalle y otras zonas de interés de las unidades Proterozoicas y los cuerpos de composición máfica asociados (Tabla 1). Se cuenta con 16 muestras para análisis químicos de elementos mayores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , MnO , TiO_2 y P_2O_5), tierras raras (REE: Rare Earth Elements, en inglés), trazas (Ba, Cr, Sr, V, Zn, Zr, Cs, Hf, Nb, Pb y Rb). Los análisis químicos fueron realizados por la firma comercial ALS Chemex, el paquete utilizado se denomina “Me-MS81d” y utiliza el método de ICP-AES para elementos mayores y el ICP-MS con fusión de borato de litio para trazas y tierras raras (<https://www.alsglobal.com/en/services-and-products/geochemistry>). Los resultados completos se encuentran en el *Anexo I*.

Debido al confinamiento causado por la pandemia del COVID-19, no fue posible realizar la preparación de muestras en los laboratorios de la ERNO-UNAM en Hermosillo, como se tenía previsto. En cambio, se recurrió a métodos manuales para triturar las muestras siguiendo las recomendaciones y precauciones de Riddle (1993). Para esto se utilizó una placa de hierro como yunke y un marro de mano (Figura 3A). A las muestras se les removió la superficie intemperizada y se descartaron las esquirlas o bloques con mucha alteración, intentando triturar únicamente las partes más frescas de cada muestra. Para reducir al máximo una posible contaminación de muestras, el área acondicionada para la trituración fue limpiada antes de comenzar a triturar cada muestra, mientras que el yunke y el marro se precontaminaban con la muestra a triturar y una vez terminada la trituración de la muestra, las herramientas se lavaron con agua y jabón utilizando un cepillo de mano con hebras de plástico. Una vez que las herramientas se secaban se comenzaba nuevamente con el proceso de trituración. Para evitar la dispersión de polvo se utilizaron bolsas para muestras que eran desechadas al terminar la trituración adecuadamente.

Las muestras fueron cuarteadas utilizando hojas de papel para cada ocasión y una porción de la muestra separada fue pulverizada utilizando una pulverizadora de anillos de carburo de tungsteno marca HERZOG ubicada en el departamento de Geología de la Universidad de Sonora, el tiempo de pulverización fue de 2:30 minutos para todas las muestras (Figura 3B). Para la correcta pulverización, el contenedor de anillos era precontaminado y lavado antes de pulverizar la muestra, y nuevamente se limpiaba una vez concluida la pulverización.



Figura 3. A) Equipo utilizado para la trituración de muestras por métodos manuales. B) Pulverizadora de anillos Marca HERZOG utilizada para la pulverización.

Para normalizar los datos geoquímicos en base anhidra, se utilizó la fórmula publicada por Gill (2010), después los datos fueron normalizados al 100%.

$$\%wt \text{ óxido en base anhidra} = \frac{\%wt \text{ total}}{\%wt \text{ total} - LOI}$$

Los diagramas de clasificación y el cálculo de la norma CIPW se hicieron utilizando el software *GDCKit v5* (Janousek et al., 2006; <http://www.gcdkit.org/>), el software libre *Veusz* (<https://veusz.github.io/>) y el programa de edición de imágenes *Paint.net* (<https://www.getpaint.net/>). Los valores de normalización a reservorios utilizados en este trabajo son los de Boynton (1984) para condrita y Sun & McDonough (1989) para el manto primitivo (PM), las dorsales oceánicas (N-MORB y E-MORB) y basaltos de islas oceánicas

(OIB). El tratamiento de datos se hizo en *Excel 365*. En este trabajo se utilizaron las ecuaciones propuestas por [Le Maitre \(1976\)](#) para calcular la relación de Fe^{+2}/Fe^{+3} siguiendo las recomendaciones de [Middlemost \(1989\)](#). El número de magnesio (#mg) se calculó en base a proporciones catiónicas ([Rollison & Peace, 2021](#)).

$$\#mg = \frac{Fe^{+2}}{(Fe^{+2} + Mg^{+2})}$$

Tabla 1. Listado de muestras utilizadas en este trabajo.

| Muestra | Coordenadas UTM | | Litología | Tipo de análisis | |
|---------|-----------------|---------|--------------|------------------|-------------|
| | Este | Norte | | Geoquímica | Petrografía |
| p-04 | 557135 | 3321849 | granodiorita | | X |
| p-15 | 558925 | 3322622 | dique máfico | | X |
| p-18 | 558806 | 3322094 | cuarcita | | X |
| p-19 | 558842 | 3322232 | dique máfico | | X |
| p-20 | 584437 | 3322157 | dique máfico | | X |
| p-27 | 558428 | 3322143 | granodiorita | X | X |
| p-29 | 559618 | 3320752 | Granito | X | X |
| p-30 | 560114 | 3320709 | Granito | X | X |
| p-43 | 557850 | 3321592 | dique máfico | X | |
| p-47 | 558756 | 3322850 | dique máfico | X | |
| p-50 | 557615 | 3322030 | dique máfico | X | |
| p-52 | 557610 | 3321980 | dique máfico | X | |
| p-53 | 557995 | 3321990 | dique máfico | X | |
| p-54 | 557790 | 3321600 | dique máfico | X | |
| p-55 | 557715 | 3321620 | dique máfico | X | |
| p-56 | 557630 | 3321950 | dique máfico | X | |
| p-60 | 557890 | 3321950 | dique máfico | X | |
| p-61 | 558330 | 3322210 | dique máfico | X | |
| p-62 | 559230 | 3322915 | granito | X | |

Actualmente existen tres formas distintas de calcular la relación $FeO/FeO+Fe_2O_3$ y las 3 son igual de válidas ([Verma et al., 2003](#)).

$$\frac{FeO}{FeO + Fe_2O_3} = 0.88 - 0.0016 SiO_2 - 0.027 (Na_2O + K_2O)$$

Para definir correlaciones entre variables elementales de los datos geoquímicos se utilizó la correlación de Spearman. Se optó la correlación de Spearman sobre la de Pearce, ya que la primera es insensible a los valores aislados que no se ajustan a la tendencia de datos ([Rollison](#)

& Peace, 2021). La correlación de Spearman puede ser calculada en Excel con las 2 siguientes formulas:

Columna de jerarquía = JERARQUIA.MEDIA(valor de muestra, columna de datos, 0)

Coefficiente de correlación

= COEF.DE.CORREL(Columna de jerarquía 1, Columna de jerarquía 2)

La primera función genera la columna de orden de rangos, mientras que la segunda genera el coeficiente de correlación de los rangos calculados. La correlación de Spearman se puede consultar en el *Anexo II*.

En este trabajo se utilizó la media geométrica en vez del promedio o media aritmética, debido a que la primera responde mejor a valores extremos, situación que es muy común en bases de datos naturales. La media geométrica se calcula multiplicando todos los números de la base de datos, para después sacar la raíz cuadrada del resultado elevada al número total de datos. La media geométrica se calcula con la siguiente formula.

$$Media\ geométrica = \sqrt[n]{(x_1)(x_2)(x_3) \dots \dots (x_n)}$$

Por otro lado, para complementar los análisis petrográficos se realizó el análisis químico cualitativo de láminas delgadas utilizando el microscopio electrónico de barrido “SEM” (“Scanning Electron Microscope” en inglés) marca ThermoScientific, modelo Phenom Pro, ubicado en el departamento de Geología de la Universidad de Sonora, a cargo de la Dra. Diana Meza Figueroa. El equipo funciona con un voltaje de 15 kV y tiene un detector de electrones retrodispersados y secundarios acoplados con un espectroscopio de rayos X de energía dispersiva (EDS) calibrado con el estándar “Astimex Serial 1Al MINM 25-53+FC”.

El equipo consigue una resolución de hasta 6 nanómetros, con un rango de magnificación electrónica de entre 160x hasta 350,000x. El funcionamiento del SEM se basa en escanear la muestra con un rayo de electrones de alta energía para obtener una imagen con una resolución mucho mayor a la que se generaría con luz normal. La interacción del haz de electrones con la superficie de la muestra al impactar provoca varios fenómenos físicos, principalmente la difracción elástica del haz de electrones y la generación de rayos X debido a que el impacto del rayo de electrones remueve algunos electrones de las orbitas interiores de los átomos de la muestra, por lo que cuando un electrón de los otros orbitales ocupan ese espacio vacío se libera energía en forma de rayos X. Se seleccionaron 5 muestras (Figura 4) con el fin de estudiar los minerales refractarios y ferromagnesianos: 2 láminas del granito Santa Margarita (P-30), una lámina y un talón de muestra de la granodiorita El Jacalón (P-27b) y una lámina de un dique máfico lo suficientemente sano para obtener una buena lectura (P-15). Los resultados pueden consultarse en el *Anexo III*.

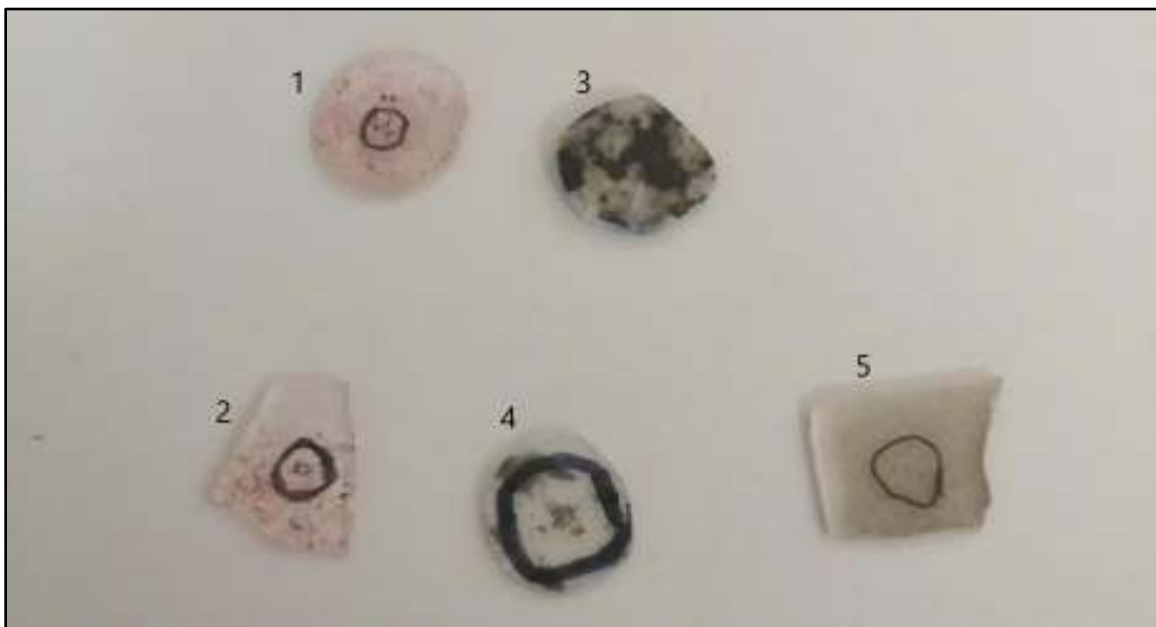


Figura 4. Muestras seleccionadas para el análisis SEM. Clave de muestras 1 y 2: P-30, 3 y 4-P27b, 5: P-15.

La Preparación de muestras para los análisis SEM fue mínima, ya que únicamente se redujo el tamaño de las láminas delgadas a un círculo con un diámetro de 2 cm para poder entrar en el porta-objetivo del SEM. Las láminas se recubrieron con una fina película de grafito para darle una conductividad eléctrica elevada y estabilizar la descarga del rayo de electrones del SEM. Los minerales de interés se marcaron adecuadamente en las muestras. En total se obtuvieron 40 análisis puntuales. Los resultados del SEM fueron transformados a óxidos mayores utilizando la siguiente fórmula, después se normalizaron al 100%.

$$\% \text{peso (óxido)} = \frac{\text{Valor del elemento (SEM)}}{Fc},$$

donde $Fc = \frac{(\text{Peso atómico de catión}) * (\text{Número de cationes en óxido})}{\text{Peso molecular del óxido}}$

Los cálculos minerales fueron realizados siguiendo el procedimiento de [Deer et al. \(1992\)](#), utilizando una hoja de Excel. La [Figura 5](#) muestra el procedimiento y los pasos para convertir el porcentaje en peso de óxidos (%wt) en átomos por unidad de fórmula o “*Apfu*” (*atom per formula unit*). Para clasificar minerales como piroxenos, anfíboles, micas y cloritas se utilizaron los esquemas de clasificación de [Morimoto et al. \(1988\)](#), [Leake et al. \(1997\)](#), [Rieder et al. \(1998\)](#) y [Foster \(1962\)](#) respectivamente, en donde se detalla el orden de prioridad de los elementos en la red cristalina y como deben acomodarse los cationes en los sitios estructurales. La [Tabla 2](#) muestra las fórmulas químicas generales utilizadas para realizar los cálculos, tomando en cuenta la falta de H_2O^+ en los análisis SEM. Debe mencionarse igualmente que para los cálculos de micas y cloritas se prefirió utilizar la “*media celda*”, o bien, la mitad de la fórmula general, para facilitar los cálculos.

Tabla 2. Formulas mineras generales utilizadas para los cálculos cristaloquímicos.

| Mineral | Formula general |
|--------------------|----------------------------------|
| Feldespatos | $B_1 Z_4 O_8$ |
| Clorita | $R_6 T_4 O_{10} (OH)_8$ |
| Mica | $I_{0-1} M_{2-3} T_4 O_{10} A_2$ |
| Anfibol | $A_{0-1} B_2 C_5 T_8 O_{22} W_2$ |
| Piroxeno | $M2_1 M1_1 T_2 O_6$ |

Las clasificaciones cristaloquímicas generalmente se basan en relaciones aritméticas simples que utilizan las *Apfu*. En el caso de [Morimoto et al. \(1988\)](#), se utilizan los parámetros $Q=Ca+Mg+Fe^{+2}$ y $J=2Na$ para clasificar los piroxenos. [Leake et al. \(1997\)](#) utiliza para los anfíboles el parámetro $Mg/(Mg+Fe^{+2})$, junto con la cantidad y sitio estructural que ocupan los cationes en la fórmula química. [Rieder et al. \(1998\)](#) utiliza la deficiencia de cationes en el sitio I^{1-0} y las relaciones $Mg/(Mg+Fe^{+2})$, $Al/(Al+Fe^{+3})$ y $R^{+2}/(R^{+2}+R^{+3})$, en esta última se utilizan los cationes de valencias $+2$ y $+3$. [Foster \(1962\)](#) desarrollo su clasificación para cloritas utilizando principalmente el contenido de Fe_2O_3 (%wt) y la deficiencia de silicio (Si). Para minerales con fórmulas químicas más simples (feldespatos, circones y óxidos) solamente se utilizó como referencia su fórmula general. Las concentraciones de Fe^{+2} y Fe^{+3} se calcularon utilizando el procedimiento descrito por [Droop \(1987\)](#), tomando las consideraciones del autor con ciertos grupos minerales como micas y anfíboles. El procedimiento de [Droop \(1987\)](#) se explica detalladamente en la [Figura 6](#), el cual se basa en la fórmula $Fe^{+3}=(2*x)*(1-T/S)$; donde x se refiere al número de oxígenos utilizado en el cálculo, S es igual al número de cationes obtenidos en *Apfu* (la sumatoria de la columna 6 en la figura fulana) y T es igual al número de cationes en la fórmula general.

1.5.4 BLOQUE 4: TRABAJO DE GABINETE

El trabajo de gabinete se realizaba cada vez que se generaban nuevos datos, por lo que fue un proceso continuo que duró el periodo establecido de dos años para el programa de maestría en la Universidad de Sonora. En esta parte de la metodología se incluye la realización de los análisis petrográficos, los análisis químicos y su interpretación, el procesamiento de los datos de campo en un Sistema de Información Geográfica (SIG), la creación de figuras y tablas y la redacción del presente documento de tesis y la actualización de la bibliografía.

EJEMPLO DE TABLA DE CÁLCULOS

| Óxido | B ₂ T O _x | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|--------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Óxido | | | | |
| SiO ₂ | 31.5 | 60.08 | 0.524300932 | 1.048601864 |
| Al ₂ O ₃ | 0.04 | 101.96 | 0.000392311 | 0.001176932 |
| FeO | 40.33 | 71.85 | 0.561308281 | 0.561308281 |
| MnO | 26.09 | 70.94 | 0.367775585 | 0.367775585 |
| MgO | 1.59 | 40.3 | 0.039454094 | 0.039454094 |
| CaO | 0.05 | 56.08 | 0.000891583 | 0.000891583 |
| total | 99.6 | | | 2.01920834 |

Factor de oxigenos: $4 / 2.01920834 = 1.980974385$

Para calcular en base a los oxigenos necesarios, se suman todos los valores de la Col. 4 y se dividen por el numero de oxigenos que tiene la formula estructural del mineral estudiado. En este caso se trata de un olivino (B₂TO₄) con 4 oxigenos en su formula, por lo que se calcula en base a 4 oxigenos

EXPLICACIÓN DE COLUMNAS

1: valores de la muestra en porcentaje en peso por óxido (Wt%)

2: Peso molecular del óxido

3: Col. 1/Col. 2

4: Multiplicar Col. 3 por número de oxigenos del óxido en cuestión.

Ejemplo:

SiO₂ = Col. 3 * 2

Al₂O₃ = Col. 3 * 3

5: Multiplicar la Col. 4 por el factor de oxigenos.

6: Se multiplica la Col. 5 por la relación de elementos en el óxido para obtener las *Apfu*.

Ejemplo: Si O₂ Al₂ O₃
 SiO₂ = Col. 5 * 1/2 ; Al₂O₃ = Col. 5 * 2/3

Figura 5. Procedimiento para cálculos minerales de Deer et al. (1992)

Anfibol sin deficiencias estructurales
 No. de oxigenos (x)=24

| A | 1 | 6 | 7 |
|--------------------------------|------------|------------|------------------|
| Óxido | %wt | Apfu | Col.6*Fc balance |
| SiO ₂ | 48.9245516 | 7.14885187 | 7.07601593 |
| CaO | 8.99160866 | 1.79359918 | 1.77532513 |
| Al ₂ O ₃ | 12.9816357 | 2.23547056 | 2.21269451 |
| MgO | 9.83156798 | 2.14169246 | 2.11987186 |
| FeO | 16.225741 | 1.98251798 | 1.96231913 |
| Na ₂ O | 3.04489507 | 0.8625616 | 0.85377340 |
| Total (S) | 16.1646937 | | 16 |



| Corrección de Fe | |
|--------------------------------------|------------|
| Cationes (T) | 16 |
| Fc balance | 0.98981152 |
| Fe ⁺³ | 0.48904703 |
| Fe ⁺² | 1.49347095 |
| Recálculo FeOx | |
| FeO(%wt) | 12.2231794 |
| Fe ₂ O ₃ (%wt) | 4.44804672 |



| B | 1 | 6 |
|--------------------------------|------------|------------|
| Óxido | %wt | Apfu |
| SiO ₂ | 48.9245516 | 7.07674543 |
| CaO | 8.99160866 | 1.77550815 |
| Al ₂ O ₃ | 12.9816357 | 2.21292263 |
| MgO | 9.83156798 | 2.12009042 |
| FeO | 12.2231794 | 1.47840715 |
| Fe ₂ O ₃ | 4.44804672 | 0.48412583 |
| Na ₂ O | 3.04489507 | 0.85386143 |
| Total (S) | 16.0016611 | |

Explicación:

- 1.- Se calcula Fc balance=Cationes (T)/ Total (S)
 Si S<T, el calculo no se realiza y todo el Fe pasa a ser Fe⁺²
- 2.- Se calcula Fe⁺³=(2*No. se oxigenos (x))*(1-(Fc balance))
- 3.- Se agrega la columna 7 al calculo cristaloquimico de la tabla A con Col. 7= Col. 6*Fc balance.
- 4.- El Fe⁺² se calcula: Fe⁺²(col.7)-Fe⁺³; Si se obtiene un numero negativo, se detiene el proceso y todo el Fe pasa a ser Fe⁺³
- 5.- Se recalcula el valor de FeO(%wt) con la siguiente ecuación: $FeO(B) = \frac{FeO(A)_{anterior} \cdot Fe^{+2}}{(Fe^{+2} + Fe^{+3})}$
- 6.- Se calcula el valor de Fe₂O₃ con la siguiente ecuación: $Fe_2O_3 = \frac{(FeO(A) \cdot Fe^{+3} \cdot 1.1113)}{(Fe^{+2} + Fe^{+3})}$

Figura 6. Procedimiento para calcular el contenido de Fe⁺³ en los cálculos cristaloquimicos según Droop (1987).

2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

En la región comprendida entre los poblados de Banámichi, Opodepe, Tuape y Sinoquipe (**Figura 7**) afloran rocas Proterozoicas denominadas informalmente como el Complejo Metamórfico El Alamito, la granodiorita El Jacalón y el granito Santa Margarita (**Rodríguez-Castañeda, 1988; 1990; 1994; 1996**). El Complejo Metamórfico El Alamito consiste en alternancias de esquistos y gneises fechados en 1,800 Ma, con metamorfismo datado en 1,650 Ma (**Rodríguez-Castañeda, 1994**), mientras que los intrusivos El Jacalón y Santa Margarita han sido clasificados petrográficamente como granodiorita de biotita y granito de biotita con textura gráfica, respectivamente (**Corral-Gastelum & Hernandez-Morales, 2007**).

La granodiorita El Jacalón ha sido datada en $1,702 \pm 10$ Ma y el granito Santa Margarita en $1,104 \pm 21$ Ma (**Anderson & Silver, 2005**). Una agrupación de diques de composición máfica afloran asociados a las rocas anteriores.

A nivel regional afloran la cuarcita Los Changos, asignada al Proterozoico Tardío (**Rodríguez-Castañeda, comunicación personal**); rocas volcánicas y volcanosedimentarias del Jurásico Inferior, unidades sedimentarias del Jurásico Superior conocidas informalmente como Formación La Colgada y Formación Dos Naciones (**Rodríguez-Castañeda, 1988**). En el Cretácico Inferior se tiene una secuencia de calizas y lutitas conocida como Formación Los Tanques, seguida por la Formación Tarahumara, que consiste de rocas volcánicas y volcanosedimentarias del Cretácico Superior (**Corral-Gastelum & Hernandez-Morales, 2007**). En el área afloran varios cuerpos intrusivos relacionados a la última fase del magmatismo Laramídico de finales del Cretácico e inicios del Paleógeno, representados principalmente por la típica granodiorita reconocida en todo el estado de Sonora, pórfidos riolíticos, dacíticos y andesíticos. Por último, el Mioceno está representado por la Formación Baúcarit y los depósitos de sedimentos del Paleoceno y aluvión del Holoceno.

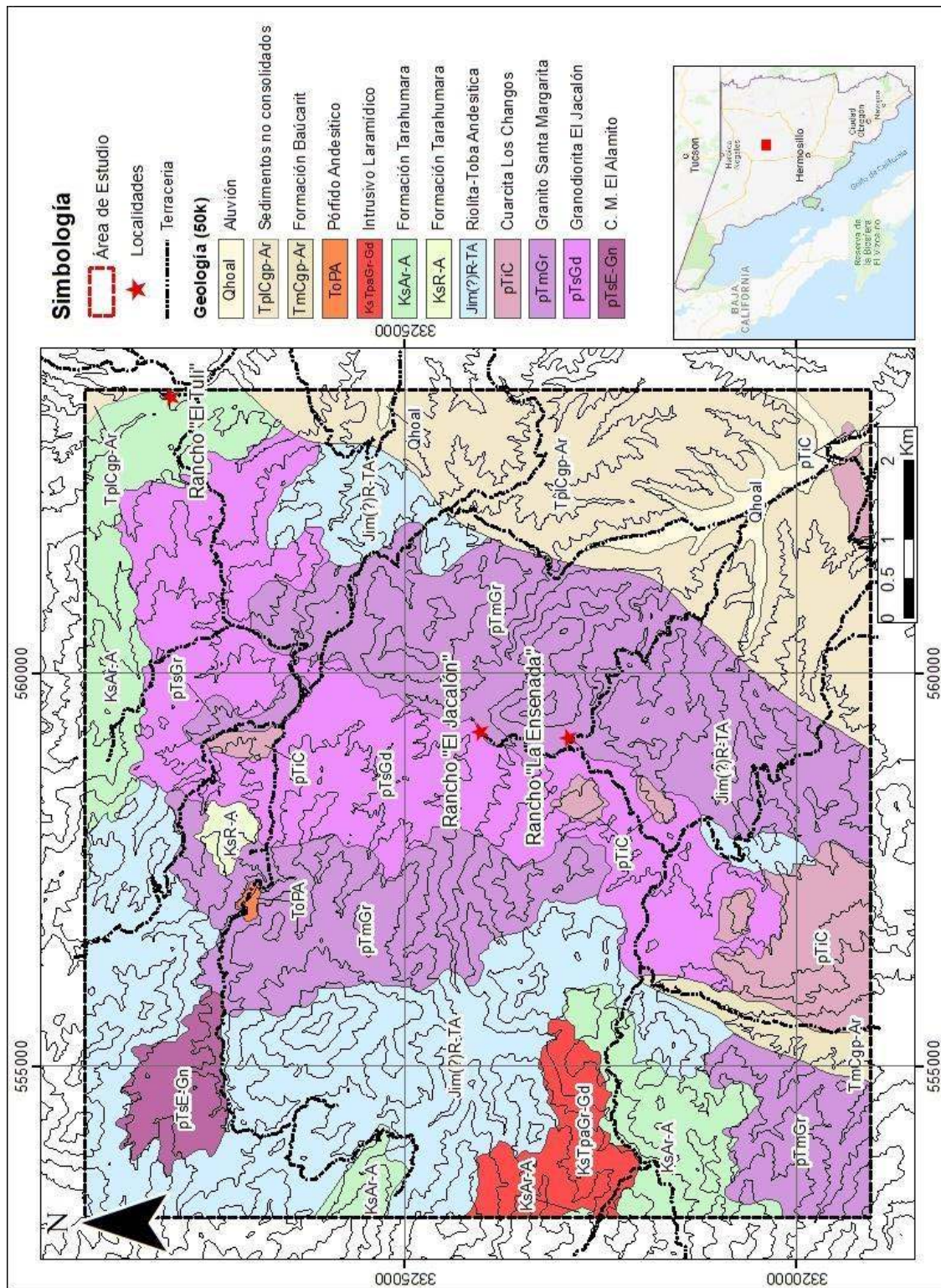


Figura 7. Plano geológico del área El Teguachi. Modificado de Corral-Gastelum & Hernandez-Morales, 2007.

Estructuralmente, el área presenta una gran complejidad e historia geológica. Se han identificado al menos cuatro eventos de deformación en la región (Rodríguez-Castañeda, 1988; 1996): el primer evento ocurre en el Proterozoico, siendo el causante del metamorfismo sufrido por el Complejo El Alamito. El segundo evento está representado por fallas inversas que yuxtaponen a rocas Paleozoicas sobre rocas Proterozoicas y Jurásicas, evidenciando un transporte tectónico hacia el NE-N. Este evento de deformación se asocia tentativamente a la actividad de la Megacizalla Mojave-Sonora. El tercer evento de deformación corresponde con la Orogenia Larámide, representada principalmente por el emplazamiento de batolitos graníticos-granodioríticos y el desarrollo de un arco volcánico, implicando un periodo de levantamiento tectónico y denudación (Rodríguez-Castañeda, 1988). El último evento de deformación está representado por fallas normales de alto ángulo que formaron el actual relieve de Sierras y Valles paralelos en gran parte del Estado de Sonora.

3 GEOLOGÍA LOCAL

En esta sección se describen las unidades geológicas reconocidas durante los trabajos de campo dentro del polígono seleccionado. Hasta el momento solamente fue posible hacer una descripción detallada en campo de la granodiorita El Jacalón, el granito Santa Margarita y la Cuarcita Los Changos. La descripción de las demás unidades del polígono 1 han sido complementadas de la bibliografía (Figura 8).

3.1 GRANODIORITA EL JACALÓN (PtsGd)

La granodiorita el Jacalón aflora ampliamente al oeste del rancho La Ensenada, con afloramientos pobres que forman las topografías más suaves y sirven como base estratigráfica para las demás unidades. Los afloramientos mejor preservados se encuentran en los cortes de arroyos, en donde la roca se encuentra relativamente fresca.

La roca se observa en muestra de mano como una granodiorita de grano medio a grueso de aspecto moteado formada esencialmente de plagioclasas, anfíboles, poco cuarzo y feldespatos rosas que no abundan, pero resaltan mucho (Figura 9A). En algunos afloramientos la roca presenta cúmulos de máficos con bordes principalmente discretos, aunque también se observan algunos difusos, con formas redondas, tabulares y sigmoidales de entre 2 y 16 cm (Figura 9B). Es posible que estos cúmulos representen o bien un proceso de concentración de máficos al momento del emplazamiento de la granodiorita, o podría tratarse de enclaves, xenolitos o cúmulos provenientes del magma fuente que formó a la granodiorita u otro magma no relacionado.

Uno de los rasgos más sobresalientes de la granodiorita es la presencia de gran cantidad diques de composición máfica y un color verde oscuro que cortan a la granodiorita con rumbos preferenciales N-NW y algunos E-NE. Los diques presentan una textura fanerítica fina en donde resaltan los cristales de plagioclasas y ferromagnesianos.

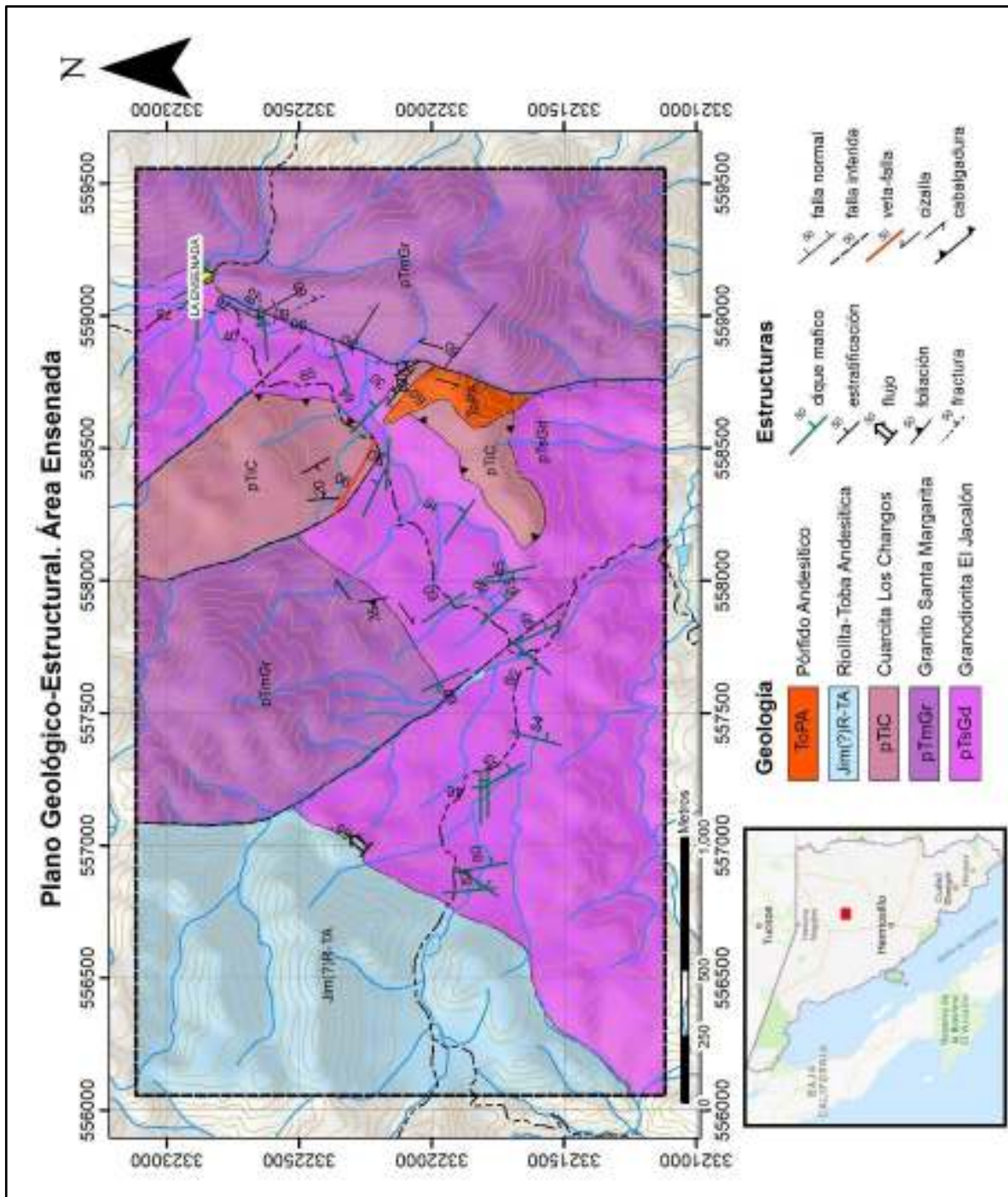


Figura 8. Plano geológico-estructural del polígono 1.

Los diques se aprecian muy bien en los cortes de los arroyos sobre la granodiorita y llegan a tener espesores de entre 1 y 5 m, aunque hay casos excepcionales en donde alcanzan hasta los 23 m (**Figura 10**).



Figura 9. A) afloramiento de Granodiorita con enclaves alargados y sigmoidales, B) otro afloramiento de la granodiorita en donde se observa un enclave de más de 20 cm de largo.



Figura 10. Vista panorámica del afloramiento de un dique máfico que afecta a la granodiorita, con un espesor de más de 15 m.

Corral-Gastelum & Hernandez-Morales (2007) recolectaron la muestra petrográfica SA106 (12N 558552; 3321720), clasificada petrográficamente como granodiorita de biotita, constituida por plagioclasa (50%) del tipo albita, cuarzo (20%) con extinción ondulante, feldespato (15%) del tipo ortoclasa, microclina, biotita (10%) y hornblenda (5%).

Como principal alteración, la granodiorita presenta una fuerte oxidación que se manifiesta como embarraduras de hematita y jarosita dentro de fracturas, en las zonas más intemperizadas, la alteración ha obliterado la textura original, aunque se puede observar el aspecto moteado de la roca. Se observan vetillas de clorita, feldespato potásico y una muy leve silicificación, sin embargo, las vetillas se acentúan en las cercanías y dentro de los diques, predominando las vetillas de clorita sobre la oxidación.

3.2 GRANITO SANTA MARGARITA (*pTmGr*)

El granito Santa Margarita aflora principalmente hacia el este del rancho La Ensenada, formando los cerros El Monito y La Sábana, de topografías sobresalientes que contrastan con la granodiorita El Jacalón.

En afloramiento y muestra de mano, el granito tiene una textura equigranular media, un color rosado característico debido a la predominancia de cuarzo y feldespato potásico, plagioclasa y escasa biotita como accesorio (Figura 11A). Se observa que pocos feldespatos desarrollan textura gráfica. El granito se encuentra intrusionado por los mismos diques que cortan a la granodiorita El Jacalón. Se tomaron las muestras P-50 y P-52 de estos diques para geoquímica. Se identificaron otros diques de color blanco y apariencia moteada que cortan solamente al granito Santa Margarita cerca de las fallas terciarias, con un rumbo general WNW y echados mayores a 60° (Figura 11B). Estos diques tienen espesores entre 4-5 m y se diferencian de los otros diques por estar fuertemente silicificados, con desarrollo de calcedonia y nódulos de óxidos que han obliterado la textura original.

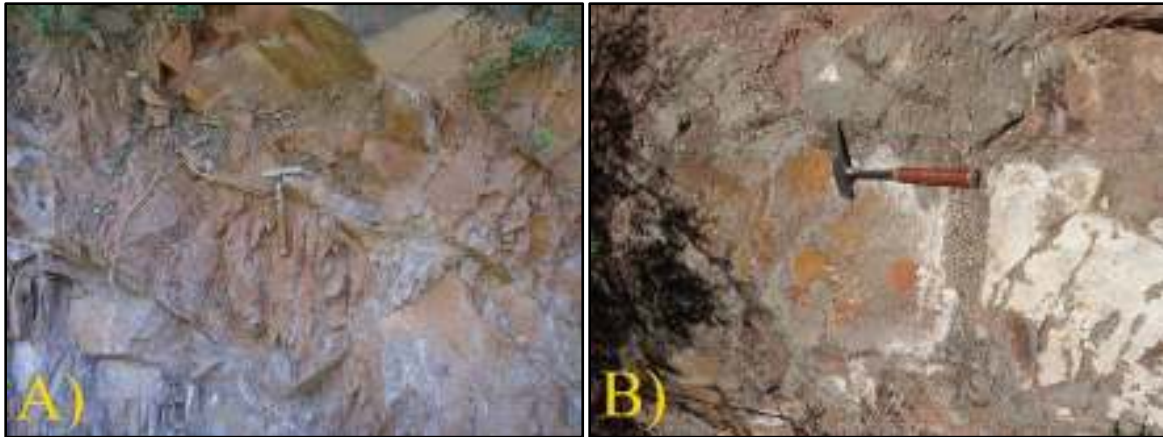


Figura 11. A) afloramiento del granito Santa Margarita, B) diques máficos que cortan al granito, nótese los parches o manchones de hematita.

Corral-Gastelum & Hernandez-Morales (2007) recolectaron la muestra petrográfica SA 061 (12N 538599; 3332182), que clasifican como un granito de biotita, constituida por feldespato (55%), de tipo microclina, cuarzo (25%), con intercrecimientos gráficos y extinción ondulante, plagioclasa (15%) del tipo albita y biotita (5%).

La principal alteración que afecta al granito es una silicificación leve a moderada que emblanquece la roca. También se observa una oxidación leve en afloramiento, pero en roca fresca la oxidación no destaca. Al sur del Rancho La Ensenada, una falla pone en contacto tectónico a la granodiorita El Jacalón con el granito Santa Margarita, aunque la traza está oscurecida debido a un arroyo. Igualmente, en la porción central del área, el contacto entre estas unidades se encuentra cizallado, mientras que más al sur, el granito Santa Margarita intrusión a la granodiorita El Jacalón.

3.3 CUARCITA LOS CHANGOS (pTiC)

La Cuarcita Los Changos aflora formando topografías elevadas, los afloramientos se encuentran fuertemente condicionados por el arreglo estructural del área.

La cuarcita se observa en campo de color gris ligeramente azulado, y consta de una secuencia de conglomerados y areniscas principalmente de cuarzo, de grano medio-grueso dispuestas en capas de espesores entre 1 y 1.5 m con un rumbo general NW-SE y echados suaves entre 50° y 20° (Figura 12). En el afloramiento del cerro El Cajón, la unidad cubre discordantemente a los intrusivos Precámbricos. Corral-Gastelum & Hernandez-Morales (2007) recolectaron la muestra petrográfica SA101 (12N 550060; 3318907), clasificada como cuarcita, formada 100% por cuarzo en un mosaico equigranular.



Figura 12. Afloramiento de la cuarcita Los Changos en las faldas del Cerro el Monito. Nótese la estratificación de las capas.

La Cuarcita Los Changos se encuentra en contacto tectónico con el granito Santa Margarita y la granodiorita El Jacalón. De acuerdo con Rodríguez-Castañeda (1994), la Cuarcita Los Changos es la unidad más afectada por cabalgamientos, indicando que casi todos sus

contactos son tectónicos. Los contactos por cabalgamiento no se aprecian bien en campo debido a que están pobremente preservados. Sin embargo, dentro de la unidad es evidente un plegamiento suave que no se observa a simple vista, sino que se infiere de los datos de estratificación.

3.4 RIOLÍTA-TOBA ANDESÍTICA (*Jm(?)R-TA*)

Esta unidad aflora principalmente en la porción oeste del área, en la cañada Comedero, formando cerros con pendientes abruptas y topografías moderadamente altas. La unidad aflora como una toba riolítica-riodacítica de color rosado-rojizo, con abundantes cristales subhedrales de plagioclasa, cuarzo y escasos anfíboles que se encuentran en una matriz principalmente vítrea con clara textura fluidal y abundantes vesículas. [Corral-Gastelum & Hernandez-Morales \(2007\)](#) recolectaron la muestra SA 095 (12 N 540120; 3322362), clasificándola petrográficamente como toba dacítica, constituida esencialmente por plagioclasa (50%), cuarzo (25%), vidrio (10%), fragmentos de roca (8%) y sanidina (5%). Como principal alteración, se observa una silicificación incipiente que emblanquece la roca, y una cloritización que afecta a los ferromagnesianos. La unidad se encuentra cubriendo discordantemente a la granodiorita El Jacalón, y por contacto tectónico con el granito Santa Margarita.

3.5 PÓRFIDO ANDESÍTICO (*ToPA*).

Esta unidad aflora como un pequeño stock blanco en el cerro El Monito, controlado por el arreglo estructural del área. La unidad consiste de un pórfido andesítico de color blanco. La matriz del intrusivo es criptocristalina, con abundantes cristales subhedrales de plagioclasa y hornblenda con ocasionales cristales de cuarzo. Esta unidad se encuentra emplazada en una zona de debilidad en la falla que pone en contacto tectónico al granito Santa Margarita y a la granodiorita El Jacalón. [Rodríguez-Castañeda \(1984\)](#) le asignó a este intrusivo una edad de 27 Ma en base a estudios isotópicos.

4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Dentro del área cartografiada, predominan las fallas normales con componentes oblicuos que actúan como contactos tectónicos entre las unidades Precámbricas, siguiendo un rumbo general NW50°SE y sensiblemente N-S. Un caso notable es la falla que pone en contacto a la granodiorita El Jacalón y el granito Santa Margarita en la porción central del área, con un rumbo general de NE30°SW, definida como falla a rumbo por [Rodríguez-Castañeda \(1994\)](#). Dicho contacto se encuentra muy pobremente preservado y se manifiesta como un arroyo muy abrupto, teniendo la particularidad de observarse una gran cantidad de rodados de ambas rocas con una deformación moderada, pero no pervasiva. Debido a que el contacto se encuentra demasiado mal preservado, solo fue posible observar un afloramiento del granito con deformación en donde se puede inferir un esfuerzo lateral derecho y una milonitización leve. Este tipo de contactos se encuentran poco representados en la literatura, debido probablemente a la escala de la cartografía realizada en estudios anteriores, así como la diferencia de interpretación de los contactos Precámbricos, por lo que la edad de la deformación no fue determinada por falta de información. De igual manera, los diques máficos emplazados en la granodiorita y el granito se encuentran estructuralmente relacionados al contacto de forma tal que parecen formar parte de un sistema riedel lateral derecho, denominado Sistema 1 ([Figura 13](#)), la cizalla principal sigue el contacto tectónico entre ambos intrusivos, mientras que los diques máficos se emplazaron preferencialmente en las fracturas X y R debido a su carácter transtensional, con muy escasas manifestaciones de estructuras P. Este sistema se encuentra cortado por fallas regionales que afectan a unidades Jurásicas, pero dichas fallas no están relacionadas, es muy probable que este contacto entre rocas Proterozoicas sea tan antiguo como el granito Santa Margarita. La Tabla 3 muestra las estructuras identificadas en el Sistema 1 y el Sistema 2 que se describirá a continuación.

Tabla 3. Valores generales de los sistemas riedel identificados en el área El Teguachi.

| Estructuras | Y | R | R' | P | X | T |
|-------------|-----|------|------|-----|------|-----|
| Sistema 1 | 30° | 90° | 155° | 40° | 170° | 95° |
| Sistema 2 | 20° | 155° | 125° | - | - | - |

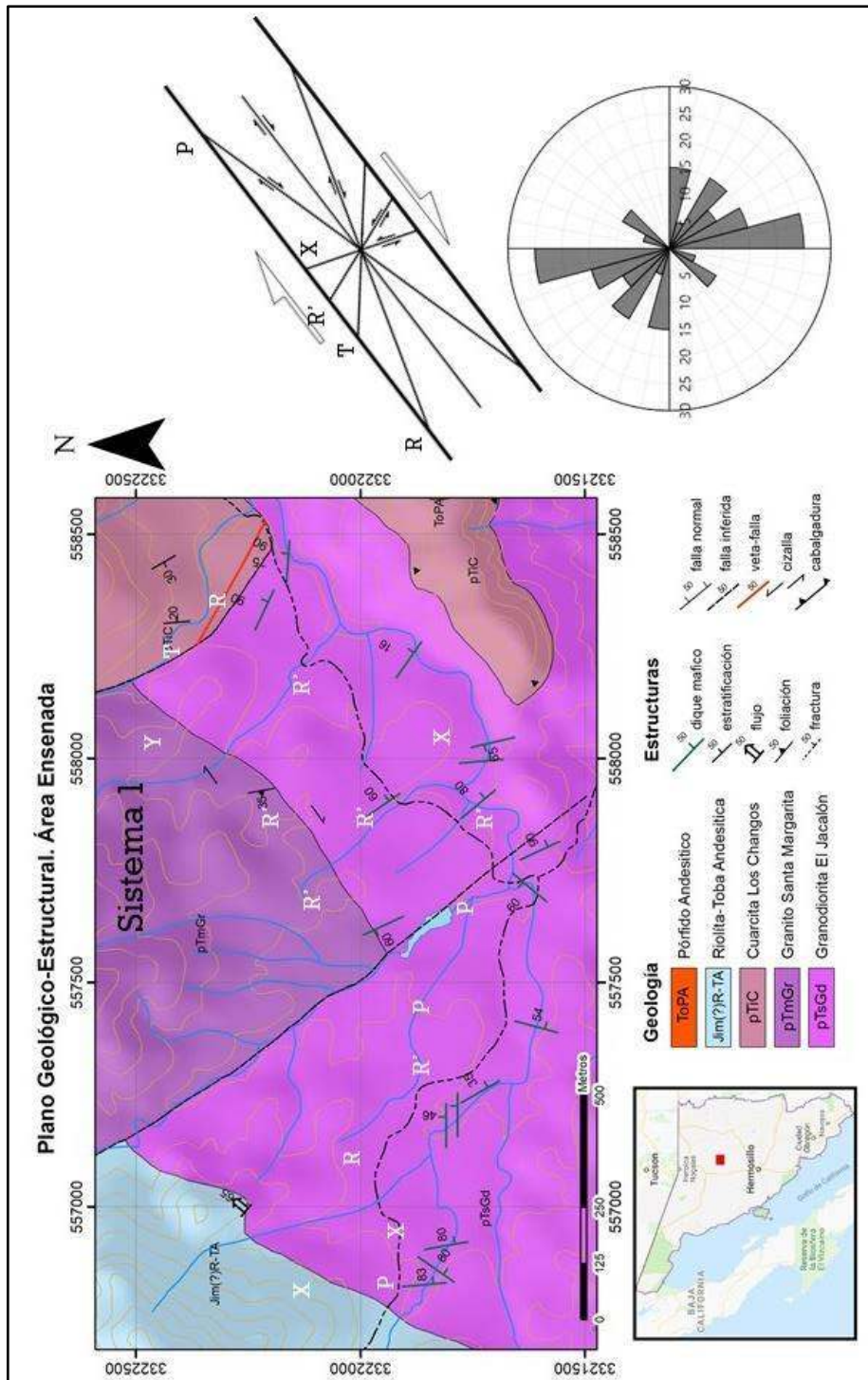


Figura 13. Plano geológico-estructural que incluye el esquema y relaciones estructurales del Sistema I. El diagrama de rosas muestra el rumbo preferencial de estructuras lineales (diques, fracturas y fallas).

La otra estructura principal en el área es de nueva cuenta una falla normal oblicua con deslizamiento izquierdo que pone en contacto a los intrusivos Precámbricos al sur del rancho La Ensenada. Originalmente este contacto era de carácter intrusivo, que puede observarse todavía al norte del rancho, en donde la actividad de la falla no llegó a manifestarse. En el cerro el Monito, la zona de debilidad creada por la falla propicio el emplazamiento de la unidad ToPA como un stock sigmoidal que acarrió los fluidos hidrotermales que imprimieron la silicificación tan abundante en las rocas aledañas. Esta deformación no desarrolló foliación en las rocas que afecta. Es muy probable que la actividad de la falla esté relacionada a la deformación de tipo *Core Complex* estudiada por [Rodríguez-Castañeda \(1996\)](#) al este de Opodepe y a las demás fallas regionales identificadas en el área. La actividad de esta falla fue lo suficientemente intensa para desarrollar un sistema riedel de movimiento lateral izquierdo denominado Sistema 2, que se encuentra conjugado con el sistema más antiguo ([Figura 14](#)). Las fracturas R' y P de ambos sistemas coinciden más o menos en rumbo, por lo que la deformación más reciente afecta a algunos diques máficos, imprimiéndoles un movimiento contrario del sistema al que pertenecen ([Figura 15](#)).



Figura 15. Deformación documentada en los diques máficos, en donde se observan vetillas de cuarzo deformadas y relleno de las fracturas. La deformación de las fotografías corresponde con el componente P del sistema 2.

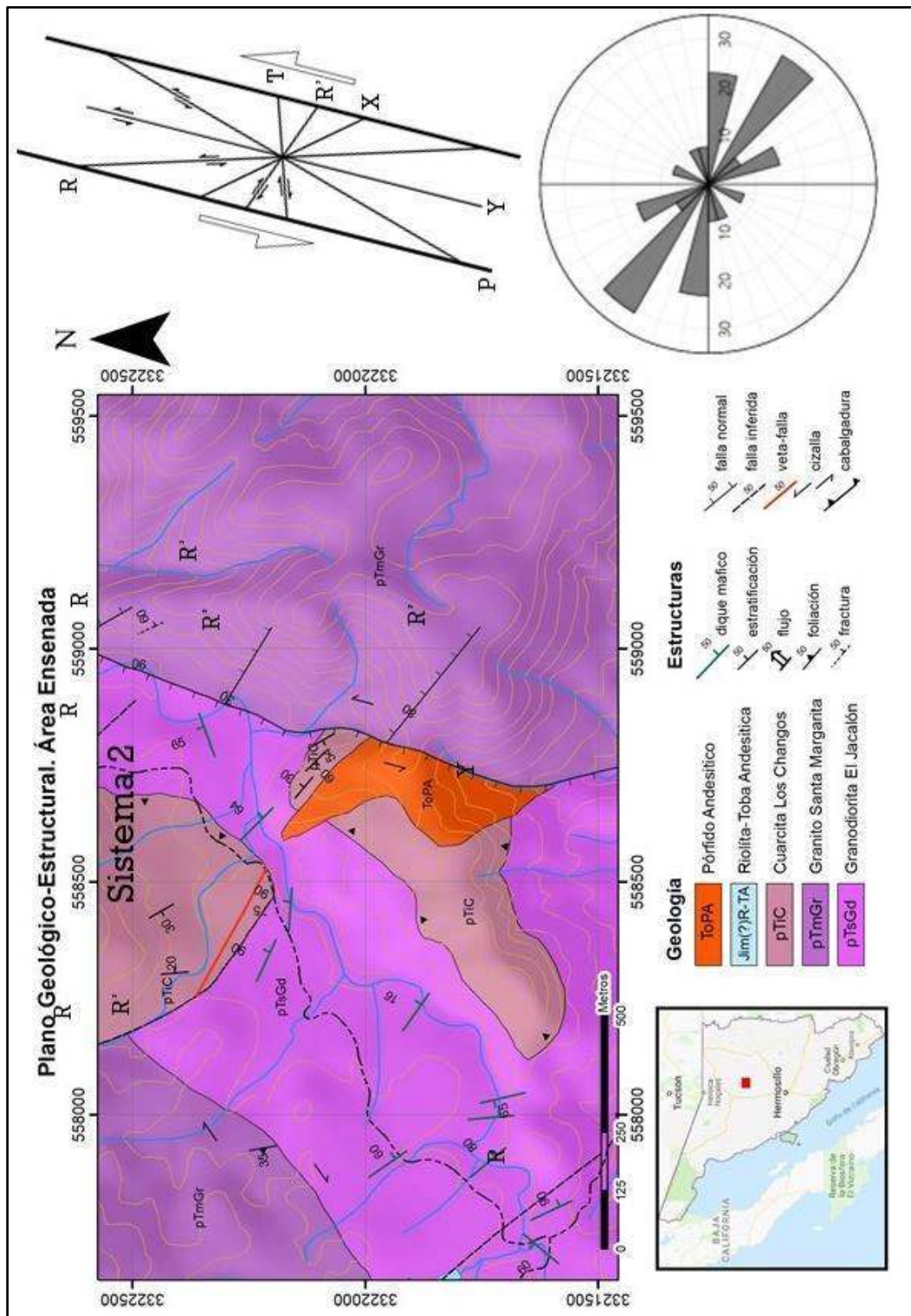


Figura 14. Plano geológico-estructural que incluye el esquema y relaciones estructurales del Sistema 2.

5 ANÁLISIS PETROGRÁFICO:

Complementando los datos de campo, se tomaron ocho muestras petrográficas para análisis. Sin embargo, debido a que las muestras presentan características muy homogéneas, la descripción petrográfica se hará por unidad geológica. la descripción petrográfica se complementó con los minerales opacos y ferromagnesianos identificados por medio del análisis SEM.

5.1 GRANODIORITA EL JACALÓN (*PtsGd*)

Las láminas P-4, P-27 y Ej-03 muestran una masa cristalina formada por fenocristales euhedrales a subhedrales de plagioclasa de tipo albita-oligoclasa y feldespato potásico (ortoclasa), con cuarzo rellenando los espacios. En esta masa cristalina están inmersos cristales anhedrales de clorita y hornblendas cálcicas acompañados de minerales opacos (hematita e ilmenita) y cristales de circón y apatito. El feldespato potásico que forma la matriz es principalmente ortoclasa con una alteración moderada a arcillas identificadas como illita, muscovita y cedalonita, aunque se observa la macla de Carlsbad claramente en muchos fenocristales, que pueden ser mayores a los 4 mm. En menor proporción se observan cristales de plagioclasa con signos claros de argilización y maclas polisintéticas bien desarrolladas con un ángulo de extinción entre 10° a 18°, clasificándolas como albita-oligoclasa (Figura 16A). También se observaron fenocristales escasos de microclina con su característica macla en red. El cuarzo se observa como cristales subhedrales y anhedrales con contactos interdigitados o en forma de sierra (textura consertal) que rellenan los espacios entre los feldespatos y como cristales pequeños desarrollados dentro de los ferromagnesianos (Figura 16C). En algunos casos se observa cuarzo microcristalino, o cristales de cuarzo con extinción ondulante, sin embargo, estos son más escasos. Los ferromagnesianos presentan clivaje doble con un ángulo aproximado de 60°, un pleocroísmo que va de café claro a un verde oscuro y un color de birrefringencia amarillo y en algunos casos naranja del segundo orden. El análisis SEM determino que se trata de hornblendas de composición cálcica y están acompañadas por

cristales pequeños de piroxenos como ferrosilita y enstatita con alto contenido en Fe (Figura 16B). Su principal forma es anhedral con textura esqueletal donde abundan cristales de apatito, plagioclasas, cuarzo, opacos (Ilmenita) y una considerable cantidad de circones (Figura 16D), en algunos cristales de hornblenda se observan bandas de óxidos que siguen el clivaje. Es posible que la textura esqueletal en las hornblendas evidencie la inestabilidad del mineral, aunque no se reconocieron texturas de reacción. Por otro lado, los fenocristales que presentan clivaje tienen formas subhedralas. Por último, como minerales de alteración se tienen cristales de clorita anhedral con textura lamelar y alto contenido en Fe, pero sin orientación en particular. Las cloritas presentan pleocroísmo de colores verdes y un color de birrefringencia bajo.

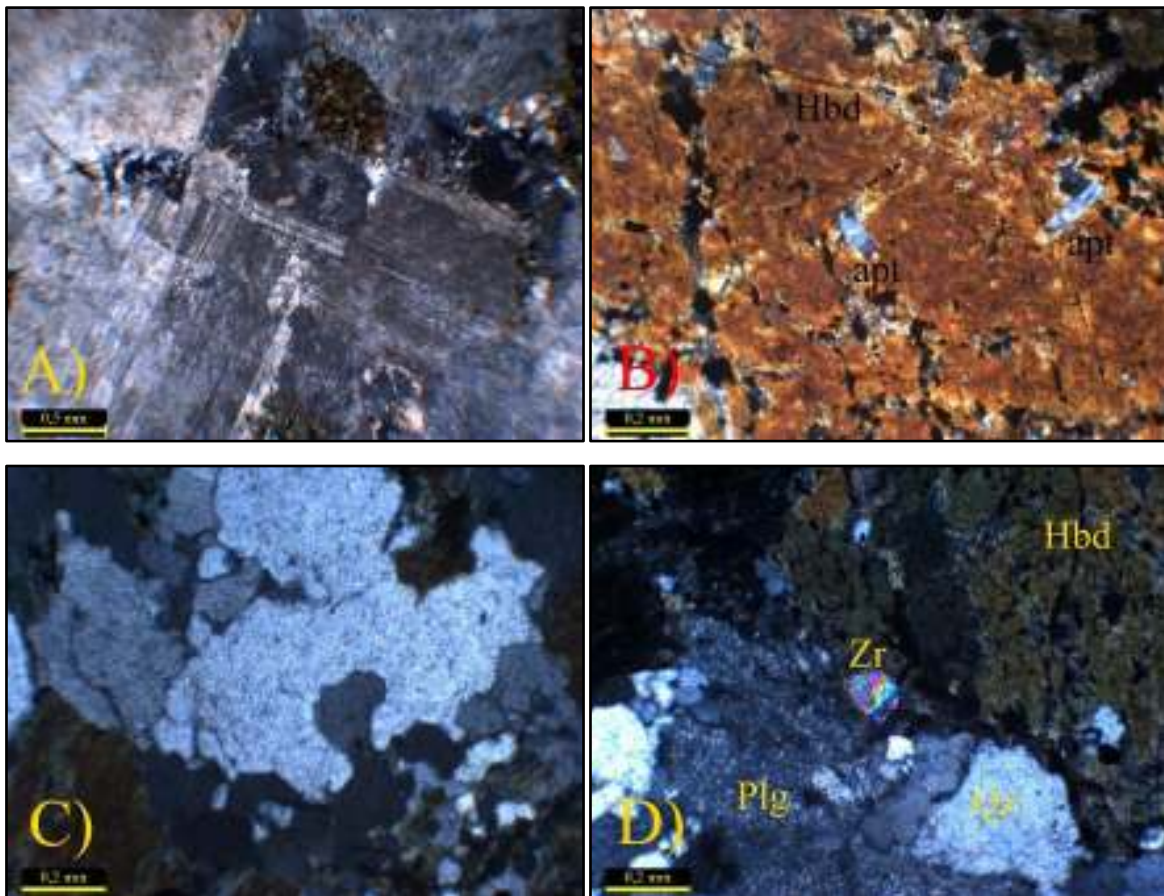


Figura 16. Microfotografías representativas de láminas delgadas de la granodiorita El Jacalón. A) Cristales de plagioclasa con su macla polisintética. B) Cristal de hornblenda esqueletal con cristales

de apatito. C) Cuarzo dentro de hornblenda con textura consertal. D) Cristal de zircón dentro de un cristal de hornblenda. Hbd=hornblenda, apt=apatito, Plg=plagioclasa, Qz=cuarzo, Zr=Circon.

5.2 GRANITO SANTA MARGARITA (pTmGr)

Las muestras EJ-01 y P-30 muestran una roca constituida esencialmente de fenocristales subhedrales de cuarzo y feldespato potásico que presenta texturas de intercrecimiento de tipo gráfica, micrográfica, granofirica y una proporción menor de textura mirmekítica (Figura 17A). En algunas ocasiones se aprecian fenocristales de microclina.

El principal feldespato potásico es ortoclasa, con maclas de Carlsbad muy bien definidas. Los fenocristales se encuentran levemente alterados a sericita, con manchones de hematita, y en algunas ocasiones con textura micropertítica. El cuarzo se presenta como fenocristales con tres tipos de textura de intercrecimiento con el feldespato: la textura gráfica es la predominante y se observa incluso en muestra de mano, en segundo lugar, se observa una textura micrográfica, mientras que la textura granofirica se observa en los cristales de cuarzo de menor tamaño. Dentro de esta masa cristalina están inmersos cristales escasos de color café oscuro con un leve pleocroísmo y textura lamelar, en este caso se trata de biotita con un solo clivaje y un alto contenido en Fe y trazas de Ti. La biotita no se encuentra tan bien preservada como el cuarzo o el feldespato, y presenta bordes de reacción o textura en corona (Figura 17B). El mineral de alteración es otra mica con alto contenido de Na y Fe identificada como natroglaucónita. Asociados a la biotita se observan minerales opacos que también afectan en menor medida a los feldespatos, que fueron identificados en el análisis SEM como Leucóxeno (alteración de ilmenita como agregado de grano fino de óxidos de titanio, cuarzo y otros minerales, con $TiO_2 < 70\%$), rutilo y óxido de Zn. En la lámina se observan inclusiones de cristales subhedrales de apatito asociados a los feldespatos. También se observan circones (Figura 17C) con un hábito rectangular (Figura 17D) asociados principalmente a los minerales opacos.

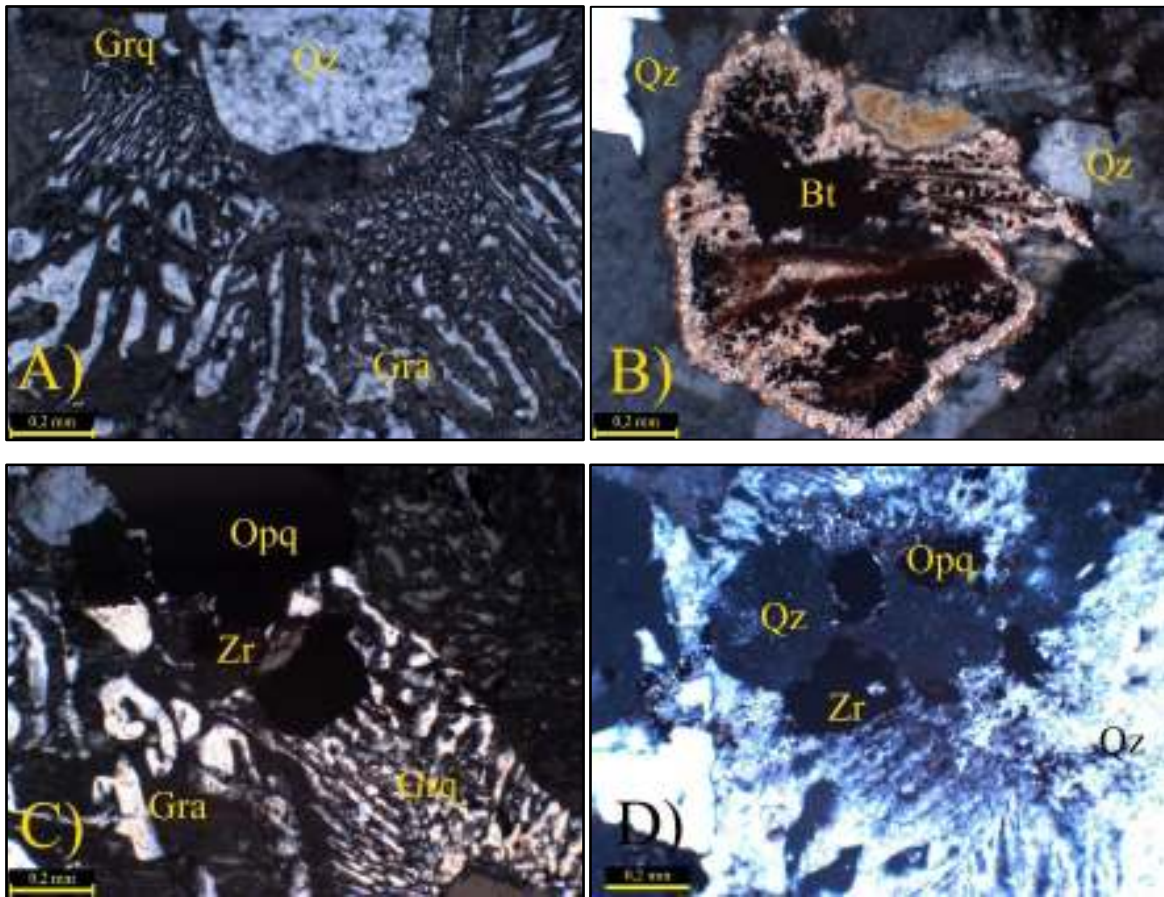


Figura 17. Microfotografías representativas de láminas delgadas pertenecientes al granito Santa Margarita. A) Texturas de intercrecimiento entre cuarzo y feldspatos. B) Biotita con halo de alteración o textura corona. C) Cristal de circon. D) Cristal de monacita. Gra=textura gráfica, Grp=textura granofírica, Qz= cuarzo, Bt= biotita, Opq= minerales opacos, Zr= circon.

5.3 DIQUES MÁFICOS

El análisis petrográfico de las muestras P-15, P-19 y P-20 corresponden con los diques máficos que afectan a la granodiorita El Jacalón. Las muestras en general están formadas por una masa de plagioclasas y anfíboles mal preservados con textura fanerítica equigranular de entre 1 a 3 mm, aunque en algunas láminas la textura se observa un poco más gruesa (Figura 18A).

Las plagioclasas que forman la matriz se observan en su mayoría alteradas a sericita en todas las muestras. Las maclas polisintéticas de las plagioclasas son escasas, las que pudieron medirse tienen un ángulo de extinción de 26° , clasificándolas como andesinas (Figura 18B). Los ferromagnesianos que acompañan la matriz fueron identificados como augitas que se encuentran generalmente bien preservados. En estos cristales resalta una textura esquelética con minerales opacos identificados como ilmenita ($\text{TiO}_2=48\%$, $\text{FeO}=36\%$) alterándose a leucoxeno y hematita. El pleocroísmo que presentan las augitas es verde claro a verde limón, con un color de birrefringencia amarillo de primer orden, llegando a colores escandalosos como violeta y rojo (Figura 18A).

Como minerales accesorios se observa ilmenita, algunos apatitos y cristales de hábito rómbico y cúbico con un relieve bastante alto y color de birrefringencia iridiscente de segundo orden, es muy posible que se trate de circones, al igual que los circones de hábito rómbico presentes en el Granito Santa Margarita (Figura 18C). Los cristales son menores a los $0,2$. También se han encontrado escasos circones de redondeados (Figura 18D).

La principal alteración es una cloritización pervasiva de moderada a leve que afecta a los ferromagnesianos, alterándolos a clorita y epidota, mientras que las plagioclasas se encuentran alteradas a sericita. Las micas de alteración identificadas son ilmenita y ferroaluminoceladonita. Adicionalmente se observan vetillas de calcita, cuarzo secundario y clorita-epidota. Las vetillas de clorita-epidota son notables a nivel afloramiento y en lámina delgada afectan a todos los cristales. Por último, también se tiene una oxidación incipiente, muy leve, que afecta principalmente a los ferromagnesianos.

La muestra EJ-02 corresponde con uno de los diques alterados que cortan al granito Santa Margarita, y hasta el momento es el único análisis petrográfico realizado a estos cuerpos. La roca presenta una textura equigranular poco definida formada por cristales euhedrales de plagioclasa dispuestos como pequeñas agujas algo sucias inmersas en una matriz aparentemente vítrea (Figura 19B).

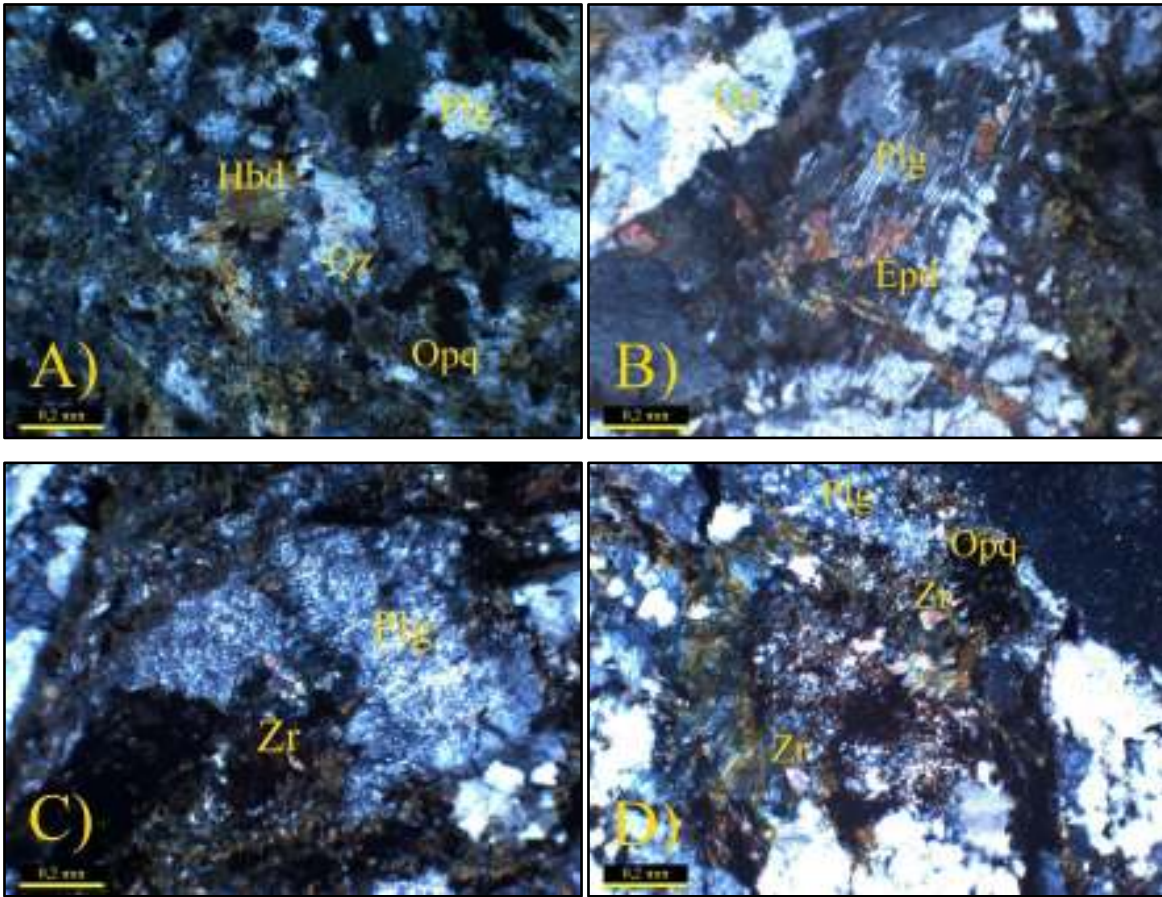


Figura 18. Microfotografías representativas de láminas de diques máficos. A) Vista general de las relaciones minerales y texturas de los diques máficos. B) Cristal de plagioclasa con macla polisintética afectado por una vetilla de epidota. C) Cristal de circon, se observa una plagioclasa fuertemente alterada. D) Cristales de circones dentro de ferromagnesianos mal preservados. Hbd=hornblenda, Plg=plagioclasa, Qz=cuarzo, Epd=epidota, Opq=minerales opacos, Zr=Circon.

Acompañando a las plagioclasas se tienen abundantes cristales de cuarzo angulosos, muy sucios y con bordes difusos. Muchos de estos cuarzos presentan extensión ondulante y en algunas ocasiones se ven policristales de cuarzo (Figura 19A). La roca se encuentra repleta de enclaves irregulares de hematita que destacan por su color rojizo con un largo de entre 3 a 0.2 mm, En uno de los nódulos grandes se observó una aglomeración de cristales euhedrales de calcita con un clivaje bien desarrollado. No es posible identificar el mineral original (Figura 19C). Adicionalmente se observan cristales relictos de ferromagnesianos completamente alterados a plagioclasa, posiblemente se trate de piroxenos, ya que presentan

una forma euhedral y aun preservan el ángulo de clivaje (**Figura 19D**). Los minerales opacos generalmente presentan un hábito cubico con tamaños menores a 0.1 mm. También es común verlos asociados a los enclaves de hematita o como vetillas. Por último, se observan algunos cristales de color verdoso levemente pleocroicos que podrían ser clorita.

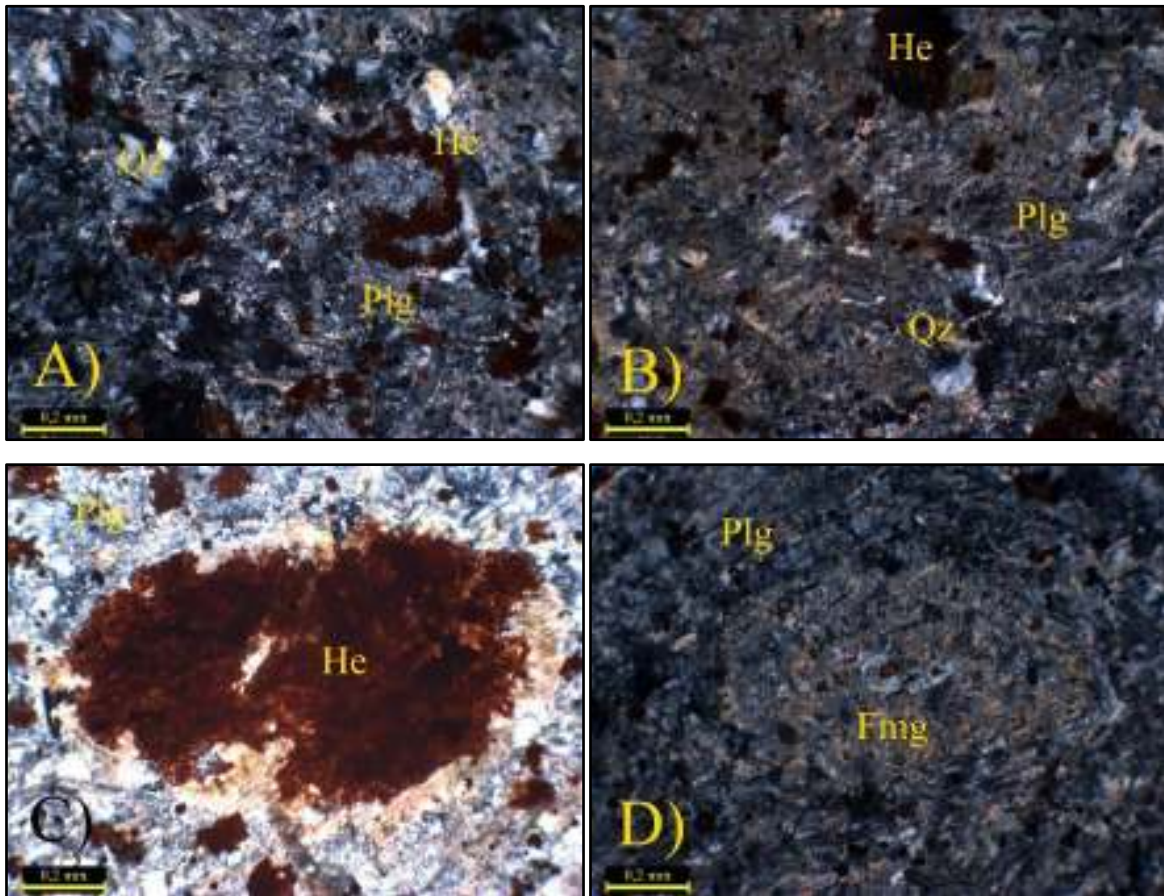


Figura 19. Microfotografías representativas de láminas de diques máficos alterados **A)** Cristales de cuarzo policristalino y enclaves de hematita en la matriz de plagioclasas. **B)** Fenocristales de plagioclasa en forma de aguja dentro de la matriz. **C)** Enclaves de hematita y **D)** Cristales relictos de ferromagnesianos rodeados de agujas de plagioclasa, posiblemente sean ferromagnesianos alterados. Plg=plagioclasa, Qz=cuarzo, He=hematita, Fmg=Ferromagnesiano.

6 RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS

6.1 ELEMENTOS MAYORES

En la **Tabla 4** están los resultados de los análisis de elemento mayores de las muestras recolectadas en este estudio. Las muestras fueron ajustadas en base anhidra y normalizadas al 100% para su uso. La muestra P-56 se incluye en la tabla, sin embargo, esta muestra se descartó ya que presenta una pérdida por ignición (LOI) superior a 3%wt.

Tabla 4. Resultados de los análisis químicos de las rocas del área El Teguachi.

| Litología | Diques Máficos | | | | | | | | | | |
|---|----------------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | Muestra | P-60b | P-43 | P-47 | P-50 | P-52 | P-53 | P-54 | P-55 | P-56 | P-60 |
| SiO ₂ | 49.9 | 47.6 | 49.2 | 48.9 | 50.8 | 48.9 | 50.7 | 50.7 | 60.1 | 50.2 | 50.5 |
| Al ₂ O ₃ | 13.05 | 14.3 | 12.9 | 15.8 | 13.55 | 12.55 | 13.05 | 14.05 | 12.8 | 13.5 | 13.2 |
| Fe ₂ O ₃ ^T | 16.5 | 14.75 | 16.8 | 11.05 | 16.5 | 17.85 | 17.5 | 15.65 | 9.64 | 16.75 | 17.05 |
| CaO | 6.98 | 8.9 | 7.41 | 10.6 | 5.54 | 6.57 | 6.28 | 7.24 | 0.81 | 7.2 | 5.53 |
| MgO | 4.29 | 7.15 | 5.77 | 6.88 | 4.28 | 4.65 | 5.33 | 5.34 | 8.86 | 4.54 | 4.43 |
| Na ₂ O | 3.68 | 2.36 | 2.82 | 1.91 | 2.83 | 2.87 | 2.43 | 3.34 | 0.55 | 3.91 | 3.69 |
| K ₂ O | 0.9 | 0.95 | 0.89 | 2.15 | 1.86 | 1.47 | 1.27 | 1.02 | 1.79 | 1.02 | 1.37 |
| TiO ₂ | 2.03 | 1.22 | 1.57 | 0.45 | 1.98 | 1.52 | 1.59 | 1.15 | 1.09 | 2.03 | 1.63 |
| MnO | 0.26 | 0.23 | 0.23 | 0.21 | 0.26 | 0.23 | 0.23 | 0.24 | 0.11 | 0.27 | 0.25 |
| P ₂ O ₅ | 0.57 | 0.15 | 0.24 | 0.06 | 0.57 | 0.24 | 0.25 | 0.15 | 0.53 | 0.55 | 0.26 |
| LOI | 1.78 | 2.01 | 1.59 | 2.83 | 2 | 1.6 | 1.85 | 2.26 | 5.56 | 1.92 | 1.86 |
| Total | 99.94 | 99.62 | 99.42 | 100.84 | 100.17 | 98.45 | 100.48 | 101.14 | 101.84 | 101.89 | 99.77 |
| Fe ⁺² /Fe ⁺³ | 0.59 | 0.63 | 0.61 | 0.60 | 0.58 | 0.60 | 0.60 | 0.59 | N/D | 0.58 | 0.57 |
| Fe ₂ O ₃ [*] | 5.37 | 4.26 | 5.04 | 3.48 | 5.46 | 5.65 | 5.31 | 5.06 | N/D | 5.63 | 5.79 |
| FeO [*] | 10.28 | 9.71 | 10.83 | 7.10 | 10.24 | 11.24 | 11.27 | 9.85 | N/D | 10.30 | 10.42 |
| FeO ^{T*} | 15.12 | 13.54 | 15.36 | 10.23 | 15.15 | 16.32 | 16.04 | 14.41 | N/D | 15.36 | 15.63 |
| #Mg | 24.80 | 36.84 | 29.58 | 43.63 | 24.88 | 24.61 | 27.21 | 30.06 | N/D | 25.87 | 25.15 |

Los valores con “” fueron calculados como lo indica la metodología.*

Las muestras del granito Santa Margarita y la granodiorita El Jacalón presentan una media geométrica de contenido de SiO₂ de 76%wt para el granito y 60.3%wt para la granodiorita, el contenido de álcalis (Na₂O y K₂O) es de 8.28%wt para el granito y 5.82%wt para la

granodiorita. El contenido de CaO es menor a 0.1 %wt en el granito y de 5%wt en la granodiorita. La alúmina se mantiene constante para el granito con 12%wt, la granodiorita presenta un contenido mayor de Al₂O₃ con 16.5%wt. El contenido de Fe₂O₃^T para el granito es de 1.6%wt, para la granodiorita este valor sube a 4.35%wt. El valor promedio (media geométrica de Fe⁺²/Fe⁺³ (FeO/(FeO+ Fe₂O₃))) calculado es de 0.5 para el granito y de 0.6 para la granodiorita. Con la norma CIPW utilizando los valores calculados de Fe⁺²/Fe⁺³, se revela que estas rocas presentan corindón, hiperstena, ilmenita y magnetita normativos, sin dióxido, hematita, rutilo ni esfena.

Tabla 4. Resultados de los análisis químicos de las rocas del área El Teguachi. Continuación.

| Litología | Granito | | | Granodiorita | |
|---|---------|--------|-------|--------------|--------|
| | P-62 | P-29 | P-30 | P-27 | P-27b |
| SiO ₂ | 77.1 | 76.1 | 75.2 | 58.7 | 58.6 |
| Al ₂ O ₃ | 11.5 | 12.3 | 11.65 | 15.6 | 17.05 |
| Fe ₂ O ₃ ^T | 2.93 | 2.23 | 2.92 | 8.5 | 8.07 |
| CaO | 0.06 | 0.09 | 0.07 | 5.22 | 3.44 |
| MgO | 0.27 | 0.23 | 0.44 | 2.89 | 3.02 |
| Na ₂ O | 2.35 | 2.62 | 2.04 | 3.06 | 3.47 |
| K ₂ O | 5.69 | 6.11 | 5.97 | 2.33 | 2.5 |
| TiO ₂ | 0.27 | 0.23 | 0.26 | 0.6 | 0.9 |
| MnO | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.17 | 0.16 |
| P ₂ O ₅ | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.16 | 0.25 |
| LOI | 0.86 | 0.81 | 0.99 | 2.01 | 2.61 |
| Total | 101.08 | 100.75 | 99.59 | 99.24 | 100.07 |
| Fe ⁺² /Fe ⁺³ | 0.52 | 0.50 | 0.52 | 0.60 | 0.59 |
| Fe ₂ O ₃ [*] | 1.60 | 1.18 | 1.62 | 5.33 | 4.94 |
| FeO [*] | 2.63 | 2.01 | 2.66 | 7.65 | 7.26 |
| FeO ^{T*} | 2.63 | 2.01 | 2.66 | 7.65 | 7.26 |
| #Mg | 25.15 | 25.15 | 25.15 | 25.15 | 25.15 |

Las muestras de los diques máficos presentan un contenido de SiO₂ entre 48.6%wt y 51.8%wt, el contenido de álcalis (Na₂O y K₂O) se encuentra entre 3.4%wt y 5.16%wt, con una media geométrica de 5.72%wt y Na₂O / K₂O =2.6, aunque los valores presentan mucha variación, de 0.9 a 4. El Fe₂O₃^T se encuentra en 16.23%wt (medias geométricas de

Fe₂O₃*=5.1%wt y FeO*=10.12%wt), con un valor mínimo de 11.27%wt. El contenido de MgO se encuentra entre 4.3%wt y 7.3%wt. Con estos datos el número de magnesio (#mg) de los diques es relativamente bajo, con una media de 28.73, aunque las muestras P-43 y P-50 presentan un contenido de MgO>7%wt, un #mg de 36 y 43 y Cr de 290 ppm y 190 ppm, respectivamente. Todas las demás muestras tienen un contenido de Cr<60 ppm. La norma CIPW con la relación calculada de Fe⁺²/Fe⁺³=0.6 indica que las muestras P-43 y P-50 presentan olivino normativo sin nefelina, todas las demás presentan cuarzo normativo. Utilizando el diagrama TAS (Figura 20A), la mayoría de las muestras de diques se clasifican como basaltos, con algunas muestras en los rangos de traquibasaltos, andesitas basálticas y traquiandesitas basálticas. Las muestras de la granodiorita caen en el rango de diorita (Figura 20B), el cual no corresponde con la clasificación de la roca por petrografía. Es posible que esta discrepancia se deba a una sobrerrepresentación de máficos debido a los cúmulos identificados en campo, en especial en las zonas en donde era posible realizar muestreo. Las muestras del granito Santa Margarita se clasifican correctamente como granitos.

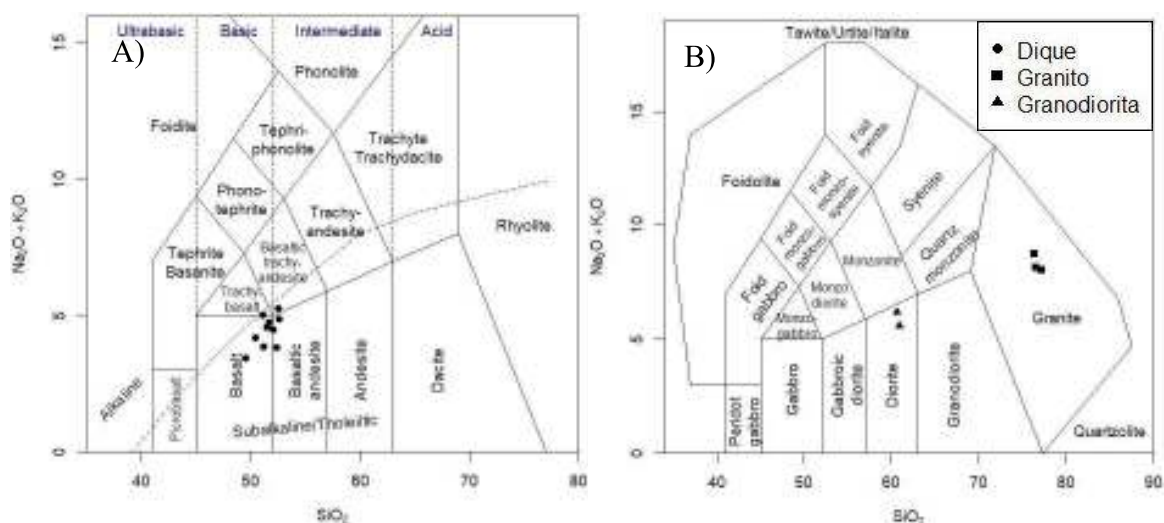


Figura 20. Diagrama de álcalis total vs sílice (TAS); A) diques máficos (LeBas et al., 1986). B) intrusivos graníticos (Middlemost, 1994).

En el diagrama AFM (Figura 21A) utilizando el FeO^T* para todas las muestras, se observa que la gran mayoría de los diques caen en la serie toleítica, dentro del rango de basaltos y ferro basaltos. Únicamente la muestra P-50 presenta una firma calco alcalina. Las muestras

de granito y granodiorita caen en la serie calco alcalina. En el diagrama ANK (Figura 21C) se observa que todas las muestras de basalto son metaluminosas, las muestras de granodiorita tienen una disparidad notable, ya que una muestra se clasifica como metaluminosa y la otra como peraluminosa. Las muestras de granito son todas peraluminosas. La Figura 21B muestra la clasificación de los granitoides basada en los feldespatos normativos. Las muestras de granito y granodiorita caen en sus campos correspondientes. Por otro lado, el diagrama de sílice vs álcalis (Figura 21D) indica que las muestras de granito caen dentro de la serie shoshonítica, mientras que las granodioritas se ubican en la serie calco alcalina de alto K.

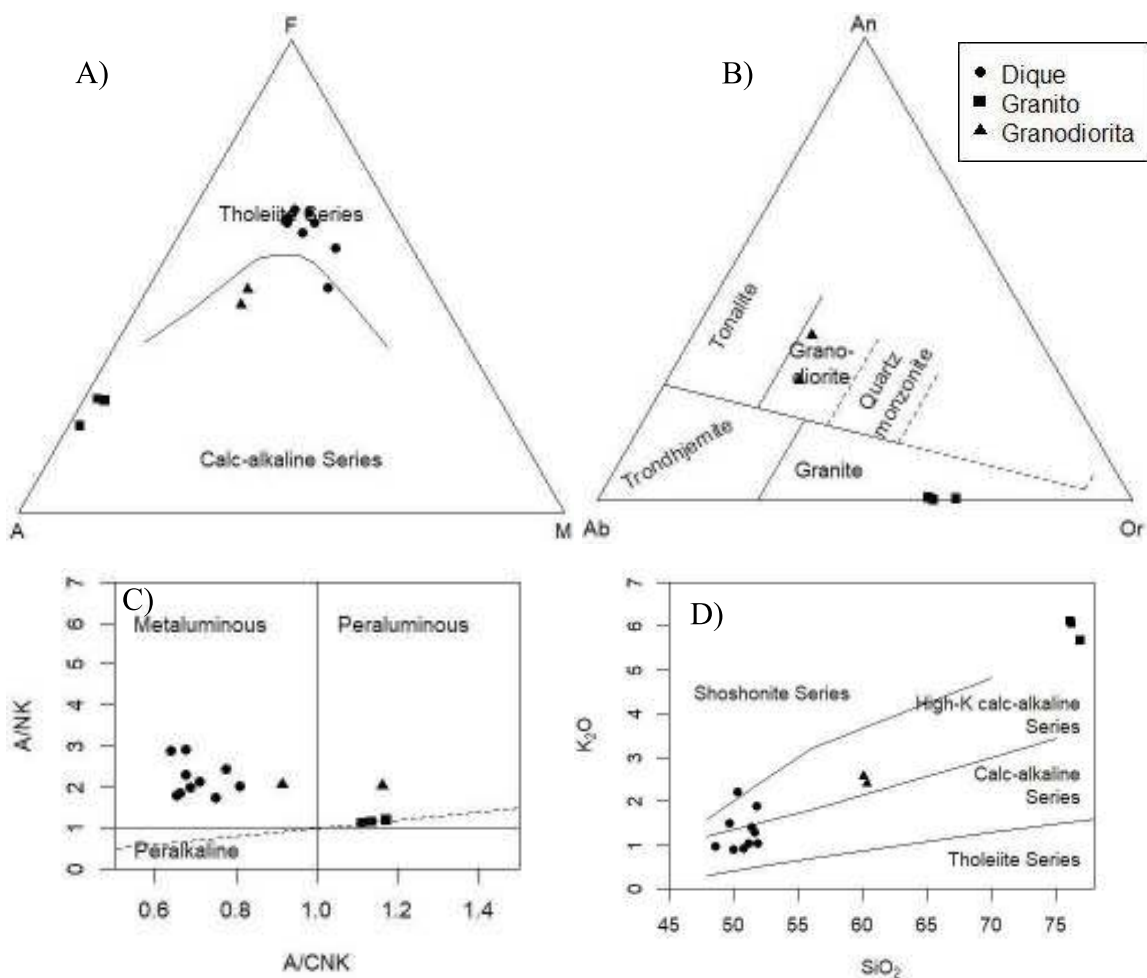


Figura 21. A) Diagrama AFM para series subalcalinas (Irvine & Baragar, 1971). B) Diagrama de clasificación de granitoides basado en la norma CIPW (O'Connor, 1965). C) diagrama AKN para saturación de alúmina (Shand, 1943). D) diagrama de álcalis vs sílice para granitoides (Peccerillo & Taylor, 1976).

Utilizando los datos de elementos mayores de los diques, se construyó una matriz de correlación de Spearman para identificar el óxido que controla la variabilidad y posiblemente indique las fases minerales dominantes en su evolución. La **Tabla 5** indica una fuerte correlación negativa entre los óxidos MgO y Ti₂O-MnO-Na₂O y una correlación negativa moderada entre MgO y Fe₂O₃^T-P₂O₅. El SiO₂ tiene poca correlación con los demás óxidos a excepción de una leve correlación negativa con el CaO y negativa con el P₂O₅.

Tabla 5. Correlación de Spearman para elementos mayores de los diques máficos.

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | MnO | P ₂ O ₅ |
|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|-------------------|------------------|------------------|-------|-------------------------------|
| SiO ₂ | 1.000 | | | | | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | 0.164 | 1.000 | | | | | | | | |
| Fe ₂ O ₃ | -0.218 | -0.709 | 1.000 | | | | | | | |
| CaO | -0.627 | 0.391 | -0.264 | 1.000 | | | | | | |
| MgO | -0.118 | 0.309 | -0.536 | 0.364 | 1.000 | | | | | |
| Na ₂ O | 0.018 | -0.282 | 0.500 | -0.127 | -0.764 | 1.000 | | | | |
| K ₂ O | 0.364 | 0.336 | -0.173 | -0.355 | 0.018 | -0.355 | 1.000 | | | |
| TiO ₂ | 0.009 | -0.382 | 0.527 | -0.291 | -0.836 | 0.745 | -0.382 | 1.000 | | |
| MnO | 0.118 | 0.082 | 0.245 | -0.118 | -0.800 | 0.800 | -0.264 | 0.827 | 1.000 | |
| P ₂ O ₅ | 0.500 | -0.345 | 0.136 | -0.764 | -0.636 | 0.345 | 0.073 | 0.673 | 0.491 | 1.000 |

Graficando los valores de los óxidos con una mayor correlación con el MgO (**Figura 22**) se observa la tendencia negativa del Fe₂O₃^T con el MgO, con una inflexión cerca del valor de MgO de 5%wt. Se observa como el Fe₂O₃^T aumenta conforme disminuye el MgO, para llegar a mostrar una inversión al final de la tendencia, en donde ambos valores empiezan a disminuir. La interpretación común de este comportamiento implica la cristalización fraccionada de olivino y después de piroxeno. La cristalización de olivino consume más Mg que Fe, produciendo un enriquecimiento de este último. No se identificó olivino en láminas delgadas ni en los análisis SEM, aunque si se obtuvo olivino normativo, es probable que el olivino fuera removido del magma por cristalización fraccionada. En cambio, hay bastante evidencia de la presencia de augita como piroxeno principal, y plagioclasa cálcica.

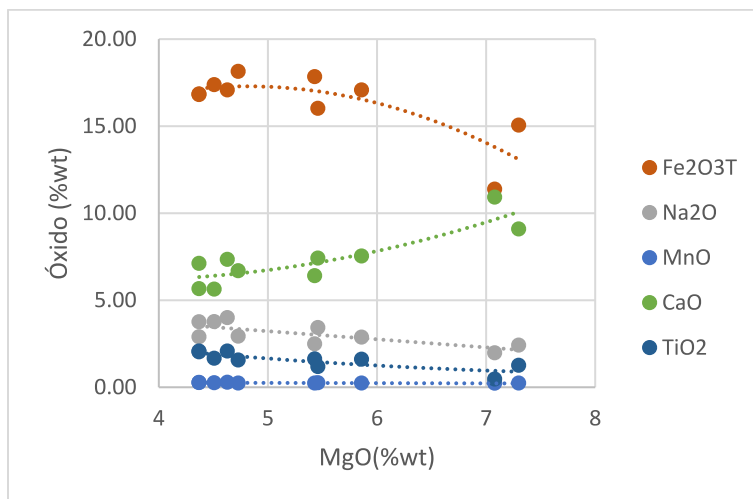


Figura 22. Diagrama de MgO vs óxidos mayores en %wt.

La inflexión al final de la tendencia de $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ muestra que una vez que el olivino dejó de cristalizar y fue fraccionado, el control de la tendencia se da por la cristalización de augitas. Los análisis SEM demuestran que las augitas identificadas presentan un ligero enriquecimiento en Fe en relación con el Mg, aunque su proporción es muy cercana al 50%, mientras el Ca se encuentra constante en 21-32%. Esto explica por qué la tendencia del Ca es negativa en la **Figura 22**, ya que se incorpora a las plagioclasas y a las augitas por igual. Como punto a mencionar, debe notarse que las tendencias de $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ y CaO están divididas en las altas concentraciones de MgO, mostrando dos tendencias que se juntan alrededor de MgO 4.5%wt. Esto podría indicar dos suites magmáticas diferentes, o bien, un comportamiento relacionado con fusión parcial.

6.2 ELEMENTOS TRAZA

En la **Tabla 6** se resumen los valores de elementos LILE y HFSE de las muestras analizadas. Los diques presentan valores de LILE muy dispares, aunque elevados. La muestra P-50 es la más enriquecida en casi todos los elementos LILE con respecto a las demás, con excepción del Ba, donde la muestra P-52 tiene un valor más elevado. Con respecto a los reservorios de basaltos de [Sun & McDonough \(1989\)](#), los valores altos de K, Rb, Ba, Th y U son similares

a los valores típicos de basaltos de islas oceánicas (OIB) y del manto enriquecido (E-MORB), los valores de Sr se asemejan más al E-MORB, mientras que los valores de Cs se encuentran enriquecidos. Los HFSE dividen a las muestras en cuatro grupos: el grupo I está representado por las muestras P-60, P-60b y P-52, enriquecidas en estos elementos con respecto a las demás muestras, con valores de Ti=12000 ppm, Nb=7.8-8 ppm y Ta=0.4 ppm. El grupo II está conformado por las muestras P-47, P-53, P-54 y P-61, con valores de HFSE ligeramente menores, en este caso Hf=3.3-3.7 ppm y Ti=9500-9900 ppm. Los grupos I y II tienen concentraciones mezcladas de HFSE típicos de OIB y E-MORB (Sun & McDonough, 1989). El grupo III está representado por las muestras P-43 y P-55, con un empobrecimiento de HFSE con respecto a los primeros dos grupos. El Nb y el Ta se encuentran muy empobrecidos en todos los grupos con respecto a los otros HFSE, sin embargo, en este grupo el empobrecimiento es más notorio con valores de Nb=2-2.8 ppm, Ta=0.1 ppm, U=0.24 ppm y Th=0.74 ppm, típicos del reservorio del manto empobrecido (N-MORB).

Tabla 6. Valores de LILE y HFSE para las muestras del área El Teguachi.

| | Diques | | | | | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | I | | | II | | | | III | | IV |
| | P-60b | P-52 | P-60 | P-47 | P-53 | P-54 | P-61 | P-43 | P-55 | P-50 |
| K | 7637 | 15773 | 8634 | 7471 | 12369 | 10709 | 11622 | 8053 | 8634 | 18347 |
| Rb | 29.3 | 73.7 | 25 | 27.8 | 60.4 | 50 | 52.2 | 42.2 | 42.6 | 84.3 |
| Sr | 179 | 163.5 | 224 | 173.5 | 168 | 203 | 208 | 202 | 186.5 | 227 |
| Cs | 11.05 | 19 | 7.23 | 7.07 | 21.7 | 13.1 | 15 | 6.09 | 8.47 | 3.34 |
| Ba | 214 | 709 | 226 | 264 | 624 | 564 | 564 | 426 | 289 | 456 |
| Hf | 3.8 | 4.0 | 4.2 | 3.3 | 3.7 | 3.5 | 3.6 | 2.1 | 1.4 | 1.2 |
| Zr | 152 | 145 | 145 | 109 | 124 | 122 | 128 | 63 | 49 | 32 |
| Ti | 12410 | 12110 | 12410 | 9592 | 9292 | 9712 | 9952 | 7494 | 7074 | 2758 |
| Nb | 7.8 | 7.7 | 8 | 4 | 5 | 5 | 4.9 | 2.8 | 1.8 | 2 |
| Ta | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Th | 4.13 | 4.13 | 4.5 | 2.06 | 2.92 | 2.78 | 3.2 | 0.7 | 0.77 | 0.67 |
| U | 1.30 | 1.12 | 1.32 | 0.63 | 0.87 | 0.85 | 0.91 | 0.22 | 0.26 | 0.28 |
| Hf/Zr | 0.025 | 0.028 | 0.029 | 0.03 | 0.03 | 0.029 | 0.028 | 0.033 | 0.029 | 0.038 |
| Nb/Ta | 15.600 | 19.25 | 20 | 20 | 16.667 | 16.667 | 16.3 | 28 | 18 | 20 |
| Rb/Sr | 0.164 | 0.451 | 0.112 | 0.160 | 0.360 | 0.246 | 0.251 | 0.209 | 0.228 | 0.371 |
| U/Th | 0.315 | 0.271 | 0.293 | 0.306 | 0.298 | 0.306 | 0.284 | 0.314 | 0.338 | 0.418 |

La muestra P-50 representa al Grupo IV y se encuentra fuertemente empobrecida en HFSE con respecto a los otros grupos, en este caso Nb=2 ppm y Ta=0.1 ppm, los valores de U y Th se mantienen con respecto al grupo III. Los grupos III y IV poseen valores típicos de N-MORB.

El granito Santa Margarita tienen valores altos de Rb, Ba, K, Zr, Hf, Nb, Ta, Th y U en relación con los diques y la granodiorita, aunque presentan valores de Sr, Cs y Ti menores. Estas características junto con el bajo contenido de CaO y MgO, la gran abundancia de álcalis y la presencia de Fe⁺² en gran parte de los minerales analizados por SEM demuestran que el granito Santa Margarita cumple parte de los criterios químicos descritos por Eby (1990) para considerarse como granito “anorogénico” o “tipo A”. La granodiorita el Jacalón presenta valores muy similares de LILE y HFSE con respecto a los diques, aunque son notablemente superiores, en particular el Rb, SR, Ba y Nb, llama la atención la deficiencia de LILE en la granodiorita.

Tabla 6. Valores de LILE y HFSE para las muestras del área El Teguachi. Continuación.

| | Granito Santa Margarita | | | Granodiorita El Jacalón | |
|-------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|-------|
| | P-62 | P-29 | P-30 | P-27 | P-27b |
| K | 47153 | 50723 | 50225 | 19894 | 21295 |
| Rb | 211 | 258 | 229 | 80.6 | 102.5 |
| Sr | 15.5 | 12.3 | 9.2 | 292 | 305 |
| Cs | 3.71 | 2.45 | 6.13 | 5.32 | 11.05 |
| Ba | 634 | 658 | 579 | 915 | 748 |
| Hf | 14.1 | 12.1 | 13.7 | 2.7 | 3.2 |
| Zr | 461 | 479 | 445 | 108 | 128 |
| Ti | 1619 | 1379 | 1559 | 3700 | 5536 |
| Nb | 33.8 | 28.5 | 32.0 | 8.8 | 9.6 |
| Ta | 2.2 | 1.9 | 2.2 | 0.5 | 0.6 |
| Th | 31.60 | 24.30 | 28.80 | 3.18 | 3.90 |
| U | 7.02 | 6.03 | 6.52 | 1.06 | 1.56 |
| Hf/Zr | 0.031 | 0.025 | 0.031 | 0.025 | 0.025 |
| Nb/Ta | 15.364 | 15 | 14.545 | 17.6 | 16 |
| Rb/Sr | 13.613 | 20.976 | 24.891 | 0.276 | 0.336 |
| U/Th | 0.222 | 0.248 | 0.226 | 0.33 | 0.4 |

El enriquecimiento de algunos LILE y HFSE particularmente litófilos como K, Ba, TH y U, junto con el empobrecimiento de Nb y Ta con respecto a los demás HFSE sugieren que las rocas del área El Teguachi presentan cierto grado de asimilación de corteza continental. En el caso de las relaciones de elementos inmóviles, todas las rocas presentan una relación Hf/Zr muy similar de 0.025-0.038. La relación Nb/Ta es mayor en los diques y en la granodiorita, el granito tiene los valores más bajos, aunque equiparables al grupo I de diques. La relación Rb/Sr es mucho mayor en el granito, y en las otras muestras se encuentra bastante baja. La relación U/Th es ligeramente mayor en los diques y la granodiorita que en el granito, aunque los valores no se encuentran dispersados.

La **Figura 23** muestra los valores de REE normalizados a condrita (Boynton, 1984). Los diques máficos guardan una correlación en su concentración de REE normalizada y el contenido de HFSE, donde se vuelven a dividir en cuatro grupos con anomalías negativas de Eu más bien discretas. El Grupo I se encuentra enriquecido en LREE con respecto a las HREE, en general se observa un patrón con una pendiente poco pronunciada y valores $Eu/Eu^*=0.85-0.9$, $Ce/Ce^*=0.95-1.07$ y $(La/Lu)_N=2.7-3.3$. el valor mayor a 1 de Ce/Ce^* podría indicar que parte del Ce fue fraccionado en condiciones oxidantes, donde el Ce^{+3} pasaría a Ce^{+4} , aunque este efecto es demasiado leve. El grupo II se caracteriza por un enriquecimiento ligeramente menor de LREE sobre los HREE, que llegan a coincidir con el grupo I, el patrón se observa ligeramente más plano, con valores de $Eu/Eu^*=0.82-0.85$, $Ce/Ce^*=0.94-0.96$ y $(La/Lu)_N=2.1-2.7$.

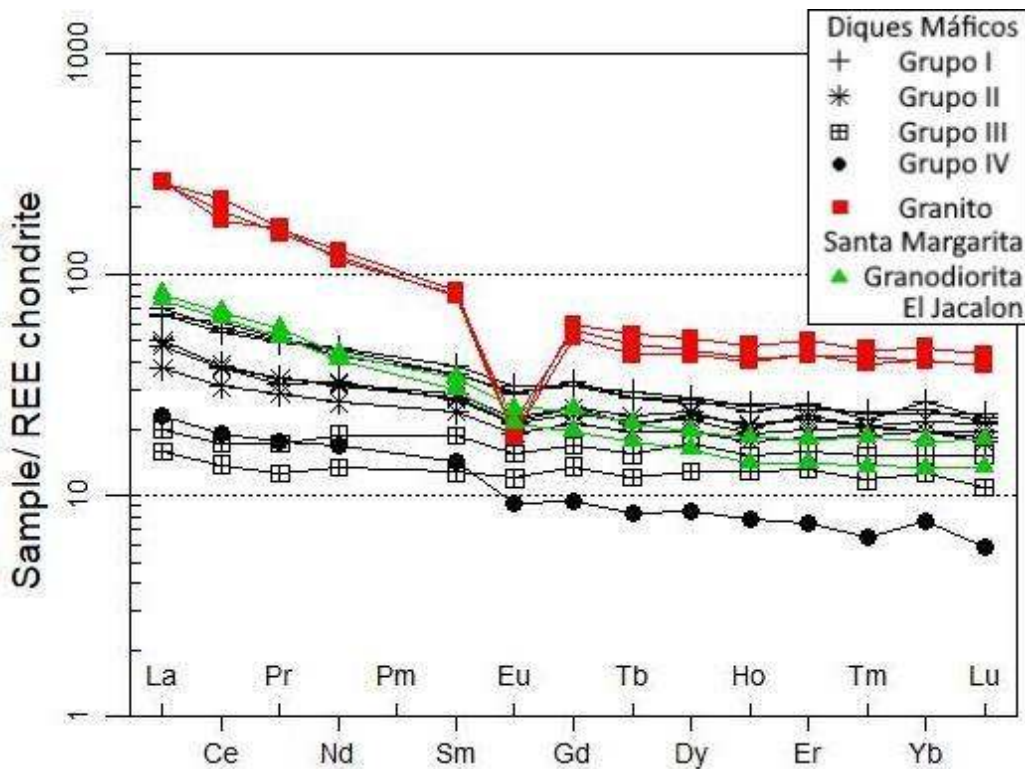


Figura 23. Patrones de REE de las rocas del área El Teguachi normalizados a condrita (Boynton, 1984).

El grupo III se caracteriza por un patrón más bien plano, con un enriquecimiento de LREE con respecto a los HREE mucho más discreto, con valores de $Eu/Eu^*=0.87-0.91$, $Ce/Ce^*=0.93-0.97$ y $(La/Lu)_N=1.3-1.5$. El grupo IV está definido por la muestra P-50, con valores de LREE normalizados muy similares al grupo III, pero que a partir del Eu se observa un patrón quebrado en donde las HREE se encuentran muy empobrecidas en relación con los demás grupos, que presentan valores de HREE muy similares. El grupo IV se caracteriza por $Eu/Eu^*=0.78$, $Ce/Ce^*=0.95$ y $(La/Lu)_N=3.9$. Los patrones levemente enriquecidos de LREE con anomalías de Eu tan discretas sugieren que los basaltos no evolucionaron mucho del magma parental donde la extracción de Eu por la cristalización fraccionada de la plagioclasa no fue significativa. Los patrones planos de HREE sugieren un empobrecimiento progresivo del reservorio fuente debido probablemente a un alto grado de fusión parcial y diferenciación hasta empobrecerlo en HREE, como se observa en el grupo IV.

El granito Santa Margarita muestra un enriquecimiento de LREE sobre las HREE, en particular de La y Ce, con una anomalía de Eu muy prominente, la tendencia de las HREE se mantiene constante, muy superior al valor de los diques. El granito presenta valores de $Eu/Eu^*=0.27-0.32$, $Ce/Ce^*=0.86-1.064$ y $(La/Lu)_N=6.1-6.6$. Este patrón es típico de magmas más evolucionados, donde el fraccionamiento de Eu está controlado por la cristalización fraccionada de plagioclasa. La granodiorita El Jacalón presenta un patrón de LREE enriquecido con respecto a las HREE similar a los grupos II y III de diques, con una anomalía negativa de Eu muy leve. La tendencia de HREE en la granodiorita se equipara a los grupos II y III de los diques, con valores de $Eu/Eu^*=0.85$, $Ce/Ce^*=0.99-1$ y $(La/Lu)_N=4.5-5.7$, que lo diferencia de los diques máficos. El patrón de la granodiorita sugiere poca evolución con respecto al magma parental, indicando quizás poca interacción con corteza continental o interacción con corteza oceánica. El patrón se asemeja mucho a las suites de Tonalita-Trondhjemita-Granodiorita (TTG) del Paleoproterozoico, aunque el patrón de HREE es demasiado elevado y la roca no tiene concentraciones de elementos inmóviles característicos como Ba y Sr ([Pourteau et al., 2020](#)).

La normalización al manto primitivo ([Figura 24](#)) revela que los diques presentan las firmas más empobrecidas, el granito posee la firma más enriquecida y la granodiorita se encuentra más cercana a la firma de los grupos I y II de diques. Todas las muestras en general tienen una firma muy similar al reservorio OIB y E-MORB ([Sun & McDonough, 1989](#)) y presentan un enriquecimiento muy fuerte de Cs, principalmente los diques de los grupos I y II.

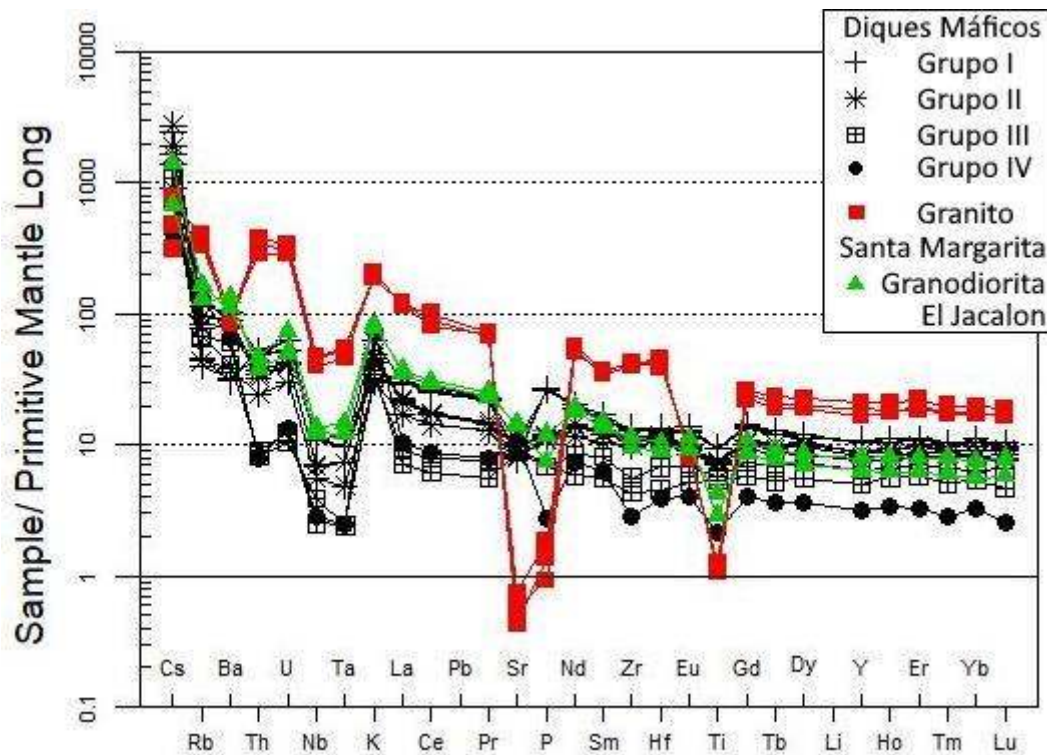


Figura 24. Patrones de LILE, HFSE y REE del área El Teguachi normalizados al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).

En todas las muestras se observan anomalías positivas de K y U más bien discretas y anomalías negativas de Nb, Ta y Ti que varían en intensidad según la litología y el grupo: El grupo I de diques presenta una anomalía positiva en P, los grupos II y III tienen valores similares a la granodiorita, el grupo IV presenta una anomalía negativa de P y anomalías negativas de Zr y Ti más prominentes que los demás grupos de diques, y un empobrecimiento de los elementos más inmóviles. Las anomalías positivas moderadas de U y anomalías positivas de K, las anomalías negativas de Nb y Ta que difieren en intensidad según el grupo, indican un componente de asimilación cortical (Saunders et al., 1992). Todos los diques presentan una concentración de Sr cercana a la de E-MORB que rompe la tendencia de la firma, esto junto con los valores de Ba podría indicar una misma profundidad de origen del magma fuente o bien, este valor está controlado por el tipo de corteza asimilada (Saunders et al., 1992), también podría tratarse de contaminación de las muestras. El granito presenta anomalías negativas moderadas de Ba, Nb, Ta y muy fuertes de Sr, P y Ti. Las anomalías de

Ba y Sr indican que el magma que dio origen al granito se originó en presiones bajas (Saunders et al., 1992). Por otro lado, la granodiorita presenta un patrón similar al de los grupos I y II, con anomalías negativas de Ti ligeramente más pronunciadas y valores de P y Sr similares. La tendencia de todas las firmas y las anomalías negativas de Nb, Ta y Ti son típicas de ambientes de arco volcánico o asimilación cortical, mientras que las anomalías positivas de K y U denotan asimilación cortical.

7 DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN Y CONTEXTO TECTÓNICO

Debido a que no fue posible fechar los diques máficos del área El Teguachi, se considerara la edad del granito Santa Margarita ($1,104 \pm 21$ Ma; Anderson & Silver, 2005) como la edad mínima de intrusión. Lamentablemente no existen estudios geoquímicos de elementos traza en granodioritas de 1,700 Ma en Sonora. En Arizona existen más estudios, en particular estructurales e isotópicos de rocas similares (Siwec, 2003; Prante, 2009; Duebendorfer, 2015; Anderson et al., 1993; Bender et al., 1993). Los estudios geoquímicos sobre rocas ígneas con edades de 1,200-1,060 Ma son abundantes en la literatura. La Figura 25 muestra las localidades más características y estudiadas del magmatismo de aproximadamente 1,100 Ma en el margen sur de Laurencia. Aquí se incluyen localidades del margen SW de y el margen E de Laurencia ya que se argumenta que todas las localidades están relacionadas en un mismo contexto tectónico tanto espacial como temporalmente (Li et al., 2008; Whitmeyer & Karlstrom, 2007; Bright et al., 2014), por lo que comparten un origen y ambiente tectónico en común a escala global.

7.1 MAGMATISMO FÉLSICO DE 1,100 Ma.

La suite granítica *Red Bluff* (RBGS, 1,120 Ma) de las montañas Franklin en el oeste de Texas, está emplazada en una secuencia arrecifal proterozoica. La suite se conforma de cinco etapas de cristalización y presenta una variación composicional de cuarzo sienitas a leucogranitos con un alto índice de Fe, de carácter metaluminosos a peralcalinos acompañados por diques

de ferrobasaltos con afinidad química de trasarco en un arco de islas. [Shannon et al. \(1997\)](#) indica que no hay evidencia química para un origen relacionado a subducción. La suite *Two Mountain* (TMG, 1,119-1,070 Ma) de Texas central, se compone de granitos calco alcalinos con carácter metaluminoso a peralcalino, un menor contenido de Fe y características químicas de granitos tipo A, sin diques máficos contemporáneos. La suite *Enchanted Rock* (ERG, 1,080 Ma) de Texas central, característica de “El Llano Uplift” presenta una variación composicional de granodiorita, cuarzo monzonita y leucogranitos con características químicas de granitos tipo A y fraccionados, un carácter metaluminoso a peraluminoso y la notable ausencia de diques máficos contemporáneos. [Smith et al., \(1997; 2010\)](#) interpretan un ambiente post-orogénico a extensional para las rocas de Texas central ligado a la orogenia *Greenville*. Las suites graníticas *Hermon* (HG, 1,180 Ma), *Hyde School* (HSG, 1,170 Ma) y *RockPort* (RPG, 1,170 Ma), son tres suites que intrusionan a los terrenos “Adirondack Lowlands” (Nueva York, USA) y el terreno “Frontenac” (Ontario, Canada). Las suites plutónicas presentan grados de metamorfismo variados que no borraron sus características químicas. Las tres suites tienen una gran variación en SiO₂, altas concentraciones de Fe, un carácter metaluminoso a peraluminoso y un enriquecimiento de REE. [Peck et al. \(2013\)](#) indican que las suites presentan firmas químicas de ambientes sincolisionales, post-orogénicos y de arco en un contexto tectónico de subducción, engrosamiento cortical y eventual colapso orogénico. El granito *Pikes Peak* (PPB, 1,066 Ma) de Colorado, E.U.A. es considerado “el ejemplo” de granitos de tipo A. Consiste en sienogranitos y monzogranitos separados en las series “potásica y “sódica”. La suite PPB tiene altos valores de Fe y K₂O, un enriquecimiento en elementos traza y presencia de diques máficos asociados a la serie “sódica” con valores de #mg=24-43, y firmas de elementos trazas de afinidad OIB con anomalías de Nb y Ta que indican procesos relacionados a subducción ([Smith et al., 1999](#)). [Gutrieau et al. \(2016\)](#) indica que la suite PPB se formó en un ambiente anorogénico debido al ascenso de fluidos derivados del manto astenosférico (superficial) y asimilación de corteza continental que fue perdiendo relevancia en la génesis de los granitos con el tiempo.



Figura 25. Localidades representativas del magmatismo de 1,100 Ma en el margen Sur de Laurentia. CS: Crystal Spring, BC: Basaltos Cárdenas, PPB: granito Pikes Peak, BG: Granito Bustamante, AG: Granito Aibo, ET: Área El Teguachi, RBGS: suite Red Bluff Granite, CP: Complejo Pecos, ERG, granito Enchanted Rock, TMG; granito Two Mountains, NL: Lago Nipigon, ML: Mineral Lake, EZ: Terreno Elzevir, AT: Terreno Adirondack. Referencias en el texto. Se incluyen los rasgos más representativos a nivel continental y regional como el frente Greenville, el Midcontinental Rift (tomados de [Whitmeyer & Karlstrom, 2007](#)) y la Mega Cizalla Mojave-Sonora (MCMS, Tomado de [Anderson & Silver, 2005](#)).

7.2 MAGMATISMO MÁFICO DE 1,100 Ma.

La literatura en general indica que el magmatismo máfico de $\approx 1,100$ Ma se encuentra bastante extendido desde California hasta Ontario, Canadá, y está ligado hasta cierto punto con magmatismo félsico contemporáneo, aunque no siempre y no necesariamente con granitos anorogénicos. En el margen SW de Laurentia los denominados Basaltos Cárdenas ([Larson](#)

et al., 1995) son una secuencia volcánica que aflora en el norte de Arizona, fechada en 1,106 Ma. La secuencia tiene 300 m de espesor, y atraviesa rocas sedimentarias proterozoicas del Gran Cañón, su composición va desde basaltos de olivino en la parte inferior hasta basaltos cuarzo-toleííticos y andesitas toleííticas en la parte superior, con un #mg=58. La secuencia se deriva de una fuente mantélica ligeramente enriquecida con diferentes grados de fusión parcial y contaminación cortical en un ambiente de extensión generalizado. Otra serie de diques máficos similares en edad y composición a los Basaltos Cárdenas son los diques de la Formación Crystal Spring, dentro del Grupo Pharump en el Valle de la Muerte, California, fechados en 1,076-1,069 Ma (Heaman & Grotzinger, 1992). Hammond (1986) realizó un estudio geoquímico sobre más de 40 diques, clasificándolos como basaltos de olivino y cuarzo-toleííticos con #mg=51 y un carácter transicional (alcalino-toleíítico). El magma que dio lugar a los diques se deriva de una peridotita con granate y refleja también un ambiente de extensión. En Texas, Barnes et al. (1999a y 1999b) estudiaron el complejo Pecos (1,165-1,120 Ma) y la suite de diques máficos de las Montañas Franklin asociados a la suite granítica RBGS (1,120 Ma). Las rocas varían composicionalmente de ferrobasaltos a noritas con #mg=38, un carácter transicional alcalino-toleíítico y anomalías negativas de Nb que sugieren un componente de corteza subducido que modificó la fuente mantélica, entrando en contradicción con la interpretación de Shannon et al. (1997) de que no hay componentes de subducción. Los autores hacen notar la afinidad química de los diques con un ambiente de trascarco en un arco de islas, sin embargo, de todos los posibles contextos tectónicos, se prefiere un ambiente extensional. En el margen NE de Laurencia, Seifert et al., (1992) estudiaron intrusiones bimodales interestratificadas en “Mineral Lake”, Wisconsin, E.U.A., en la región sur de la región conocida como Lago Superior. La secuencia es típica de magmatismo bimodal asociado al *Midcontinental Rift*, las intrusiones máficas van de leucogabro de olivino a anortosita gabroica, con #mg=49 y un carácter principalmente toleíítico, mientras que la serie riolítica es posterior a las intrusiones máficas y se formaron por cristalización fraccionada. Según los autores, los magmas se derivaron de una fuente mantélica empobrecida con un componente cortical. Nicholson et al. (1992) estudiaron más de 100 muestras recolectadas por el Servicio Geológico Estadounidense (USGS, siglas en inglés) de basaltos relacionados al *Midcontinental Rift* (MCR) en la porción oeste de la región

de Lago Superior, con un rango de edad de 1,108-1,087 Ma. En este caso se trata de cinco grupos de basaltos continentales con $\#mg=39-63$ y características químicas variadas. Los basaltos más antiguos se derivan de una fuente mantélica enriquecida tipo OIB por medio de pequeños grados de fusión parcial a grandes profundidades, mientras que los basaltos más jóvenes registran asimilación de un componente continental que disminuyó con el tiempo. Hacia el final del magmatismo la fuente de los basaltos presenta una mezcla entre una pluma mantélica y una fuente de manto astenosférico empobrecido. [Hollings et al. \(2010\)](#) estudiaron la parte norte de la región de Lago Superior en Ontario, Canadá, presentando una extensiva base de datos de 96 muestras de sills y diques máficos de 6 localidades, con edades de 1,141-1,078 Ma. Los diques y sills presentan un carácter predominantemente toleítico, con $\#mg=30-80$. La interpretación general es que los diques y sills derivan de una pluma mantélica con diferentes grados de contaminación cortical a poca profundidad. Por último, [Smith & Holm \(1990\)](#) recolectaron más de 250 muestras de diques y sills máficos emplazados en el terreno Elzevir dentro del supergrupo *Greenville*, con una edad mínima de emplazamiento de 1,100 Ma. De esas muestras, 43 fueron analizadas por elementos traza. Se identificaron siete suites, de las cuales cuatro son toleíticas, una calcoalcalina, una transicional y una ultra-potásica. La composición de las suites varía enormemente de basaltos a riolitas con $\#mg=30-80$. Las suites se emplazaron en rocas supracorticales depositadas en un ambiente de trascarco durante la orogenia *Greenville*.

7.3 CAZADORES DE GRANITOS

El granito Santa Margarita presenta una cierta afinidad química con los granitos anorogénicos o de tipo A, definidos por [Chappell & White \(1974\)](#) en el SE de Australia. Este tipo particular de granitos tienen un alto contenido en álcalis y bajo contenido de Ca y Al, relaciones FeOT/MgO altas, enriquecimiento en REE (menos Eu), y ciertos HFSE como Zr, Nb, Ta, y empobrecimiento en ciertos LILE como Ba y Sr. Estos granitos ocurren en contextos tectónicos muy variados que van desde ambientes de arcos volcánicos hasta ambientes intraplaca y su génesis se explica por diferentes procesos de diferenciación y evolución magmática. Es muy común encontrar en la literatura que los granitos tipo A generalmente se

encuentren acompañados por diques máficos contemporáneos que suelen estar en relación de corte con los granitos y tienen mucha relevancia en la interpretación petrogenética, aunque es poco común que se publiquen datos geoquímicos de los diques.

En Sonora, El granito Aibo, fechado en 1,092 Ma por [Anderson & Silver \(2005\)](#), y en 1,085 por [Farmer et al. \(2005\)](#), es el granito proterozoico más conocido de Sonora y los granitos de otras localidades de Sonora son referidos coloquialmente como “los granitos Aibo” ya que comparten edades similares y muchas características de campo, en particular un color de roca fresca que se caracteriza por un rosado rojizo a blanco y la textura gráfica. En cuestión de diques máficos contemporáneos, el granito Aibo no se encuentra acompañada por diques ([Farmer et al., 2005](#)), aunque [Anderson & Silver \(2005\)](#) mencionan la presencia de diques de piroxenita y un cuerpo diorítico de edad Cretácica. En Quitovac se reporta la presencia de diques máficos de edad tentativamente *greenvilleana* que acompañan al granito Bustamante, de 1,112 Ma. ([Iriondo et al. 2004](#)) y al granito Murrieta de 1,100 Ma ([Enriquez-Castillo et al., 2009](#)). En el caso del granito Escuadra de 1,076 Ma ([Amato et al., 2009](#)) la presencia de diques contemporáneos no está esclarecida.

Para clasificar los granitos Santa Margarita, Aibo y Bustamante, se utilizaron los diagramas de discriminación para granitos de [Pearce et al. \(1984\)](#) y [Whalen et al. \(1987\)](#) basados en elementos trazas ([Figura 26 y 27](#), respectivamente), y los diagramas de [Frost & Frost \(2008\)](#), [Grevenikov \(2014\)](#), basados en elementos mayores. Se agregaron los datos geoquímicos disponibles de las suites mencionadas anteriormente como comparación. En todos los diagramas sin excepción el granito Santa Margarita se clasifica como granito tipo A junto con el granito Aibo, con el cual comparte muchas características químicas. El granito Bustamante presenta inconsistencias en la mayoría de los diagramas, aunque en general este granito se clasifica como tipo I o S, ligado a un ambiente de arco de islas ([Grevenikov, 2014](#)). En este caso debe considerarse la observación de [Iriondo et al. \(2004\)](#) de que el granito Bustamante tiene perturbaciones geoquímicas e isotópicas.

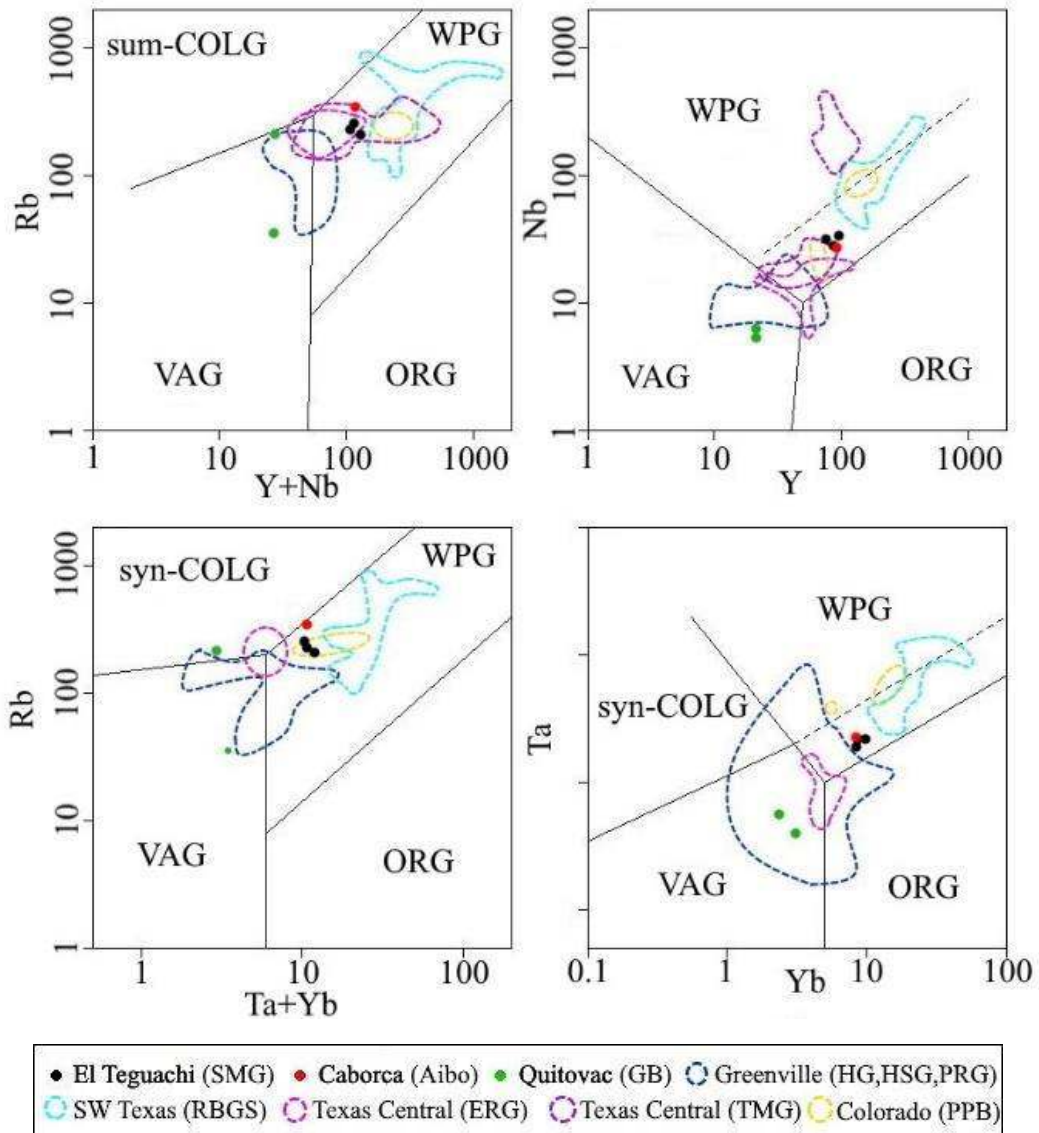


Figura 26. Diagrama de discriminación de ambiente para granitoides de Pearce et al. (1984).

Amato et al. (2009) correlacionaron al granito Escuadra con el granito Bustamante en base a firmas isotópicas similares, sin embargo, no se tiene datos geoquímicos adicionales de este granito y debe mencionarse que el granito Escuadra es ligeramente más joven, con una edad reportada de 1076 Ma, igual el granito Aibo.

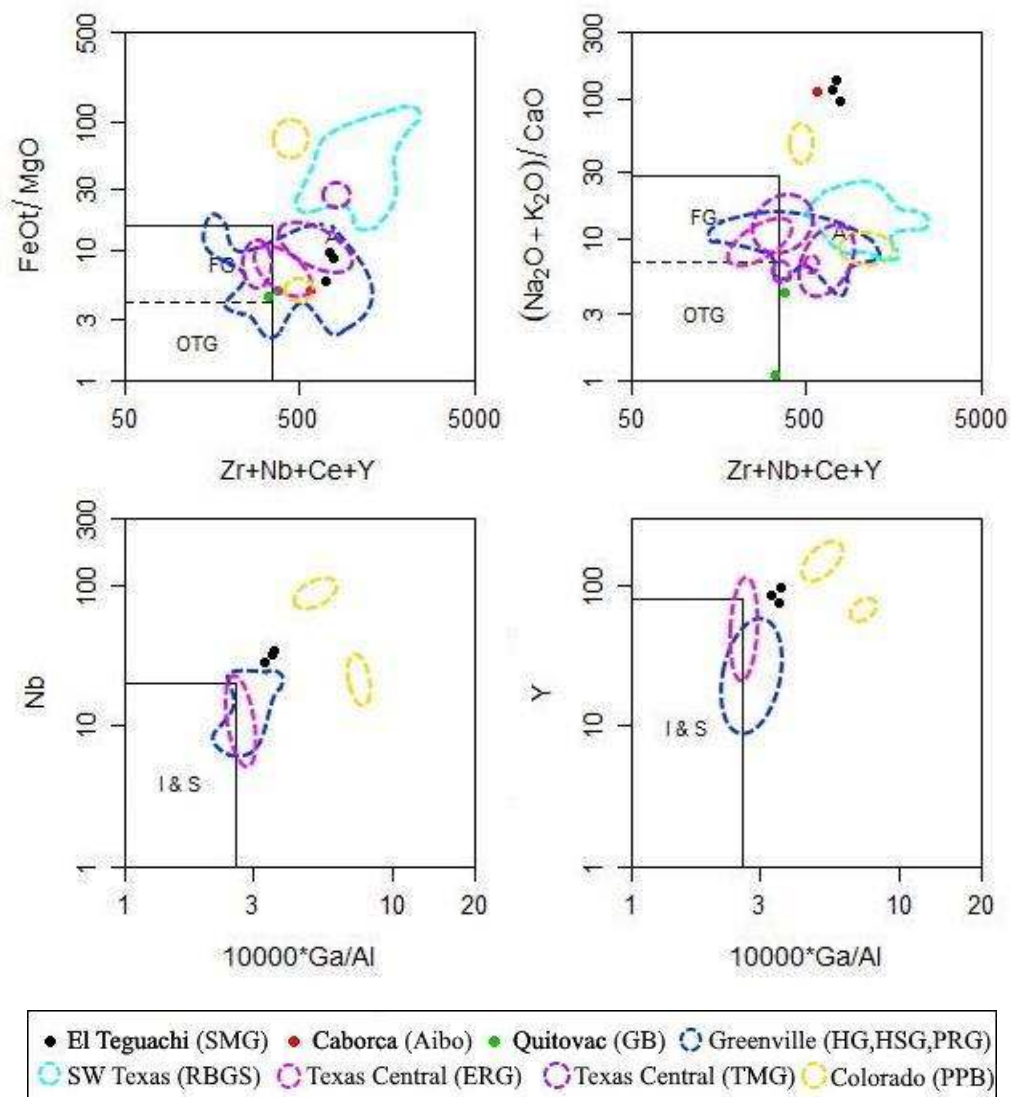


Figura 27. Diagrama de diferenciación de granitoides de Whalen et al. (1987).

Aunque el granito Santa Margarita y el granito Aibo tienen muchas características químicas similares como que ambos son peraluminosos y presentan concentraciones similares de elementos traza (Zr, Nb, Ta, Ce, Y y Yb), no son idénticos. Los diagramas normalizados a condrita (Figura 28A) y manto primitivo (Figura 28B) sugieren que los granitos Aibo y Santa Margarita se formaron por un proceso magmático similar y asimilaron el mismo tipo de corteza, aunque no sean contemporáneos. Se observa un enriquecimiento sutil de LREE y algunos LILE en el granito Aibo relativo al granito Santa Margarita, que tiene en general mayor concentración de HFSE y Ba. El granito Bustamante tiene patrones normalizados en

general muy diferentes a los otros granitos, con valores de REE, LILE y HFSE más bajos y anomalías positivas de Eu.

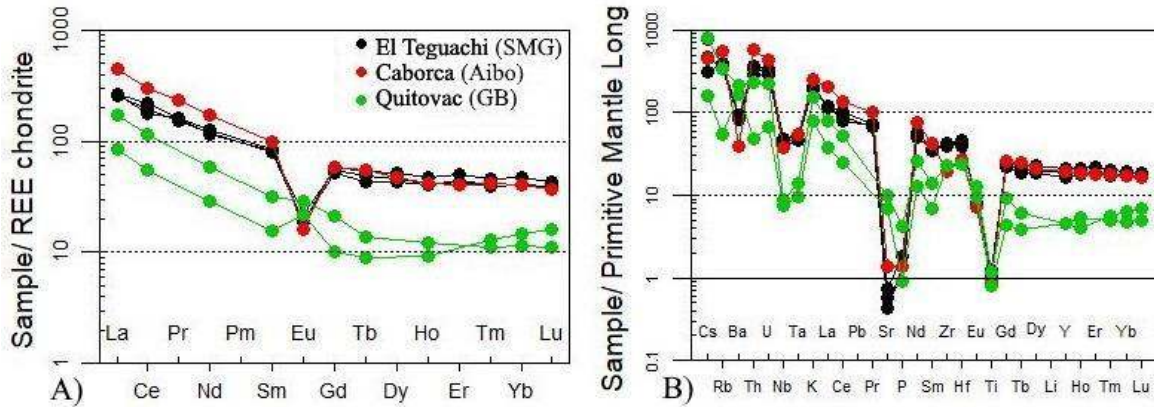


Figura 28. Patrones de los granitos Santa Margarita, Aibo y Bustamante normalizados a condrita (A) y manto primitivo (B).

La diferencia en Fe de los granitos Santa Margarita y Aibo se ve reflejada en los diagramas de Frost & Frost (2008) (Figura 17) y Grevenikov (2014) (Figura 18), que clasifican al granito Santa Margarita como “ferroan” y tipo A1, y al granito Aibo como “magnesiano” y tipo A2, respectivamente. En el resto del diagrama de Frost & Frost (2008), ambos granitos mantengan características químicas similares siendo clasificados como granitos alcalino-cálcicos con el granito Santa Margarita tendiendo hacia el carácter cálcico-alcalino (Figura 29). Ambos granitos son peraluminosos, lo cual sugiere una gran asimilación de corteza. El granito Bustamante presenta nuevamente inconsistencias en el diagrama de Frost & Frost (2008), con un índice de Fe de “ferroan” y “magnesiano”, un índice MALI alcalino-cálcico y cálcico y carácter metaluminoso-peraluminoso. En el diagrama de Grevenikov (2014), el granito Bustamante cae fuera del campo de granitos tipo A y se clasifica como granito de arco volcánico tipo I & S debido a su enriquecimiento en CaO y MgO (Figura 30).

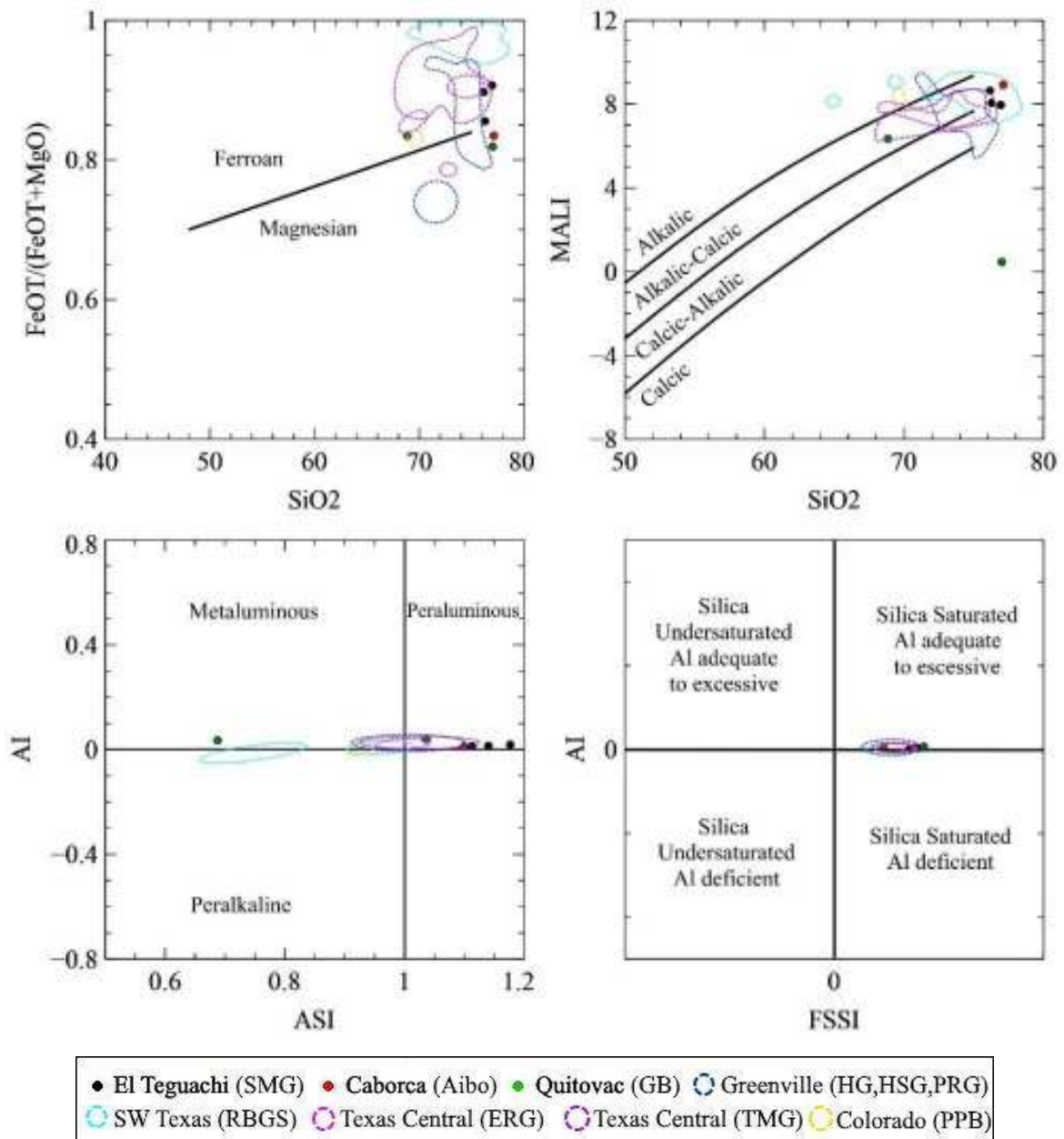


Figura 29. Diagramas de discriminación de Frost & Frost (2008) para granitoides.

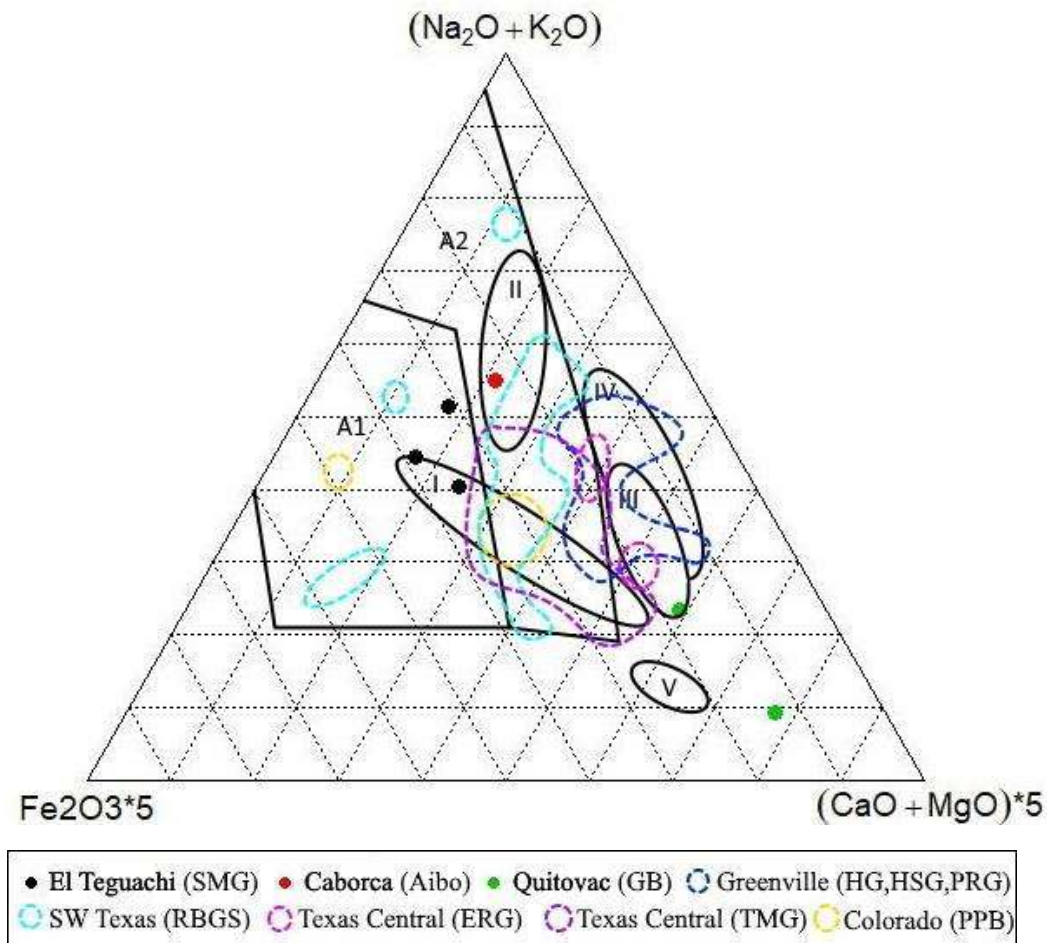


Figura 30. Diagrama de clasificación de Grevenikov (2014). Los campos están basados en datos isotópicos de granitos en ambientes conocidos: Zona I: Islas Oceánicas, Zona II: Rifts intracontinentales y Hotspots, Zona III: Magmatismo de arco de islas, Zona IV: Magmatismo de arco continental, Zona V: Magmatismo de Trascaro.

La comparación de las tendencias de las suites en el SW de Laurencia sugiere que los granitos tipo A de Sonora tienen afinidad química con las suites de Texas central (TMG, ERG) y *Greenville*, aunque las rocas sonorenses tienen un mayor contenido de álcalis. El granito Bustamante comparte muchas similitudes químicas con las suites de Texas y Colorado, aunque las inconsistencias en los diagramas hacen menos clara esta relación. Debe considerarse la ausencia de diques en las suites de Texas central y el granito Aibo, la presencia de diques y las edades similares de la suite RBGS, el granito Santa Margarita y el granito Bustamante, aunque no compartan muchas características químicas. Las suites de

Texas central y *Greenville* se caracterizan principalmente por incluir granitos de tipo A, I y S, de carácter metaluminoso y peraluminoso, con concentraciones similares de Fe, álcalis y CaO, la variabilidad en elementos traza de las rocas de *Greenville* refleja los procesos tectónicos variados asociadas a la formación de las suites. Las suites PPB y RBGS son de carácter principalmente metaluminoso-peralcalino con un enriquecimiento significativo de elementos traza y Fe. [Shannon et al. \(1997\)](#) argumentan que se debe a pérdida de álcalis por alteración.

7.4 LA GRANODIORITA EL JACALÓN

No existe mucha información geoquímica sobre intrusivos granodioríticos Paleoproterozoicos en Sonora. Iriondo y colaboradores se han dedicado a realizar análisis geoquímicos a rocas Proterozoicas muy variadas, desde rocas metamórficas a rocas ígneas, destacando los trabajos de [Iriondo et al. \(2004\)](#) e [Iriondo & Premo \(2011\)](#). El segundo trabajo representa la culminación de todo el trabajo realizado por estos investigadores y se hace una síntesis de las características químicas de las rocas Proterozoicas Sonorenses, separadas en el bloque “Caborca” y el bloque “Norteamérica”. La [Tabla 7](#) muestran las medias geométricas de los valores de estos dos bloques junto con los datos de la granodiorita El Jacalón (El Teguachi).

Tabla 7. Valores de la granodiorita El Jacalón junto con los datos de [Iriondo et al. \(2014\)](#).

| Localidad | K | Rb | Sr | Cs | Ba | Hf | Zr | Ti | Ta | Th | U | La | Yb |
|--------------|-------|--------|-------|------|---------|------|--------|------|------|-------|------|-------|------|
| El Teguachi | 20582 | 90.89 | 298.4 | 7.67 | 827.30 | 2.94 | 117.58 | 4526 | 0.55 | 3.52 | 1.29 | 24.49 | 3.20 |
| Caborca | 39977 | 140.25 | 177.2 | 2.42 | 1057.94 | 6.75 | 250.8 | 1943 | 0.95 | 11.06 | 2.60 | 37.67 | 3.66 |
| Norteamérica | 19127 | 82.92 | 322.3 | 2.87 | 607.55 | 4.44 | 166.49 | 2213 | 0.43 | 5.51 | 1.65 | 25.26 | 0.75 |

Salta a la vista que la granodiorita El Jacalón presenta un patrón mezclado entre ambos bloques con valores similares, o valores que se encuentran de por medio. Las muestras de [Iriondo et al. \(2004\)](#) son principalmente de granitos restringidos al área de Quitovac. La [Tabla 8](#) muestra diversas relaciones de elementos traza. [Iriondo et al. \(2004\)](#) no reporta concentraciones de Nb en ppm. Como reemplazo se utiliza el Ta, debido a que ambos

elementos tienen un comportamiento geoquímico muy similar. De nueva cuenta se observa que los valores de la granodiorita El Jacalón se encuentran entremezclados con los datos geoquímicos de los bloques identificados por [Iriondo et al. \(2004\)](#).

Tabla 8. Relaciones de elementos traza de la granodiorita El Jacalón comparados con los terrenos Caborca y Norteamérica definidos por [Iriondo et al. \(2014\)](#).

| Localidad | Rb/Sr | U/Th | Zr/Hf | Zr/Ta | La/Ta | Ba/Ta | Ba/Th | Rb/Ta | Th/Ta | Th/La | Ba/La |
|--------------|-------|------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| El Teguachi | 0.30 | 0.37 | 40.00 | 214.66 | 44.71 | 1510 | 234.92 | 165.95 | 6.43 | 0.14 | 33.79 |
| Caborca | 0.79 | 0.23 | 37.13 | 265.07 | 39.82 | 1118 | 95.68 | 148.23 | 11.69 | 0.29 | 28.08 |
| Norteamérica | 0.26 | 0.30 | 37.50 | 388.49 | 58.95 | 1417 | 110.35 | 193.48 | 12.85 | 0.22 | 24.05 |

La granodiorita El Jacalón también se encuentra más cercana al bloque “Caborca” en el diagrama de [Pearce et al. \(1984\)](#), donde las muestras de los bloques “Caborca” y “Norteamérica” se distribuyen en zonas distintas del diagrama ([Figura 31](#)). Algunas muestras del bloque “Caborca” se clasifican como granitos de intraplaca (WPG).

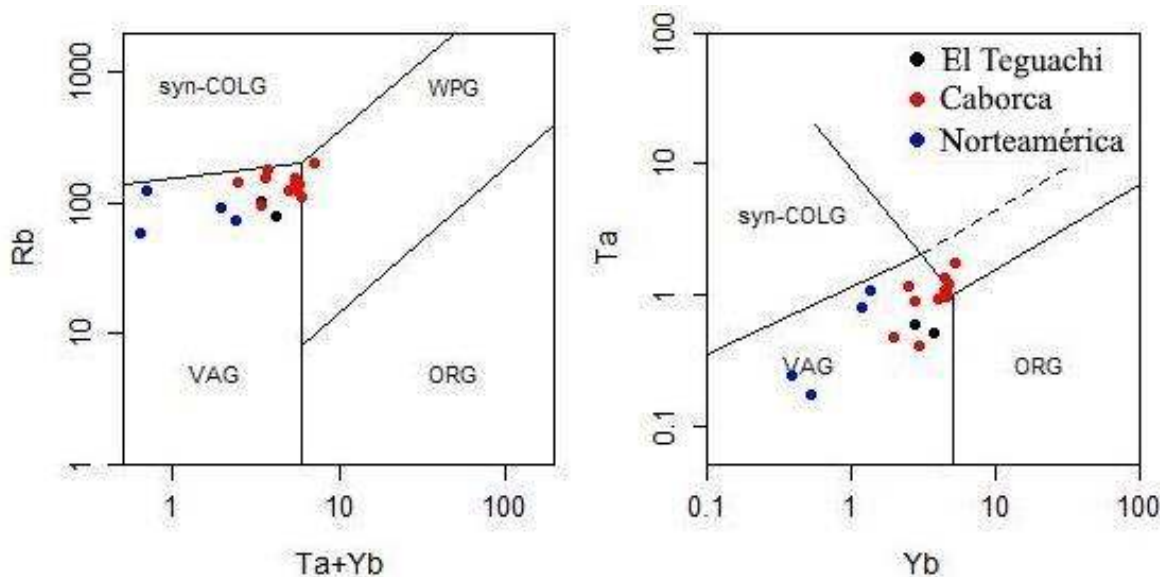


Figura 31. Diagrama de discriminación para granitoides de [Pearce et al. \(1984\)](#) con los datos de [Iriondo et al. \(2004\)](#) y la granodiorita El Jacalón (este estudio).

Los patrones normalizados a condrita ([Figura 32A](#)) y manto primitivo ([Figura 32B](#)) muestran que la granodiorita El Jacalón tiene más afinidad química al bloque “Caborca” de [Iriondo et](#)

al. (2004), la relación $(La/Lu)_N = 4.5-5.7$, la firma calcoalcalina de alto K y enriquecimiento de REE y algunos LILE que tiene la granodiorita El Jacalón son parámetros similares al bloque “Caborca”, aunque la anomalía de Eu y la relación $Eu/Eu^* = 0.85$ para la granodiorita es particularmente baja. Iriondo et al. (2004) interpretan una afinidad química con un ambiente de arco de islas. En estos términos, la granodiorita El Jacalón tiene parámetros geoquímicos afines a la provincia Yavapai mexicana, definida por Iriondo & Premo (2011).

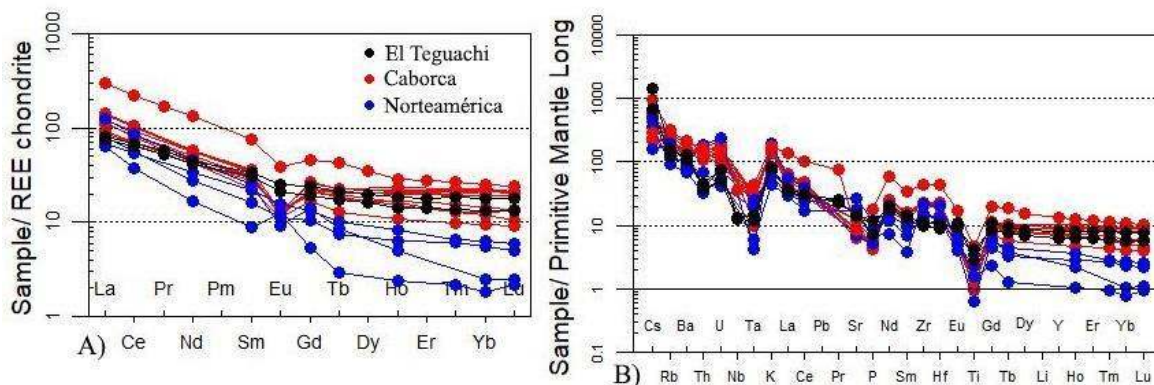


Figura 32. Patrones de la granodiorita El Jacalón normalizados a condrita (A) y manto primitivo (B). Se incluyen los datos de Iriondo et al. (2004).

7.5 LA OTRA HISTORIA DE LOS DIQUES

Los datos geoquímicos de los diques del área El Teguachi demuestra que tienen una gran variación en elementos traza que indican diferentes grados de asimilación cortical y una fuente mantélica enriquecida (grupos I y II) y empobrecida (grupos III y IV). Existen muy pocos estudios geoquímicos enfocados a diques máficos en Sonora, y los que existen no están relacionados espacial ni temporalmente con los diques de este estudio. Por ese motivo, los diques máficos del área El Teguachi fueron clasificados utilizando diagramas de elementos mayores (Mullen, 1983) y elementos traza (Pearce, 2008; Hollocher et al., 2012; Saccani, 2015) con las tendencias de datos geoquímicos de las localidades de la Figura 25. Es importante recordar que todo el magmatismo máfico de hace aproximadamente 1,100 Ma está relacionado espacial, temporal y genéticamente a eventos tectónicos bien documentados en el margen sur de Laurencia. También es bueno destacar que algunas bases de datos de trabajos de más de 20 años de antigüedad solo reportan datos representativos y algunos datos

son demasiado escasos para poder ser utilizados como comparativa, como en los trabajos de Li et al. (2007) (Texas) y Hammond (1986) (California), por lo que se mencionaran si son utilizados en algún diagrama.

La Figura 33A muestra el diagrama de Mullen (1983), basado en el contenido de TiO_2 , MnO y P_2O_5 . Los diques máficos del área El Teguachi caen en su mayoría en el área de toleíitas de arcos de islas (IAT), la única excepción es la muestra P-50 del grupo IV, la cual se clasifica como basaltos continentales (CAB) cerca del subcampo de boninitas (Bon). Podemos ver que las tendencias de las rocas de Lago Superior (*Midcontinental Rift*) y las rocas de Elzevir (*Greenville*) abarcan un rango amplio de composiciones, con la segunda abarcando más espacio. Las rocas de Texas (Franklin Mountains), en donde se incluyen los datos de Li et al. (2007), abarcan todos los campos menos el de toleíitas de islas oceánicas (OIT), llegando a los campos de las boninitas como el grupo IV de este estudio. En este caso particular, los Basaltos Cárdenas (Arizona) no aparecen en el diagrama por no tener datos de MnO .

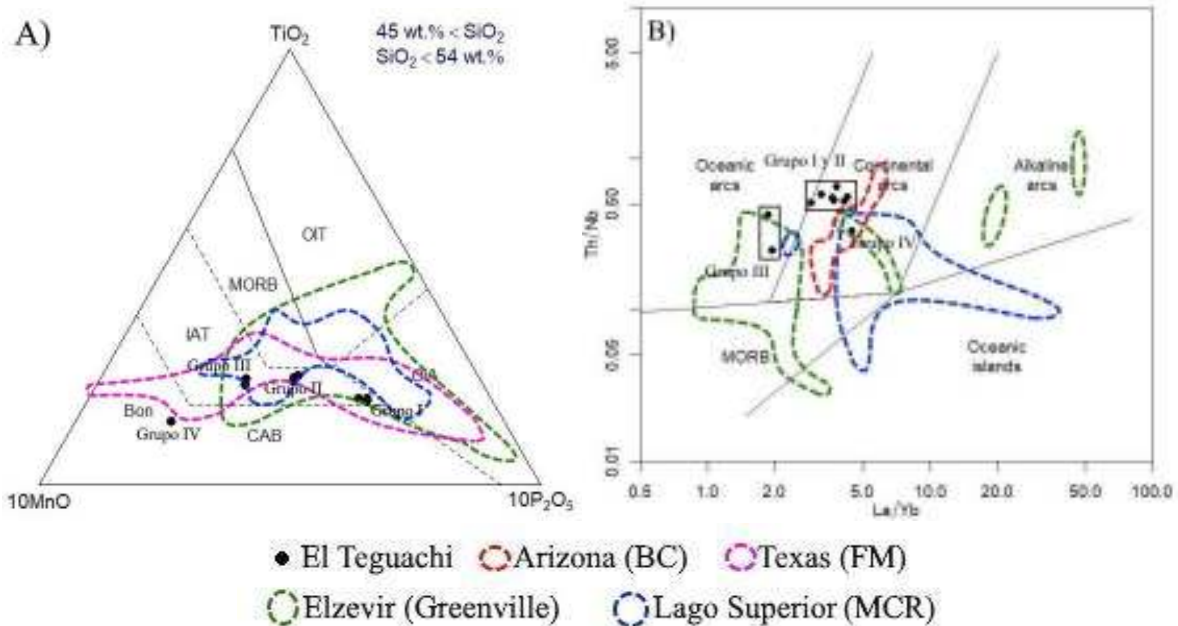


Figura 33. A) Diagrama de clasificación de Mullen (1983). B) Diagrama de clasificación de Holocher et al. (2012) basando en las relaciones La/Yb vs Th/Nb .

La **Figura 33B** muestra el diagrama de [Hollocher et al. \(2012\)](#), aquí únicamente las muestras del grupo III del área El Teguachi se clasifican como IAB (basaltos de arcos de islas), los grupos I, III y IV son clasificados como CAB (basaltos de arco continental). Los Basaltos Cárdenas se clasifican como CAB con una tendencia marcada por el incremento de Th sobre Nb. La tendencia de las rocas de Lago Superior se clasifica principalmente como OIB y CAB con datos aislados en el campo de IAT. Nótese como los datos se bifurcan en el campo de OIB y se encaminan hacia el campo CAB. Las rocas de Elzevir, en cambio muestran una tendencia hacia los campos de IAT y MORB que comienzan en el campo OIB. Adicionalmente se observan valores dispersos en el campo de CAB y arcos maduros (arcos alcalinos). En este diagrama no fue posible mostrar la tendencia de las rocas de Texas.

En el diagrama de [Pearce \(2008\)](#), se observa que los diques del área El Teguachi se clasifican como MORB (**Figura 34B**) con indicios de asimilación de corteza continental de acuerdo a las relaciones Th/Yb superiores al arreglo de fuentes mantélicas (**Figura 34A**). Los basaltos Cárdenas están más emparentados con una fuente E-MORB y también tienen indicios de asimilación cortical. Las tendencias de las rocas de Lago Superior se aglomeran en los campos de E-MORB y OIB en la **Figura 34A**, mientras que la **Figura 34B** muestra una migración del campo OIB hacia fuentes mantélicas no tan profundas, predominando las características de E-MORB sobre N-MORB. En cambio, la tendencia de los diques de Elzevir en ambas figuras presenta una afinidad química principalmente con N-MORB, y algunas muestras en el campo de OIB, mostrando una migración hacia fuentes más superficiales no tan clara. En este diagrama tampoco fue posible mostrar la tendencia de las rocas de Texas.

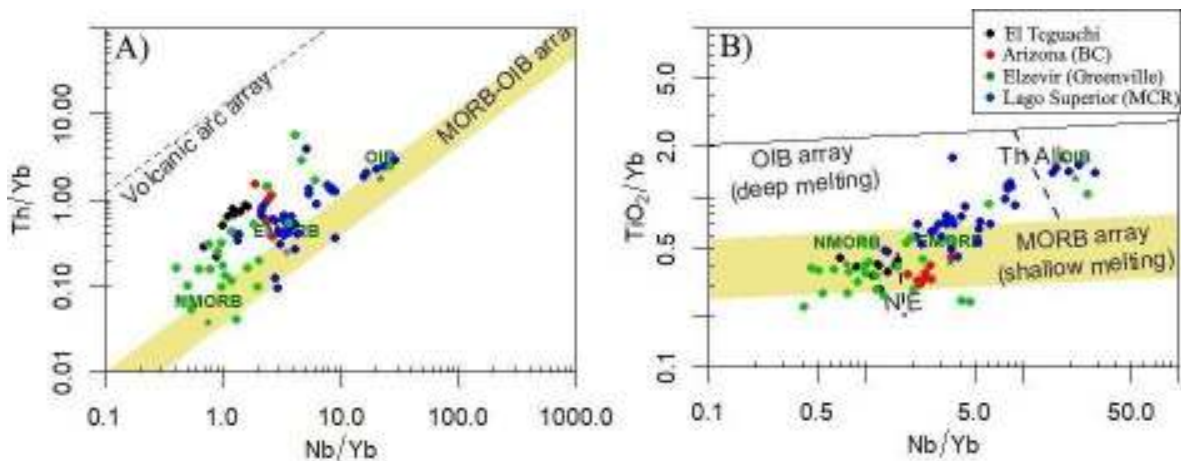


Figura 34. Diagrama de Pearce (2008) para basaltos. A) arreglos de fuentes mantélicas y asimilación cortical. B) fuentes mantélicas profundas vs superficiales.

La **Figura 35** muestra el diagrama de clasificación de **Saccani (2015)**. Los valores de Th y Nb están normalizados a N-MORB (**Sun & McDonough, 1989**). Las muestras del grupo III y IV del área El Teguachi se clasifican como basaltos de arcos de islas (IAT) y de trasarco (Back-Arc Basin Basaltos, o BABB, en inglés), las muestras de los grupos I y II se clasifican como basaltos de arcos continentales (CAB). Las tendencias de las rocas de Lago Superior y Elzevir se traslapan en los diagramas, con ciertas diferencias en el alcance. Por ejemplo, la tendencia de las rocas de Lago Superior atraviesa los campos composicionales de basaltos alcalinos generados por una pluma mantélica (AB), hasta MORB, con una influencia de corteza continental más bien discreta. La tendencia de las rocas de Elzevir abarca desde MORB hasta E-MORB, pasando por basaltos continentales y de arcos de islas sin llegar a los campos de P-MORB ni AB. La fuente P-MORB se interpreta como una fuente cercana o con influencia de una pluma mantélica. Se observa otra pequeña tendencia en el campo de los basaltos alcalinos que sube hacia el campo de CAB. En este diagrama no fue posible mostrar la tendencia de las rocas de Texas.

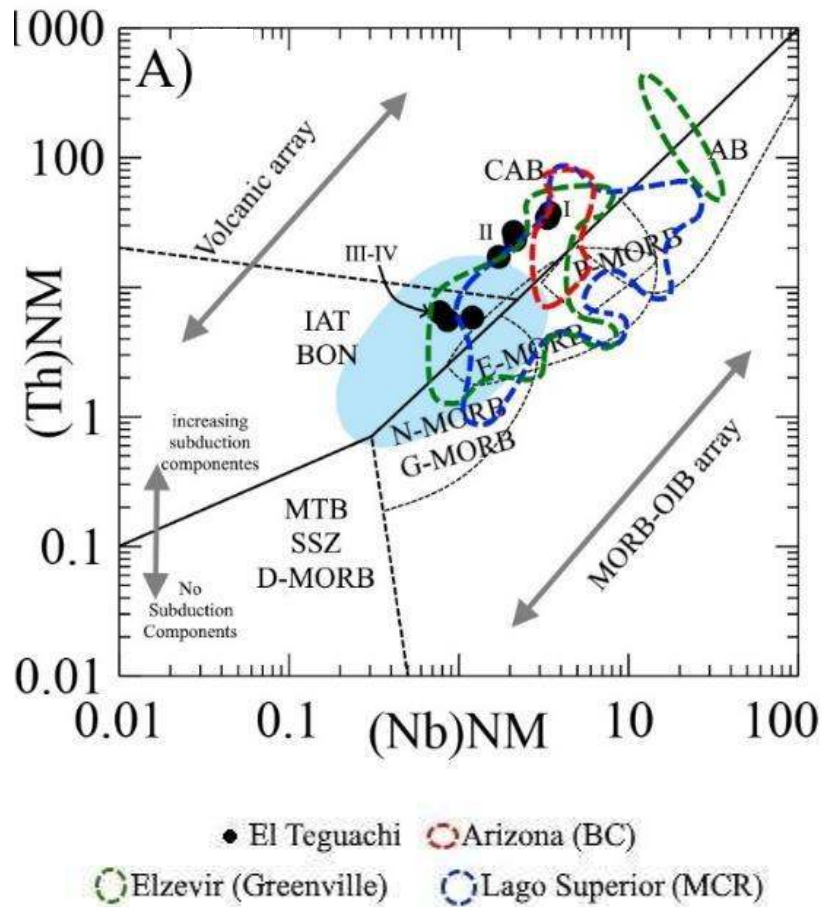


Figura 35. Diagrama de clasificación de ambiente tectónico para basaltos de Saccani (2015).

8 DISCUSIÓN

8.1 GRANITOS TIPO A Y SU RELACION CON MAGMATISMO MÁFICO CONTEMPORÁNEO EN EL MARGEN SW DE LAURENCIA.

De acuerdo con Frost & Frost (2013), los diagramas basados en elementos mayores funcionan mejor en granitos que los diagramas basados en elementos traza, debido a que la concentración de REE, U, Th, Zr, Nb e Y pueden verse muy afectadas por procesos geológicos como la contaminación y asimilación cortical donde los elementos traza se vuelven compatibles y se quedan en las fases minerales accesorias como apatitos, circones, esfena, monacita, óxidos y anfíboles, reduciendo la efectividad de dichos diagramas

(Rollison & Peace, 2021). La **Tabla 9** muestra los resultados obtenidos de los diagramas de clasificación de granitos.

Tabla 9. Resumen de la clasificación obtenida en los diagramas de discriminación utilizados en las rocas graníticas de Sonora y las localidades de comparación.

| Granitos | Edad | Pearce et al. (1984) | Whalen et al (1987) | Grevenikov (2014) | Fe índice | Frost & Frost (2008) | |
|-----------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| | | | | | | MALI | ASI vs AI |
| Santa Margarita | 1,104 Ma | WPG | A | A1 ZI | ferroan | alcalino-cálcico cálcico-alcalino | peraluminoso |
| Aibo | 1,076 Ma | WPG | A | A2 ZII | magnesiano | alcalino-cálcico | peraluminoso |
| Bustamante | 1,112 Ma | VAG Syn- COLG | FG A | VAG ZIII | ferroan magnesiano | alcalino-cálcico cálcico | metaluminoso peraluminoso |
| RGBS | 1,120 Ma | WPG | A | A2 A1 Z I y II | ferroan | alcalino a cálcico-alcalino | metaluminoso peralcalino |
| ERG | 1,080 Ma | WPG VAG Syn- COLG | A I & S | A2 VAG Z III, IV | ferroan | alcalino a cálcico-alcalino | metaluminoso peraluminoso |
| TMG | 1,120- 1,070 Ma | WPG VAG | A I & S | A2 Z I y II | ferroan | alcalino a cálcico-alcalino | metaluminoso peraluminoso |
| PPB | 1,066 Ma | WPG | A | A2 A1 ZI | ferroan | alcalino | metaluminoso peralcalino |
| Greenville | 1,180- 1,170 Ma | WPG VAG Syn- COLG ORG | I & S A | VAG A2 Z I, III, IV | ferroan magnesiano | alcalino a cálcico | metaluminoso peraluminoso |

En general, los granitos Aibo y Santa Margarita comparten muchas similitudes químicas: un contenido de álcalis similar, se clasifican como granitos “WPG” y de tipo A en los diagramas de elementos traza. En la química de elemento mayores, sutiles diferencias salen a la vista. Ambos granitos tienen un índice MALI alcalino-cálcico y carácter peraluminoso, pero el granito Santa Margarita tiene un carácter secundario cálcico-alcalino y es “ferroan”, el granito Aibo es “magnesiano” en vez de “ferroan”. El granito Bustamante mostro muchas inconsistencias químicas en los diagramas. Se clasifica como “ferroan” con un índice MALI alcalino-cálcico a cálcico, un carácter metaluminoso a peraluminoso y una afinidad principalmente con granitos de arcos de islas.

Frost & Frost (2008; 2010; 2013) estudiaron extensivamente los granitos proterozoicos en Laurentia, e indican que los granitos “ferroan” se forman por dos procesos extremos que pueden complementarse. El primer proceso es la diferenciación de magmas toleííticos, transicionales o alcalinos que en su mayoría son anortositas y/o ferrobasaltos cuarzo-toleííticos. Los granitos derivados de este proceso tienen un enriquecimiento en Fe sobre Mg y un índice MALI de alcalino a cálcico que depende de la profundidad, ya que está controlado por la cristalización de piroxeno y plagioclasa: los índices MALI alcalinos están relacionados con la cristalización de piroxeno sobre plagioclasa a presiones de 8 kbars (30 km de profundidad), un índice MALI más cálcico se interpreta como la cristalización de piroxeno y plagioclasa a presiones menores de 4 kbars (15 km de profundidad). El segundo proceso es la fusión parcial de corteza continental, principalmente tonalítica y granodiorítica, que imprimen a los fluidos resultantes un índice de Fe menos intenso que puede llegar a “magnesiano” en granitos de ambientes anorogénicos, y un índice MALI más cálcico debido a la cristalización de piroxeno y plagioclasa. La mezcla de estos procesos es responsable de la génesis de todos los granitos “ferroan” (Figura 36). Debido a que el término de tipo A o “anorogénico” se utiliza para plutones en una gran variedad de ambientes tectónicos, Frost & Frost (2010; 2013) proponen abandonar el término y cambiarlo por el de “ferroan”, el cual no es un término genético (ósea, no está ligado a un ambiente tectónico). Recordemos que los granitos Bustamante y Santa Margarita en Sonora, y las suites RBGS, PPB y *Greenville* se encuentran asociadas a diques de ferrobasaltos toleííticos. El granito Aibo está asociado temporalmente con las anortositas del rancho El Tecolote (Campillo-Castelo, 2008) y las suites TMG y ERG son contemporáneos con el complejo Pecos e intrusiones máficas identificadas en barrenos por Li et al. (2007).

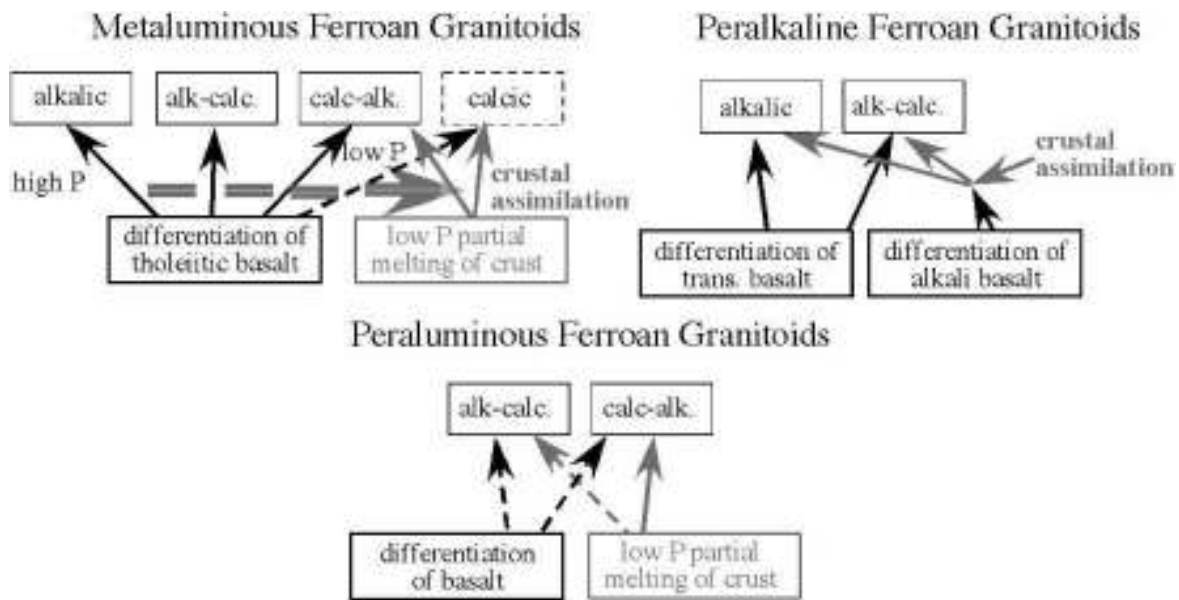


Figura 36. Diagrama de flujo de los procesos que generan granitos "ferroan". Modificado de Frost & Frost (2010).

De acuerdo con Frost & Frost (2013) las diferencias en el índice MALI se explican por la profundidad de la génesis de fluidos y el carácter de saturación de alumina (ASI vs. AI) depende del grado de asimilación cortical. Los granitoides "ferroan" peralcalinos derivados de fluidos diferenciados de magmas máficos adquieren un carácter metaluminoso por asimilación cortical, lo que se observa precisamente con las suites PPB y RBGS. El carácter peraluminoso de los granitos "ferroan" implica que la fusión parcial de corteza fue más dominante que la diferenciación de magmas máficos para su génesis. Frost & Frost (2010) indican que los granitos peraluminosos pueden estar o no relacionados con magmas toleííticos, y un carácter más cálcico implica una sobresaturación en sílice que no permite el desarrollo de plutones con $\text{SiO}_2 < 70\%$. El carácter peraluminoso de los granitos Santa Margarita y Aibo sugiere que la asimilación de corteza fue muy importante en su proceso de formación. El ligero enriquecimiento de LILE y LREE del granito Aibo relativa al granito Santa Margarita implica que el granito Aibo asimiló más corteza que el granito Santa Margarita. El efecto de la asimilación cortical también explica las características químicas de las suites ERG, TMG, los granitos tipo A de la suite *Greenville* y las inconsistencias en elementos mayores y traza del granito Bustamante, pudiendo representar un caso incompleto

o diferenciado de este proceso. El diagrama de [Grevenikov \(2014\)](#) está más orientado a una clasificación tectónica: los granitos de tipo A1 tienen una afinidad con ambientes extensionales y de rift continental. Los granitos tipo A2 son afines a procesos post-colisionales ligados a ambientes de subducción en donde el manto tiene la oportunidad de ascender hacia la corteza sublitosférica. Todos los demás granitos fuera de esos campos tienen afinidad con un ambiente de arco volcánico y se caracterizan por valores más altos de CaO+MgO. Las zonas en el diagrama numeradas de I a V fueron construidas con datos isotópicos de granitoides de ambientes tectónicos concretos. La zona I se refiere a granitos formados en Islas Oceánicas, la zona II está relacionada a rifts intracontinentales y hotspots, la zona III, IV y V está ligada a magmatismo de arco de islas, continental y de trascero (BABB), respectivamente. En primera instancia, se observa que la mayoría de los granitos estudiados presentan una afinidad química con más de un contexto tectónico. A grandes rasgos, el granito Santa Margarita presenta afinidad química de ambientes extensionales junto con las suites RBGS de Texas y PPB de Colorado. El granito Aibo tiene una afinidad química similar a las suites ERG y TMG de Texas central, relacionados a procesos post-orogénicos. El granito Bustamante tiene afinidad química con las suites de Texas central y *Greenville*. Los granitos estudiados están relacionados a ambientes de extensión y procesos post-colisionales como delaminación de la corteza y el ascenso del manto astenosférico, que pueden estar asociados a un contexto de margen continental activo, una conclusión similar a la que llegaron [Farmer et al. \(2005\)](#) con respecto a la génesis del granito Aibo.

8.2 PLUMA MANTÉLICA VS SUBDUCCIÓN EN EL MARGEN SUR DE LAURENCIA.

La geoquímica de rocas máficas, al igual que la de los granitos, también revela indicios de los procesos geológicos que las formaron, aunque a diferencia de los granitos, los diques máficos pueden ser asociados a una fuente mantélica en base a sus firmas de elementos traza, por lo que los diagramas basados en elementos trazan son más efectivos a la hora de diferenciar las fuentes e identificar una afinidad química con un ambiente tectónico concreto cuando ciertos elementos traza se vuelen compatibles o incompatibles con el magma parental, como el Nb y el Th. En la literatura es una generalidad que el magmatismo máfico de 1,100

Ma de Laurencia se caracteriza principalmente por ferrobasaltos de cuarzo u olivino con un #mg variable, carácter metaluminoso y firmas geoquímicas toleíticas, transicionales y/o alcalinas un tanto ambiguas que indican una posible mezcla de fuentes mantélicas o grados de asimilación cortical muy variados. Los diques del área El Teguachi no son la excepción, y comparten muchas características con las rocas máficas de *Arizona, Texas, Lago Superior* y la provincia *Greenville*. La diferencia hasta ahora es que las rocas de *Sonora, Texas* y la provincia *Greenville* se caracteriza por concentraciones de elementos traza que les dan afinidad a fuentes mantélicas tipo N-MORB y E-MORB en donde siempre se menciona un componente de corteza subducido. Las rocas de Arizona y Lago Superior, por otro lado, están asociadas con ambientes tectónicos de extensión y presentan más afinidad por las fuentes mantélicas E-MORB y OIB. No obstante, en todas las localidades se identificaron patrones químicos de tipo OIB, caracterizadas por un enriquecimiento en LILE relativo a HFSE y anomalías negativas de Nb y Ta, características de asimilación cortical. ¿Esto significa que en todas las localidades la fuente principal del magmatismo máfico está ligada al ascenso del manto astenosférico o plumas mantélicas? [Saunders et al. \(1992\)](#), estudio basaltos de meseta continental (CAB, Continental Flood Basaltos en inglés) y *plateaux* oceánicas relacionadas con plumas mantélicas y la formación de LIPs, concluyendo que las rocas máficas continentales tienen firmas geoquímicas e isotópicas mezcladas con un componente continental que no existe en las islas oceánicas. La **Figura 37** muestra los patrones de elementos traza normalizados a N-MORB ([Sun & McDonough, 1989](#)) de las rocas máficas del área de El Teguachi y las localidades analizadas. Los patrones se construyeron utilizando la mediana geométrica de los datos como guía y los percentiles P₂₅₋₇₅ como limitadores a fin de evitar el efecto de dispersión de datos atípicos, también se añadieron los reservorios E-MORB y OIB como comparación. Podemos observar en la figura que los patrones de todas las localidades presentan características geoquímicas intermedias entre E-MORB y OIB junto con anomalías negativas de Nb y positivas de K, aunque en el caso de los Basaltos Cárdenas y Lago Superior no son tan intensas. Los diques máficos de las áreas El Teguachi y Franklin Mountains (FM; diques asociados a la suite granítica RBGS) presentan anomalías negativas más intensas de Nb y anomalías positivas de K con valores tipo OIB. Los patrones de El Teguachi y FM tienen valores de Sr concentrados sin anomalía, con una dispersión de

valores de P. Las HFSE y HREE de estas suites muestran valores ligeramente superiores al N-MORB.

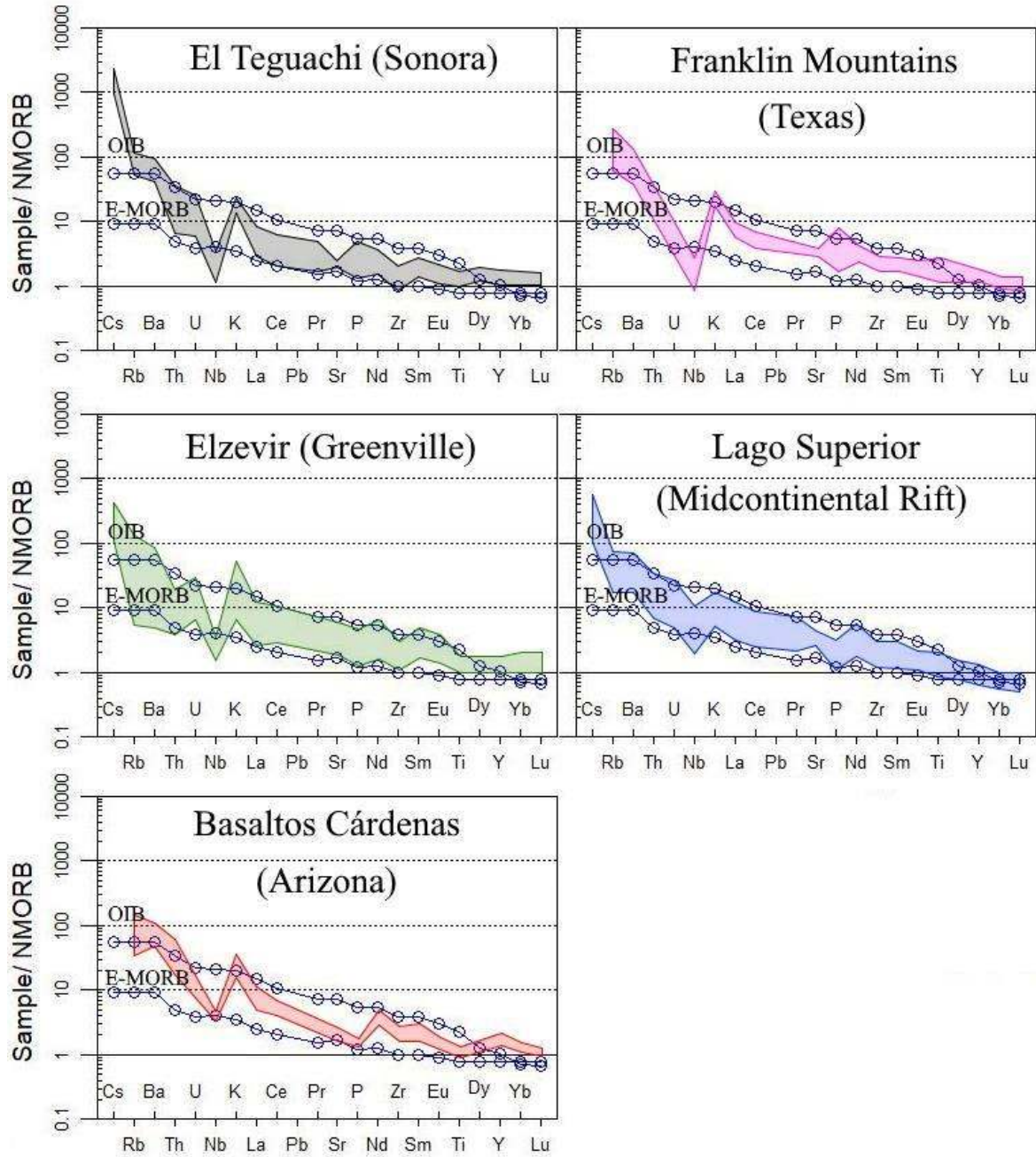


Figura 37. Patrones de firmas geoquímicas del área El Teguachi y las localidades comparadas normalizadas al reservorio N-MORB de Sun & McDonough (1989).

El patrón de las rocas de Elzevir es similar al de El Teguachi y FM, aunque se observan anomalías positivas de Sm y Eu y anomalías negativas de Ti muy discretas, similares a la localidad de El Teguachi, mientras que la localidad de FM no las presenta. El patrón de Elzevir también tiene anomalías negativas de P y positivas de Nd muy débiles similares a las localidades de los Basaltos Cárdenas y Lago Superior, aunque mucho más dispersas y con concentraciones de HFSE y HREE ligeramente superiores al N-MORB. Los patrones del Basalto Cárdenas y Lago Superior presentan anomalías negativas de P y positivas de Nd, las concentraciones de HFSE y HREE de Lago Superior se adaptan perfectamente al reservorio OIB. Los basaltos Cárdenas tiene valores de HFSE ligeramente más enriquecidos y una anomalía positiva de Y. Este enriquecimiento de Y, y la forma “cóncava” de los patrones normalizados a condrita y manto primitivo (no se muestran) es muy común en rocas con afinidad de pluma mantélica o muy cercana a una ([Barrón-Díaz 2003](#); [Seymour & Kumarapeli, 1995](#); [Lui et al., 2013](#); [Lidiak et al 2014](#)).

Es interesante notar que todas las localidades presentan anomalías negativas de Nb y positivas de K que reflejan asimilación de corteza continental, algo típico de los basaltos de meseta continentales ([Saunders et al., 1992](#)). La diferencia en los patrones radica en los valores de Sr, P y Nd. En el caso de las rocas de *Sonora* y *Texas*, la variación de P podría reflejar el aporte de sedimentos con concentraciones variables de fosfatos provenientes de los sedimentos de una corteza subcontinental metasomalizada, ya que la concentración de P en los magmas máficos es bastante baja y se considera un parámetro inicial del magma parental ([Rogers et al., 2018](#); [Sun & McDonough, 1989](#)). En este contexto, la liberación de fluidos silicatados e hidratados provenientes de micas y anfíboles de la corteza subducida y los sedimentos pelágicos a profundidades menores de 160 km puede imprimir en el manto cercano a la zona de subducción una firma con un enriquecimiento en LILE y LREE similares a los de E-MORB y OIB, con anomalías negativas de Nb y Ta debido a que no se alcanzó el punto de fusión del rutilo en la corteza subducida ([Zheng, 2019](#)). Otra posibilidad es que las concentraciones de P sean una consecuencia de asimilación de la corteza que atravesaron. Para la localidad El Teguachi, es probable que el magma parental haya asimilado apatitos de la granodiorita El Jacalón, y para los diques máficos de FM, el aporte de P podría provenir

de la secuencia arrecifal en donde están emplazados. Las anomalías negativas de Nb y positivas de K también están presentes cuando se da un proceso de asimilación cortical, aunque serán más intensas en un contexto de subducción. Las anomalías negativas de P-Nb y positivas de K-Nd de las rocas de *Arizona* y *Lago Superior*, aunque sutiles, sugieren una fuente mantélica más predominante, una adición de P no es posible a menos que la roca que atraviese el magma tenga gran cantidad de apatitos. Las rocas de *Greenville* presentan características generales de todos los patrones, lo que sugiere una mezcla de fuentes más intrincada, algo esperado considerando la proximidad de esta localidad con el *Midcontinental Rift*.

Con todo lo anterior dicho, en todas las localidades de magmatismo máfico existen rocas con afinidad química de basaltos de trasarco (BABB). La afinidad BABB por definición requiere una mezcla de reservorios por migración y flujo convectivo del manto hacia la zona de subducción y se caracteriza por el enriquecimiento relativo de LILE y LREE con respecto a HFSE y HREE (Pearce & Stern, 2016). Los BABB se forman en arcos de islas actuales, con características químicas muy similares a las rocas estudiadas. A primera vista, las diferencias en los patrones de la **Figura 37** se deban simplemente a su posición relativa con respecto a la zona de subducción. Pearce & Stern (2016) estudiaron a detalle los arcos de islas en el océano indico-pacífico, diferenciándolos químicamente de otros basaltos. La génesis de los BABB en un arco de islas se debe a la fusión de un “slab” de eclogita subducido que recibe aporte del manto astenosférico muy cerca de la zona de subducción. Así mismo, se propone un modelo para explicar la génesis de este tipo especial de basaltos basado en tres puntos: el aporte mantélico y de subducción en la región de trasarco, la interacción de estos componentes y, por último, la fusión del manto y la historia de asimilación-cristalización del magma resultante. Pearce & Stern (2016) indican que los elementos incompatibles son más eficientes para diferenciar el aporte mantélico que permite definir un patrón de flujo del manto y la presencia de un componente de subducción en los BABB, en comparación con los datos isotópicos. Se proponen las relaciones Nb/Yb para cuantificar la fertilidad del manto y el porcentaje de fusión y la relación Ba/Nb para cuantificar el componente de subducción total. La afinidad química BABB generalizada reportada para las rocas máficas de Sonora,

Texas, Arizona, la Provincia *Greenville* y el *Midcontinental Rift* permite evaluar el modelo de [Pearce & Stern \(2016\)](#) para el margen sur de Laurentia.

La [Figura 38](#) muestra las relaciones de elementos traza propuestas por [Pearce & Stern \(2016\)](#) para el área El Teguachi y las localidades de comparación. La [Figura 38A](#) muestra la relación Nb/Yb y la [Figura 38B](#) muestra la relación Ba/Nb. Para evitar fabricar correlaciones espurias se graficaron las relaciones independientemente. También se graficaron los valores de los reservorios de [Sun & McDonough \(1989\)](#). En la [Figura 38A](#), una tendencia lineal en la relación Nb/Yb sugiere enriquecimiento de la fuente por el flujo de manto astenosférico enriquecido hacia la zona de subducción, o bien, la influencia de una pluma mantélica. En la [Figura 38B](#), la dispersión de los valores de Ba sugiere la contaminación de la fuente por un componente cortical, una tendencia lineal de la relación Nb/Ba sugiere el enriquecimiento de la fuente.

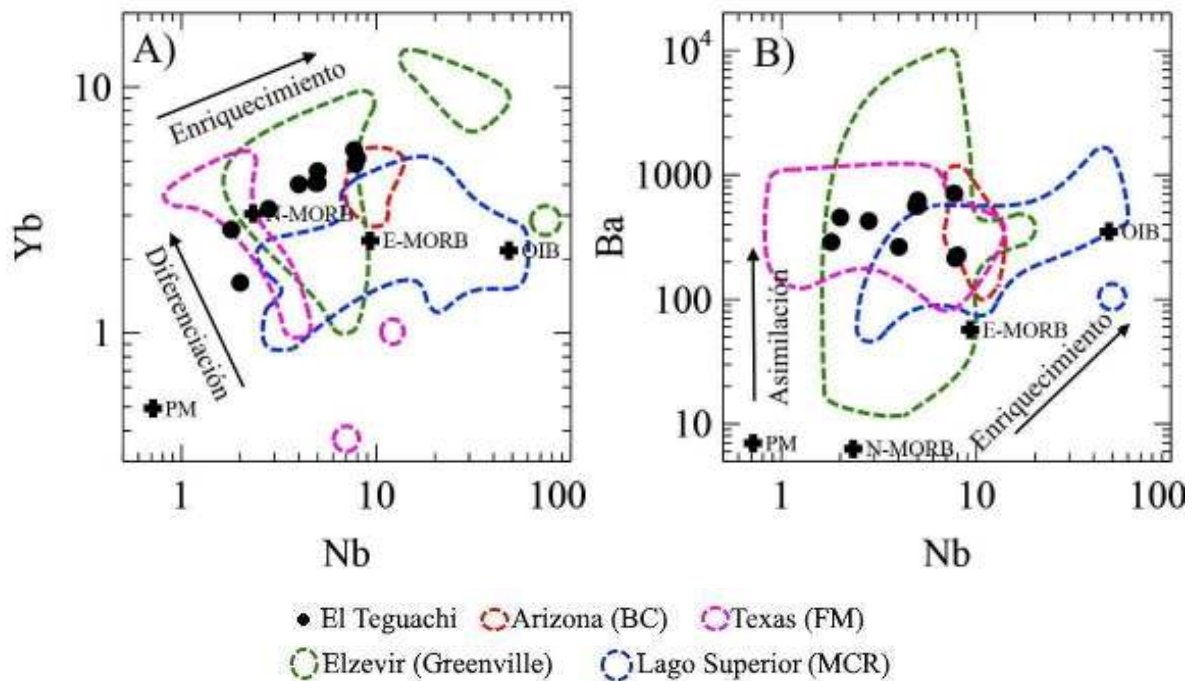


Figura 38. Relaciones de Nb/Yb (A) y Nb/Ba (B) de las rocas del área El Teguachi y las localidades comparadas. Se añadieron las relaciones de los reservorios PM, N-MORB, E-MORB y OIB como comparación ([Sun & McDonough, 1989](#)).

En ambas figuras, las tendencias de las rocas de Elzevir son más amplias y siempre se encuentran asociadas con los componentes N-MORB y E-MORB sin llegar al componente OIB. La tendencia de las rocas de Lago Superior abarca los reservorios OIB y E-MORB sin incluir N-MORB, además de tener una forma mucho menos dispersa. De esta figura podemos concluir que las “verdaderas” fuentes OIB tienen concentraciones de Nb relativamente mayores a otras fuentes con firmas similares.

Las rocas máficas del área El Teguachi tienen una correlación lineal de Nb e Yb que atraviesa los reservorios N-MORB y E-MORB, con excepción de la muestra P-50 (Figura 38A). Esta relación lineal nos indica aporte de una fuente mantélica enriquecida, ya que la concentración de Nb, Ta y Ti se encuentra limitada por la presencia de rutilo en un contexto de subducción (Zheng, 2019). Adicionalmente, valores de $(Gd/Yb)_{PM} < 2$ asociados a una fuente mantélica con espinela (Rogers et al., 2018), revelan que el enriquecimiento en Yb no se debe a la inestabilidad de granate en la fuente. Por otro lado, El grupo III de diques tiene valores $(La/Sm)_{PM}$ de 1.01-1.12., y para los grupo I, II y IV el valor $(La/Sm)_{PM}$ asciende a 1.68-1.9, indicando un componente cortical mayor. Es posible que el Grupo III de diques refleje las concentraciones iniciales de la suite, que pertenezca a otra fuente, o bien, esta diferencia sea una relación espuria, consecuencia del fuerte empobrecimiento de elementos traza en los diagramas normalizados. Los diagramas de clasificación revelaron que el grupo IV tiene características químicas de boninitas. El contenido de $MgO > 7\%wt$, el empobrecimiento de HFSE, y ahora, la relación menor de Nb/Yb en relación con los otros grupos también sugieren una afinidad química de boninita. Este tipo de rocas se forman de una fuente mantélica que ha sobrellevado múltiples procesos de fusión parcial (Sacanni, 2015), generalmente se forman en la cuña mantélica en una zona de subducción, en donde la tasa de fusión parcial es muy alta debido al metasomatismo del manto por los fluidos hidratados de la corteza subducida. Sin embargo, el termino hace referencia al proceso de formación y no necesariamente implica un contexto tectónico concreto. Los Basaltos Cárdenas de Arizona se encuentran asociados al reservorio E-MORB y tienen una tendencia de diferenciación con un leve enriquecimiento en Yb y valores constantes de Nb, lo que sugiere que los Basaltos Cárdenas de Arizona provienen de a una fuente mantélica enriquecida con asimilación

cortical, probablemente un componente astenosférico que puede estar o no ligado a una pluma mantélica. La tendencia de las rocas de Texas, que en este caso son los diques máficos de la localidad FM asociados a la suite RBGS, presentan un alto grado de diferenciación y una tendencia de enriquecimiento menor asociada con el N-MORB. La suite RBGS y los diques asociados están emplazados en una secuencia arrecifal con desarrollo de zonas de *skarn* y ocurrencia de granate y piroxenos cálcicos en el halo de alteración (McAnulty Jr., 1968) que muy probablemente fraccionaron las HREE y HFSE, explicando las tendencias de la Figura 38A. Las rocas de Lago Superior muestran una tendencia de OIB “verdadera” con asimilación cortical, reflejada principalmente en los valores relativamente más altos de Nb y valores de Yb menos dispersos. La tendencia de las rocas de Elzevir está más relacionada a un contexto de subducción que va perdiendo Nb en relación con Yb mientras es enriquecida por la corteza subducida metazomatizada. Se puede observar otra tendencia ligada a una fuente OIB, esto debido a la proximidad de las rocas de Elzevir con el *Midcontinental Rift*. La Figura 38B revela que las rocas de Arizona y Lago Superior no presentan un componente de subducción debido a la dispersión moderada de valores de Ba y valores de Nb entre los reservorios E-MORB y OIB, lo que sugiere contaminación cortical al momento de ascender y emplazarse. En cambio, las rocas de Sonora, Texas y Elzevir presentan mayores grados de asimilación cortical reflejados en valores dispersos de Ba y valores de Nb limitados al reservorio E-MORB y N-MORB. Se puede observar cómo existe una pequeña tendencia de las rocas de Elzevir con valores sensiblemente mayores de Nb que son similares a las rocas de Lago Superior, revelando la influencia de la fuente OIB ligada al *Midcontinental Rift*.

9 IMPLICACIONES DE LOS DATOS GEOQUÍMICOS DEL ÁREA EL TEGUACHI EN EL CONTEXTO REGIONAL Y GLOBAL DE SONORA: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Los diques máficos estudiados, lamentablemente, no pudieron ser fechados debido a la contingencia sanitaria del SARS-COVID 19. Sin embargo, las firmas geoquímicas de los diques del área El Teguachi difieren de rocas con composiciones y afinidades químicas similares de edades más jóvenes asociadas a otros eventos tectónicos más recientes ([Orozco Garza et al., 2013](#); [González-Becuar et al., 2017](#); [Sarmiento-Villagrana et al., 2018](#)). Debido a que los diques máficos en el área El Teguachi se encuentran en relación de corte con dos granitoides con edades muy dispares, existen dos interpretaciones con respecto a su contexto tectónico.

Es probable que existan diques con edades de 1,700-1,650 Ma asociados a la granodiorita El Jacalón y al evento tectónico responsable del metamorfismo del Complejo El Alamito. En este supuesto, los diques junto a la granodiorita El Jacalón están asociados a una cuenca de trascarco en un arco de islas, con un contexto de colisión continental, ligado a la Orogenia Yavapai de 1,740-1,620 Ma ([Rodríguez-Castañeda, 1994](#); [Prante, 2009](#)). Se propone que diques con una geoquímica similar al grupo III pudiera pertenecer a este evento tectónico, en base a sus valores de $(La/Sm)_{PM}$ y a que estos diques solamente cortan a la granodiorita El Jacalón.

Los diques asociados al Granito Santa Margarita revelan una historia geológica un poco más complicada. El magma parental de los diques máficos se deriva de un manto astenosférico originalmente empobrecido tipo N-MORB que experimento un enriquecimiento en LILE, LREE y HFSE debido al flujo de manto astenosférico más enriquecido y al aporte de fluidos silicatados derivados de un componente cortical subducido que provocaron altos grados de fusión parcial que poco a poco empobreció de nueva cuenta a la fuente mantélica. El magma se formó en un ambiente de trascarco, en un contexto extensional, y ascendió hacia la corteza

litosférica. En Sonora no se han identificado lavas máficas que puedan asociarse al magmatismo de 1,100 Ma ni que se correspondan con las firmas químicas de los diques estudiados en El Teguachi, es probable que estas rocas ya no afloren en el estado.

Los datos de este trabajo sugieren que el magma parental de los diques se acumuló debajo de la corteza litosférica y provocó un alto grado de fusión parcial que fundió a la granodiorita El Jacalón, dando origen al granito Santa Margarita con una firma geoquímica de tipo anorogénica o “ferroan”, enriquecida en LILE, REE, Fe y álcalis y empobrecimiento de Ba, Sr, P y Ti. No se encontraron rocas con composiciones intermedias, lo cual sugiere un magmatismo bimodal. Los granitoides de 1400 Ma también pudieron tener cierta influencia en la génesis del granito Santa Margarita en otras localidades, ya que afloran en los alrededores del área estudiada acompañando al granito Santa Margarita y la granodiorita El Jacalón. Es posible que los diques máficos del grupo III sean ligeramente más antiguos y preservaran la firma de una fuente mantélica empobrecida tipo N-MORB que existió en la cuenca trasarco, antes de la fusión de la granodiorita El Jacalón en el área El Teguachi. Los grupos I y II, además del aporte de elementos traza provenientes del manto astenosférico y la corteza subducida, sugieren que el magma parental asimiló la firma geoquímica de la granodiorita El Jacalón cuando interactuó con la corteza sublitosférica. El grupo IV de diques sería el más tardío, evidenciando un fuerte empobrecimiento de la fuente debido a un alto grado de fusión parcial asociada a su afinidad química de boninitas (Saccani, 2015).

En el contexto regional, el granito Santa Margarita comparte numerosas características químicas con el granito Aibo. Ambos granitos adquirieron sus características químicas por procesos similares y atravesaron tipos de corteza similares, aunque el granito Aibo sea más tardío y no esté relacionado con diques contemporáneos. El granito Bustamante es químicamente diferente de los granitos “Aibo”, y está más asociado a un ambiente tectónico de arco de islas con inconsistencias químicas e isotópicas importantes. Es probable que el estudio del magmatismo máfico de supuesta edad *Greenvilleana* reportado en el NW de Sonora pueda aportar más información sobre su génesis. En el contexto del margen sur de Laurencia, los diques máficos del área El Teguachi tienen una gran similitud química con los

diques asociados a la suite RBGS del oeste de Texas. En cambio, la firma geoquímica de los Basaltos Cárdenas del norte de Arizona y los diques de la Formación Cristal Spring, en California, sugiere que se derivaron de una fuente de manto astenosférico en un ambiente extensional. Los datos estructurales y la interpretación de las firmas químicas del granito Santa Margarita y los diques máficos asociados son congruentes con el modelo propuesto por [Mosher et al. \(2008\)](#), [Davis & Mosher \(2018\)](#) y [Mulder et al. \(2016\)](#) para la orogenia *Greenville* en Texas. Las rocas máficas de El Teguachi y *Franklin Mountains* se formaron en una cuenca de trasarco como respuesta extensional a la colisión continental del Kalahari ([Li et al., 2008](#)) con el SW de Laurencia. La diferencia de edades se debe a que la colisión ocurrió primero en Texas Central hace 1,150-1,120 Ma, continuando hacia el W ([Davis & Mosher, 2018](#)).

El alto grado de fusión parcial identificado en el área El Teguachi concuerda con la hipótesis propuesta por [Mosher et al. \(2008\)](#) sobre el desprendimiento de la corteza subducida y el ascenso del manto astenosférico debido al rebote isostático del orógeno recién formado en Texas. Los resultados de este trabajo también son compatibles con la hipótesis de [Bright et al., \(2014\)](#), de una LIP desarrollada por todo el margen sur de Laurencia, favoreciendo el modelo de delaminación cortical en Texas y Sonora ([Mulder et al., 2016](#)), que sugiere un contexto de margen continental activo para las rocas máficas de Sonora, Texas, Arizona y California. Las diferencias químicas se deben a la distancia con respecto a la zona de subducción, aunque para las rocas de Arizona y California no se descarta la influencia de una pluma mantélica. En los trabajos de [Nicholson et al. \(1992\)](#), [Bright et al. \(2014\)](#) y [Davis & Mosher \(2018\)](#), existe un hiato en el magmatismo de 1,100 Ma de aproximadamente 10-20 Ma, que también está presente en Sonora.

Por último, los resultados de este trabajo no encajan con las configuraciones paleogeográficas propuestas para Sonora. La afinidad química de las rocas máficas y félsicas de Sonora se relaciona espacial y temporalmente con rocas similares en Texas, y no pudieron haberse generado en California o Arizona, mientras que los datos geoquímicos del granito Bustamante revelan que tiene características químicas diferentes a los granitos anorogénicos

o de tipo A estudiados en Sonora, y su afinidad química de arco de islas es difícil de conciliar con la literatura, ya que nunca se ha considerado una zona de subducción en el NW de Sonora hace 1,100 Ma. No obstante, el área El Teguachi se encuentra ligeramente al norte de la traza de la megacizalla, en terreno *no transportado*, y solamente se generaron datos de una porción pequeña del magmatismo máfico de 1,100 Ma en Sonora, por lo que una interpretación para todo el estado en base a los resultados aquí propuestos no es viable. La generación de más datos geoquímicos podría complementar la historia aquí contada, o revelar otra historia completamente nueva para el margen SW de Laurencia. Los datos geoquímicos generados de los diques máficos asociados al granito Santa Margarita le dan un nuevo sentido a la interpretación de su génesis, y también explica las diferencias y similitudes que tienen los granitos anorogénicos de Sonora en el contexto regional y global al compararlos con localidades similares. Se invita a los investigadores Sonorenses a reproducir estudios similares sobre el magmatismo máfico *greenvilleano* de Sonora, que hasta día de hoy sigue siendo desconocido.

10 REFERENCIAS

- Amato J. M., Lawton T. F., Mauel D. J., Leggett W. J., González-León C.M., Farmer G. L. & Wooden J. L., 2009. Testing the Mojave-Sonora megashear hypothesis: Evidence from Paleoproterozoic igneous rocks and deformed Mesozoic strata in Sonora, Mexico. *Geology*, Vol. 37, No. 1, p. 75-78.
- Anderson, T.H. & Silver, L.T., 1979, The role of the Mojave-Sonora megashear in the tectonic evolution of northern Sonora, in Anderson, T.H., and Roldán-Quintana, J., eds., *Geology of northern Sonora Guidebook*, Annual Meeting of the Geological Society of America: Estación Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México and the University of Pittsburgh, Pittsburgh, USA, p. 59–68.
- Anderson, T.H. & Silver, L.T., 2005, The Mojave-Sonora megashear—Field and analytical studies leading to the conception and evolution of the hypothesis, in Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W., and Steiner, M.B., eds., *The Mojave-Sonora megashear hypothesis: Development, assessment, and alternatives: Geological Society of America Special Paper 393*, p. 1–50.
- Anderson, J.L.; Wooden, J.L. & Bender, E.E., 1993, Mojave Province of southern California and vicinity, in Van Schmus, W.R., et al., eds., *Transcontinental Proterozoic provinces*, in Reed, J.C., Jr.; Bickford, M.E.; Houston, R.S.; Link, P.K.; Rankin, D.W.; Sims, P.K.; y Van Schmus, W.R., eds., *Precambrian—conterminous U.S.: Boulder, Colorado*, Geological Society of America, *The Geology of North America C-2*, p. 176–188.

- Barnes M. A., Rohs C. R., Anthony E. Y., Van Schmus W. R. & Denison R. E., 1999a. Isotopic and elemental chemistry of subsurface Precambrian igneous rocks, west Texas and eastern New Mexico. *Rocky Mountain Geology*, Vol. 34, No. 2, p. 245-262.
- Barnes C. G., Shannon W. M. & Kargi H., 1999b. Diverse Mesoproterozoic basaltic magmatism in west Texas. *Rocky Mountain Geology*, v. 34, no. 2, p. 263-273.
- Barrón-Díaz, 2013. Caracterización Petrogenética de las Metabasanitas Anorogénicas del Límite Cámbrico-Precámbrico, Municipio de Pitiquito, Sonora, México. Universidad de Sonora; Tesis de Maestría, 106 pp.
- Bender E. E., Morrison J., Anderson L. J. & Wooden J. L., 1993. Early Proterozoic Ties between Two Suspect Terranes and the Mojave Crustal Block of the Southwestern U.S. *The Journal of Geology*, 1993, Vol. 101, p. 715-728.
- Boynton, W. V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. *Developments in Geochemistry*, p. 63–114.
- Bright R. M., Amato J. M., Denyszyn S. W. & Ernst R. E., 2014. U-Pb geochronology of 1.1 Ga diabase in the southwestern United States: Testing models for the origin of a post-Greenville large igneous province. *Lithosphere*, Vol. 6; No. 3; p. 135-156.
- Brown et al. (1975) Brown, R. L., Moore J. M. & Thompson P. H., 1975. An Ensimatic Island Arc and Ocean Closure in The Grenville Province of Southeastern Ontario, Canada. *Geoscience Canada*, vol. 2, No 3, p. 141-144.
- Campell, I. H., 2005. Large Igneous Provinces and the Mantle Plume Hypothesis. *Elements*, Vol. 1; p. 265-269.

- Campillo-Castelo, J.A., 2008, Caracterización petrológica, mineralógica y geoquímica de las rocas anortosíticas del bloque Caborca, Sonora, México: Hermosillo, Universidad de Sonora, tesis de licenciatura, 84 pp. (inédita).
- Chappell, B.W. & White, A. J. R., 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, Vol. 8, p. 173-174.
- Chiarenzelli J., Lupulescu M., Cousens B., Thern E., Coffin L. & Reagan S., 2010. Enriched Grenvillian Lithospheric Mantle as a Consequence of Long-lived Subduction Beneath Laurentia. *Geology*, Vol. 38, Núm. 2, p. 151-154.
- Ciborowski T. J. R., Kerr A. C., McDonald I., Ernst R. E., Hughes H. S. R. & Minifie M. J., 2014. The geochemistry and petrogenesis of the Paleoproterozoic du Chef dyke swarm, Québec, Canada. *Precambrian Research*, Vol. 250, p. 151-166.
- Corral-Gastelum R. & Hernandez-Morales P., 2007. Informe de la Carta Geológico-Minera Santa Ana H12B82, Escala 1: 50,000. Servicio Geológico Mexicano.
- Davis B. R. & S. Mosher, 2018. Complex structural and fluid flow evolution along the Grenville Front, west Texas. *Geosphere*, Vol. 11, No 13, p. 868-898.
- Deer W.A., Howie R.A. & Zussman J., 1992. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. Longman Scientific & Technical, 2da Edición; ISBN 0-582-30094-0.
- Dickinson W. R. & Lawton T. F., 2001. Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico. *Geological Society of America Bulletin*; Vol. 113, No. 9, p. 1142–1160.

- Droop G. T. R., 1987. A General Equation for Estimating Fe^{3+} Concentrations in Ferromagnesian Silicates and Oxides from Microprobe Analyses, Using Stoichiometric Criteria. *Mineralogical Magazine*, Vol. 51, p. 431-435.
- Duebendorfer E. M., 2015. Refining the Early History of the Mojave-Yavapai Boundary Zone: Rifting versus Arc Accretion as Mechanisms for Paleoproterozoic Crustal Growth in Southwestern Laurentia. *The Journal of Geology*, Vol. 123, No 1, p. 21-37.
- Eby G. N., 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, Vol. 26, p. 115-134.
- Enríquez-Castillo, M. A.; Iriondo A., Chávez-Cabello G. & Kunk, M. J., 2009, Interacción termal entre magmas graníticos laramídicos y rocas encajonantes mesoproterozoicas-termocronología de intrusivos de la Sierrita Blanca, NW Sonora: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 61, No 3, p. 451-483.
- Ernst, R.E., & Buchan, K.L., 2001, The use of mafic dike swarms in identifying and locating mantle plumes, in Ernst, R.E., and Buchan, K.L., eds., *Mantle Plumes: Their Identification Through Time*: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 352, p. 247–265.
- Espinoza I., Iriondo A., Premo V. & Valencia M., 2003. Geochemistry and SHRIMP UPB Zircon geochronology of anorthositic rocks at Sierra El Tecolote in the Caborca Block, northwestern Sonora: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, Vol. 35, Núm. 5, p. 84.
- Farmer G. L., Bowring S. A., Matzel J., Espinosa-Maldonado G., Fedo C. & Wooden J., 2005. Paleoproterozoic Mojave province in northwestern Mexico? Isotopic and U-Pb zircon geochronologic studies of Precambrian and Cambrian crystalline and

sedimentary rocks, Caborca, Sonora. Geological Society of America, Special Paper 393.

Foster M. D., 1962. Interpretation of the Composition and a Classification of the Chlorites. Geological Survey Professional Paper 414-A, 38 pp.

Franco-Rubio M., Oviedo A., Contreras-Prieto A. E., Olivas-Palacios M. F., 2019. Tectónica de la Formación Plomosas en Chihuahua, México. XXIX CONGRESO NACIONAL DE GEOQUÍMICA, Actas INAGEQ Vol. 25 ISSN-Latindex 2310-2799 Centro de Investigación y Centro de Estudios Superiores de Ensenada.

Frost B. R. & Frost C. D., 2008. A Geochemical Classification for Feldspathic Igneous Rocks. *Journal of Petrology*, p. 1-15.

Frost C. D. & Frost B. R., 2010. On Ferroan (A-type) Granitoids: their Compositional Variability and Modes of Origin. *Journal of Petrology*, Vol. 52, No 1, p. 39-53.

Frost C. D. & Frost B. R., 2013. Proterozoic ferroan feldspathic magmatism. *Precambrian Research* 228, p. 151-163.

Gill R., 2010. *Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide*. Wiley-Blackwell. ISBN 978-1-4443-3065-6.

González-Becuar E., Pérez-Segura E., Vega-Granillo R., Solari L., González-León C. M., Solé J. & López-Martínez, M., 2017. Laramide to Miocene syn-extensional plutonism in the Puerta del Sol area, central Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 34, No 1, p. 45-61,

- González-León C. M., Solari L., Solé J., Ducea M. N., Lawton T. F., Bernal J. P., González-Becuar E., Gray F., López-Martínez M. & Lozano-Santacruz R., 2011. Stratigraphy, geochronology, and geochemistry of the Laramide magmatic arc in north-central Sonora, Mexico. *Geosphere*, Vol. 7, No. 6, p. 1392–1418.
- Goodge J. W. & Vervoort J. D., 2006. Origin of Mesoproterozoic A-type Granites in Laurencia: Hf Isotope Evidence. *Earth and Planetary Science Letters*; Vol. 243, p. 711–731.
- Grevenikov A. V., 2014. A-type granites and related rocks: petrogenesis and classification. *Russian Geology and Geophysics* 55, p. 1074–1086.
- Guitreau S. B. Mukasa J., Blichert-Toft M.F & Fahnestock, 2016. Pikes Peak batholith (Colorado, USA) revisited: A SIMS and LA-ICP-MS study of zircon U-Pb ages combined with solution Hf isotopic compositions, *Precambrian Research*, Vol 280, p. 179-194.
- Haenggi, W.T., 2001. Tectonic history of the Chihuahua trough, Mexico and adjacent USA, Part I: the pre-Mesozoic setting. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo LIV, p. 28-66.
- Hammond J. G., 1986. Geochemistry and petrogenesis of Proterozoic diabase in the southern Death Valley region of California. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 93, p. 312-321.
- Heaman L. M. & Grotzinger J. P., 1992. 1.08 Ga diabase sills in the Pahrump Group, California: Implications for development of the Cordilleran miogeocline. *Geology*, Vol. 20, p. 637-640,

- Hollings P., Smyk M., Heaman L. M. & Halls H., 2010. The geochemistry, geochronology and paleomagnetism of dikes and sills associated with the Mesoproterozoic Midcontinent Rift near Thunder Bay, Ontario, Canada. *Precambrian Research* 183, p. 553-571.
- Hollocher K., Robinson P., Walsh E. & Roberts D., 2012. Geochemistry of Amphibolite-Facies Volcanics and Gabbros of the Støren Nappe in Extensions West and Southwest of Trondheim, Western Gneiss Region, Norway: A Key to Correlations and Paleotectonic Settings. *American Journal of Science*, Vol. 312, p. 357–416.
- Howard K. A., 1991. Intrusion of Horizontal Dikes' Tectonic Significance of Middle Proterozoic Diabase Sheets Widespread in the Upper Crust of the Southwestern United States. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, No B7, p. 461-478.
- Iriondo, A. & Premo, W.R., 2011, Las rocas cristalinas proterozoicas de Sonora y su importancia para la reconstrucción del margen continental SW de Laurentia—La pieza mexicana del rompecabezas de Rodinia, in Calmus, Thierry, ed., *Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 2, p. 25–55.*
- Iriondo, A., Premo W. R., Martínez-Torres L. M., Budahn J. R., Atkinson W. W., Siems D. F. & Guarás-González B., 2004. Isotopic, geochemical, and temporal characterization of Proterozoic basement rocks in the Quitovac region, northwestern Sonora, Mexico: Implications for the reconstruction of the southwestern margin of Laurentia. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 116, No 1, p. 154-170.
- Iriondo A., Kamenov, G. D. & Foster, D. A., 2008. The Sierra Los Tanques ~1.1 Ga granite in NW Sonora—another example of Mesoproterozoic plutonism along the Mexican

Yavapai Province: Joint Annual Meeting, Geological Society of America Abstracts with Programs, Vol. 40, No 6, p. 144 (resumen).

Irvine, T. N. & Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. Canadian Journal of Earth Science, Vol. 8, p. 523-548.

Izaguirre, A., Iriondo A., Wooden, J. L., Budahn J. R. & Schaaf P., 2008. Paleoproterozoic orthogneisses from the Cerro Prieto area—a new addition to the Mexican Yavapai province in NW Sonora: Joint Annual Meeting, Geological Society of America Abstracts with Programs, Vol. 40, No 6, p. 143–144.

Janousek V., Colin M. Farrow C. M. & Vojtech Erban V., 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). Journal of Petrology, Vol. 47, No 6, p. 1255-1259.

Larson E. E., Patterson P. E. & Mutschler F. E., 1995. Lithology, chemistry, age, and origin of the Proterozoic Cardenas Basalt, Grand Canyon, Arizona. Precambrian Research, 65, p. 255-276.

Lawton T. F., Cashman P. H., Trexler J. H. & Taylor W. J., 2017. The late Paleozoic Southwestern Laurentian Borderland. Geology, Vol. 45, No 8, P. 675–678.

Le Bas M. J., Le Maitre E. W., Streckeisen A. & Zanettin B., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. Journal of Petrology, Vol. 27, No. 3, p. 745–750.

Le Maitre E. W., 1976. Some Problems of the Projection of Chemical Data into Mineralogical Classifications. Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol. 56, p. 181-189.

- Leake B., Woolley A., Arps C., Birch W., Gilbert C., Grice J., Hawthorne F., Kato A., Kisch, H., Vladimir K., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W., Nickel E., Rock N., Schumacher J., Smith D., Stephenson N. & Guo Y., (1997). Nomenclature of amphiboles; Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *American Mineralogist*, Vol. 35; p. 219-246.
- Li Y., Barnes M.A., Barnes C.G. & Frost C.D., 2007. Grenville-age A-type and related magmatism in southern Laurentia, Texas and New Mexico, U.S.A. *Lithos*, Vol 97, Issue 1-2, p 58-87.
- Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Flitzsimons I.C.W., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs, J., Karlstrom K. E., Lu S., Natapov L.M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K. & Vernikovsky V., 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Research* 160, p. 179–210.
- Lidiak E. G., Denison R. E. & Stern R. J., 2014. Cambrian (?) Mill Creek diabase dike swarm, eastern Arbuckles: A Glimpse of Cambrian rifting in the Southern Oklahoma Aulacogen. *Oklahoma Geological Survey Guidebook* 38.
- Lui S., Feng C., Jahn B., Hu R., Gao S., Coulson I. M., Feng G., Lai S., Yang C. & Yang Y., 2013. Zircon U–Pb age, geochemical, and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on the origin of mafic dykes in the Shaanxi Province, North China Craton, China. *Lithos*, Vol. 175-176, p. 244-254.
- McAnulty Jr. W. N. Precambrian Rocks of The Fusselman Canyon Area. In Lemone D. V., 1968. *The General Geology of the Franklin Mountains, El Paso County, Texas*. El Paso

Geological Society and Permian Basin Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Guidebook.

Miall A. D. & Blakey R. C., 2019. The Phanerozoic Tectonic and Sedimentary Evolution of North America (Capitulo 1). The Sedimentary Basins of the United States and Canada (Second Edition), 2019; p. 1-38.

Middlemost E. A. K., 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, Vol. 77, p. 19-26.

Middlemost E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*. Vol. 37, p. 215-244.

Morimoto N., Fabries J., Ferguson A. K., Ginzburg I. V., Ross M., Seifert F. A., Zussman J., Aoki K. & Gottardi G., 1998. Nomenclature of Piroxenes. *American Mineralogist*, Vol. 73, p. 1123-1133.

Mosher S., 1998. Tectonic evolution of the southern Laurentian Grenville orogenic belt. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 110, No. 11, p. 1357–1375.

Mosher S., Levine J. S. F. & Carlson W. D., 2008. Mesoproterozoic plate tectonics: A collisional model for the Grenville-aged orogenic belt in the Llano uplift, central Texas. *Geology*, Vol. 36, No 1, p. 55-58.

Mulder J. A., Karlstrom K. E., Fletcher K., Timmons M. T., Crossey L. J., Gehrels G. E. & Pecha M., 2016. The syn-orogenic sedimentary record of the Grenville Orogeny in southwest Laurentia. *Precambrian Research*, Vol. 294, p. 33-52.

- Mullen E. D., 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 62, p.53-62
- Nicholson S. W., Shirey S. B., Schulz K. J. & Green J. C., 1992. Rift-wide correlation of 1.1 Ga Midcontinent rift system basalts: implications for multiple mantle sources during rift development. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 34, p. 504-520.
- Nourse J. A., Premo W. R., Iriondo A. & Stahl E. R., 2005. Contrasting Proterozoic basement complexes near the truncated margin of Laurentia, northwestern Sonora–Arizona international border region. *Geological Society of America Special Paper* 393.
- O'Connor, J.T., 1965. A classification of quartz rich igneous rock based on feldspar ratios. *United States Geological Survey professional papers*, 525-B, pp.79-84.
- Olsson J. R., Klausen M. B., Hamilton M. A., Marz N., Soder-Lund U. & Roberts R. J., 2016. Baddeleyite U–Pb ages and geochemistry of the 1875–1835 Ma Black Hills Dyke Swarm across north-eastern South Africa: part of a trans-Kalahari Craton back-arc setting?. *Journal of the Geological Society of Sweden (GFF)*, Vol. 138, No 1, p. 115-132.
- Orozco Garza A., Dostal J., Keppie J. D. & Paz-Moreno F. A., 2013. Mid-Tertiary (25–21 Ma) lamprophyres in NW Mexico derived from subduction-modified subcontinental lithospheric mantle in an extensional backarc environment following steepening of the Benioff zone. *Tectonophysics*, Vol. 590, p. 59–71.
- Pearce J. A. & Stern R. J., 2016. Origin of Back-Arc Basin Magmas: Trace Element and Isotope Perspectives. *Geophysical Monograph Series* 166.

- Pearce J. A., Harris N. B. W. & Tindle A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, Vol. 25, No 4, p. 956-983.
- Pearce J. A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, Vol. 100, p. 14-48.
- Peccerillo A. & Taylor S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 58, p. 63-81.
- Peck W. H., Selleck B. W., Wong M. S., Chiarenzelli J. R., Harpp K. S., Hollocher K., Lackey J. S., Catalano J., Regan S. P. & Stocker A., 2013. Orogenic to postorogenic (1.20–1.15 Ga) magmatism in the Adirondack Lowlands and Frontenac terrane, southern Grenville Province, USA and Canada. *Geosphere*, Vol. 9, No. 6, p. 1637-1663.
- Pourteau A., Doucet L. S., Blereau E. R., Volante S., Johnson T. E., Collins W. J., Zheng-Xiang L. & Champion D. C., 2020. TTG generation by fluid-fluxed crustal melting: Direct evidence from the Proterozoic Georgetown Inlier, NE Australia. *Earth and Planetary Science Letters* 550.
- Prante M. R., 2009. Paleoproterozoic Deformation and Metamorphism in the Peacock Mountains, Northwest Arizona: Implications for Paleoproterozoic Tectonics. Master of Science Thesis. Northern Arizona University, pp. 101.
- Raisz, E., 1964. Landforms of Mexico (mapa en escala 1:3 000 000), Cambridge, Mass. (publicación anterior en 1959).

Riddle C., 1993. Analysis of Geological Materials, 1ra Edición, Marcel Dekker Inc. ISBN-10: 0824791320.

Rieder M., Cavazzini, G., Yakonov Y., Frank-Kamenetskii V., Gottardi G., Guggenheim S., Koval P., Müller G., Neiva A., Radoslovich E., Robert, J. L., Sassi F., Takeda H., Weiss Z. & Wones D., (1998). Nomenclature of the micas. American Mineralogist, Vol. 36; pp.- xx-xx.

Rodríguez-Castañeda J. L., 1988. Estratigrafía de la Región de Tuape, Sonora. Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista. Vol. 7, No 1, p. 52-66.

Rodríguez-Castañeda J. L., 1990. Relaciones Estructurales en la Parte Centroseptentrional del Estado de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México. Revista Mexicana de Ciencias geológicas, Vol. 9, No 1, p. 51-61.

Rodríguez-Castañeda J. L., 1994. Geología del Área El Teguachi, Estado de Sonora, México. Revista Mexicana de Ciencias geológicas, Vol. 11, No 1, p. 11-28.

Rodríguez-Castañeda J. L., 1996. Late Jurassic and Mid-Tertiary Brittle-Ductile Deformation in the Opodepe Region, Sonora, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 13, No 1, p. 1-9.

Rogers C., Cousens B., Ernst R. E. & Sonderlund U., 2018. Phosphorus and Potassium Metasomatic Enrichment in the Mantle Source of the c. 1450–1425Ma Michael–Shabogamo Gabbro of Eastern Laurentia. Journal of Petrology, Vol. 60, No. 1, p. 57–84.

Rollison H. & Peace V., 2021. Using Geochemical Data to Understand Geological Processes. Cambridge University Press. Segunda edición.

- Saccani E., 2015. A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematics. *Geoscience Frontiers*.
- Sarmiento-Villagrana A., Vega-Granillo R., Talavez-Mendoza O., Salgado-Souto S. A. & Gómez-Landa J., 2018. Geochemical and isotopic study of Mesozoic magmatism in the Sonobari Complex, western Mexico: Implications for the tectonic evolution of southwestern North America. *Geosphere*, Vol. 14, No 1, p. 304-324.
- Saunders A. D., Storey M., Kent R. W. & Norry M. J. Consequences of plume-lithosphere interactions. en Storey, B. C., Alabaster, T. & Pankhurst, R. J., 1992. *Magmatism and the Causes of Continental Break-up*. Geological Society Special Publication No 68, p. 41-60.
- Seifert K. E., Peterman Z. E. & Thieben S. E., 1992. Possible crustal contamination of Midcontinent Rift igneous rocks: examples from the Mineral Lake intrusions, Wisconsin. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 29, p. 1140- 1153.
- Seymour K. & Kumarapeli P. S., 1995. Geochemistry of the Grenville Dyke Swarm: role of plume-source mantle in magma genesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 120, p. 29-41.
- Shand S. J., 1943. *Eruptive Rocks*. London: Murby; and New York: Wiley, 1943. *Geological Magazine*, Vol. 81, No. 3, p. 137-138.
- Shannon W. M., Barnes C. G. & Bickford M. E., 1997. Grenville Magmatism in West Texas: Petrology and Geochemistry of the Red Bluff Granitic Suite. *Journal of Petrology*, Vol. 38, No 10, p. 1279-1305.

- Siwiec B. R., 2003. Tectonic Implications of Paleoproterozoic Structure and Metamorphism in the Northern Hualapai Mountains, Mohave County, Arizona. Master of Science Thesis, Northern Arizona University, pp. 103.
- Smith T. E. & Holm P. E., 1990. The geochemistry and tectonic significance of pre-metamorphic minor intrusions of the Central Metasedimentary Belt, Grenville Province, Canada. *Precambrian Research*, Vol. 48, p. 341-360.
- Smith D. R., Barnes C., Shannon W., Roback R. & James E., 1997. Petrogenesis of Mid-Proterozoic granitic magmas: examples from central and west Texas. *Precambrian Research*, Vol. 85, p. 53-79.
- Smith, D. R., Wobus, R. A., Noblett, J. B., Unruh, D., & Chamberlain, K., 1999. A review of the pikes peak batholith, front range, central Colorado: A 'type example' of A-type granitic magmatism. *Rocky Mountain. Geology*, Vol. 34, No 2, p. 93-116.
- Smith R. K., Gray W., Gibbs T. & Gallegos M. A., 2010. Petrogenesis of Mesoproterozoic granitic plutons, eastern Llano Uplift, central Texas, USA. *Lithos*, Vol. 118, p. 238-254.
- Srivastava R. K., Ernst R. E. & Peng P., 2019. *Dyke Swarms of the World: A Modern Perspective*. Springer Geology, ISBN 978-981-13-1666-1
- Stephens, W.E., 1988, *Reconnaissance Geology of the Cucurpe Region, North- Central Sonora, Mexico* [M.S. thesis]: Pittsburgh, University of Pittsburgh, 317 p.
- Sun S. & McDonough W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society London, Special Publications*, Vol. 42, p. 313-345.

- Verma S. P., Torres-Alvarado I. S. & Velasco-Tapia F., 2003. A revised CIPW norm. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, Vol. 83, p. 197-216.
- Whalen J. B., Currie K. L. & Chappell B. W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol. 95, p. 407-419.
- Whitmeyer S. J. & Kalstrom K. E., 2007. Tectonic model for the Proterozoic growth of North America. Geosphere, Vol. 3, No 4, p. 220-259.
- Zheng Y. F., 2019. Subduction zone geochemistry. Geoscience Frontier, Vol. 10, 1223-1254.

ANEXO I
RESULTADOS DE
ANÁLISIS QUÍMICOS

Elementos Mayores y norma CIPW

| | Diques | | | | | | | | | |
|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|
| | P-60b | P-43 | P-47 | P-50 | P-52 | P-53 | P-54 | P-55 | P-60 | P-61 |
| SiO2 | 50.80 | 48.58 | 50.00 | 50.31 | 51.83 | 49.71 | 51.65 | 51.86 | 51.16 | 51.46 |
| Al2O3 | 13.29 | 14.59 | 13.11 | 16.26 | 13.83 | 12.76 | 13.29 | 14.37 | 13.76 | 13.45 |
| Fe2O3T | 16.80 | 15.05 | 17.07 | 11.37 | 16.84 | 18.14 | 17.83 | 16.01 | 17.07 | 17.37 |
| CaO | 7.11 | 9.08 | 7.53 | 10.91 | 5.65 | 6.68 | 6.40 | 7.41 | 7.34 | 5.63 |
| MgO | 4.37 | 7.30 | 5.86 | 7.08 | 4.37 | 4.73 | 5.43 | 5.46 | 4.63 | 4.51 |
| Na2O | 3.75 | 2.41 | 2.87 | 1.97 | 2.89 | 2.92 | 2.48 | 3.42 | 3.99 | 3.76 |
| K2O | 0.92 | 0.97 | 0.90 | 2.21 | 1.90 | 1.49 | 1.29 | 1.04 | 1.04 | 1.40 |
| TiO2 | 2.07 | 1.25 | 1.60 | 0.46 | 2.02 | 1.55 | 1.62 | 1.18 | 2.07 | 1.66 |
| MnO | 0.26 | 0.23 | 0.23 | 0.22 | 0.27 | 0.23 | 0.23 | 0.25 | 0.28 | 0.25 |
| P2O5 | 0.58 | 0.15 | 0.24 | 0.06 | 0.58 | 0.24 | 0.25 | 0.15 | 0.56 | 0.26 |
| total | 99.95 | 99.61 | 99.41 | 100.85 | 100.18 | 98.45 | 100.47 | 101.15 | 101.90 | 99.75 |
| Fe2O3* | 5.37 | 4.26 | 5.04 | 3.48 | 5.46 | 5.65 | 5.31 | 5.06 | 5.63 | 5.79 |
| FeO* | 10.28 | 9.71 | 10.83 | 7.10 | 10.24 | 11.24 | 11.27 | 9.85 | 10.30 | 10.42 |
| FeOT* | 15.12 | 13.54 | 15.36 | 10.23 | 15.15 | 16.32 | 16.04 | 14.41 | 15.36 | 15.63 |
| #mg | 24.80 | 36.84 | 29.58 | 43.63 | 24.88 | 24.61 | 27.21 | 30.06 | 25.87 | 25.15 |
| Q | 3.31 | 0.00 | 2.88 | 0.00 | 6.65 | 3.12 | 6.68 | 1.98 | 1.25 | 2.96 |
| C | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Or | 5.44 | 5.73 | 5.32 | 13.06 | 11.23 | 8.81 | 7.62 | 6.15 | 6.15 | 8.27 |
| Ab | 31.73 | 20.39 | 24.29 | 16.67 | 24.45 | 24.71 | 20.99 | 28.94 | 33.76 | 31.82 |
| An | 16.71 | 26.13 | 20.23 | 29.00 | 19.15 | 17.31 | 21.32 | 20.79 | 16.56 | 15.69 |
| Di | 12.25 | 14.67 | 12.84 | 20.09 | 4.22 | 11.87 | 7.29 | 12.37 | 13.39 | 8.75 |
| Hy | 16.32 | 20.12 | 21.76 | 8.58 | 20.25 | 19.71 | 23.97 | 19.92 | 16.27 | 18.97 |
| Ol | 0.00 | 2.60 | 0.00 | 6.62 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mt | 7.79 | 6.18 | 7.31 | 5.05 | 7.92 | 8.19 | 7.70 | 7.34 | 8.16 | 8.40 |
| Il | 3.93 | 2.38 | 3.04 | 0.87 | 3.84 | 2.95 | 3.08 | 2.24 | 3.93 | 3.15 |
| Ap | 1.37 | 0.36 | 0.57 | 0.14 | 1.37 | 0.57 | 0.59 | 0.36 | 1.33 | 0.62 |
| Total | 98.84 | 98.55 | 98.23 | 100.07 | 99.08 | 97.22 | 99.25 | 100.07 | 100.80 | 98.62 |

Los valores con "*" fueron calculados como se indica en la metodología.

| | Granito | | | Granodiorita | |
|--------|---------|--------|--------|--------------|--------|
| | P-62 | P-29 | P-30 | P-27 | P-27b |
| SiO2 | 76.93 | 76.15 | 76.27 | 60.37 | 60.13 |
| Al2O3 | 11.47 | 12.31 | 11.82 | 16.04 | 17.49 |
| Fe2O3T | 2.92 | 2.23 | 2.96 | 8.74 | 8.28 |
| CaO | 0.06 | 0.09 | 0.07 | 5.37 | 3.53 |
| MgO | 0.27 | 0.23 | 0.45 | 2.97 | 3.10 |
| Na2O | 2.34 | 2.62 | 2.07 | 3.15 | 3.56 |
| K2O | 5.68 | 6.11 | 6.05 | 2.40 | 2.57 |
| TiO2 | 0.27 | 0.23 | 0.26 | 0.62 | 0.92 |
| MnO | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.17 | 0.16 |
| P2O5 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.16 | 0.26 |
| total | 99.99 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Fe2O3* | 1.60 | 1.18 | 1.62 | 5.33 | 4.94 |
| FeO* | 2.63 | 2.01 | 2.66 | 7.65 | 7.26 |
| FeOT* | 2.63 | 2.01 | 2.66 | 7.65 | 7.26 |
| #mg | 92.62 | 91.83 | 88.41 | 76.83 | 75.13 |
| Q | 39.77 | 35.98 | 38.91 | 13.98 | 14.48 |
| C | 1.46 | 1.27 | 1.81 | 0.00 | 3.06 |
| Or | 33.57 | 36.11 | 35.75 | 14.18 | 15.19 |
| Ab | 19.80 | 22.17 | 17.52 | 26.65 | 30.12 |
| An | 0.04 | 0.32 | 0.15 | 22.54 | 15.81 |
| Di | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.55 | 0.00 |
| Hy | 3.75 | 2.93 | 4.28 | 15.07 | 15.75 |
| Ol | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mt | 2.32 | 1.71 | 2.35 | 7.73 | 7.16 |
| Il | 0.51 | 0.44 | 0.49 | 1.18 | 1.75 |
| Ap | 0.10 | 0.05 | 0.07 | 0.38 | 0.62 |
| Total | 101.31 | 100.97 | 101.33 | 104.25 | 103.95 |

Los valores con “*” fueron calculados como se indica en la metodología.

Elementos Traza

| | Diques | | | | | | | | | |
|----|--------|------|-------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| | P-60b | P-43 | P-47 | P-50 | P-52 | P-53 | P-54 | P-55 | P-60 | P-61 |
| Ba | 214 | 426 | 264 | 456 | 709 | 624 | 564 | 289 | 226 | 564 |
| Ce | 49.3 | 14 | 25.1 | 15.3 | 44.2 | 30.5 | 30.5 | 11.1 | 45.8 | 31.4 |
| Cr | 50 | 290 | 50 | 190 | 60 | 40 | 40 | 20 | 60 | 20 |
| Cs | 11.05 | 6.09 | 7.07 | 3.34 | 19 | 21.7 | 13.1 | 8.47 | 7.23 | 15 |
| Dy | 8.38 | 5.51 | 6.26 | 2.72 | 8.72 | 7.72 | 7.12 | 4.12 | 8.87 | 7.45 |
| Er | 5.32 | 3.35 | 3.86 | 1.57 | 5.45 | 4.78 | 4.15 | 2.76 | 5.12 | 4.6 |
| Eu | 2.15 | 1.14 | 1.4 | 0.68 | 2.12 | 1.64 | 1.54 | 0.88 | 2.3 | 1.58 |
| Ga | 19.2 | 19.4 | 20.2 | 16.2 | 21.8 | 21.9 | 21.5 | 18.9 | 23.7 | 21.5 |
| Gd | 8.08 | 4.36 | 5.42 | 2.44 | 8.44 | 6.43 | 6.08 | 3.48 | 8.12 | 6.39 |
| Hf | 3.8 | 2.1 | 3.3 | 1.2 | 4 | 3.7 | 3.5 | 1.4 | 4.2 | 3.6 |
| Ho | 1.85 | 1.09 | 1.26 | 0.56 | 1.72 | 1.46 | 1.36 | 0.93 | 1.82 | 1.52 |
| La | 19.9 | 6.2 | 11.7 | 7.1 | 20.5 | 14.7 | 14.8 | 4.9 | 21.8 | 15.5 |
| Lu | 0.76 | 0.49 | 0.56 | 0.19 | 0.72 | 0.68 | 0.62 | 0.35 | 0.69 | 0.59 |
| Nb | 7.8 | 2.8 | 4 | 2 | 7.7 | 5 | 5 | 1.8 | 8 | 4.9 |
| Nd | 25.7 | 11.3 | 15.8 | 10.1 | 27.4 | 19.1 | 19.5 | 8 | 27.7 | 18.9 |
| Pr | 6.24 | 2.09 | 3.53 | 2.14 | 6.08 | 4.16 | 3.91 | 1.54 | 6.17 | 4.16 |
| Rb | 29.3 | 42.2 | 27.8 | 84.3 | 73.7 | 60.4 | 50 | 42.6 | 25 | 52.2 |
| Sm | 6.91 | 3.64 | 4.68 | 2.79 | 6.88 | 5.65 | 5.32 | 2.48 | 7.5 | 5.42 |
| Sn | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Sr | 179 | 202 | 173.5 | 227 | 163.5 | 168 | 203 | 186.5 | 224 | 208 |
| Ta | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 0.4 | 0.3 |
| Tb | 1.31 | 0.73 | 0.93 | 0.39 | 1.31 | 1.08 | 1.02 | 0.57 | 1.4 | 1.01 |
| Th | 4.13 | 0.7 | 2.06 | 0.67 | 4.13 | 2.92 | 2.78 | 0.77 | 4.5 | 3.2 |
| Tm | 0.76 | 0.49 | 0.6 | 0.21 | 0.72 | 0.67 | 0.65 | 0.38 | 0.77 | 0.67 |
| U | 1.3 | 0.22 | 0.63 | 0.28 | 1.12 | 0.87 | 0.85 | 0.26 | 1.32 | 0.91 |
| V | 326 | 288 | 369 | 254 | 295 | 397 | 390 | 355 | 303 | 390 |
| W | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 9 | 3 |
| Y | 50 | 29.4 | 34.5 | 14.3 | 48 | 39.5 | 37.3 | 22.7 | 47.3 | 39.8 |
| Yb | 4.86 | 3.19 | 4.02 | 1.6 | 5.54 | 4.54 | 4.07 | 2.63 | 5.13 | 4.07 |
| Zr | 152 | 63 | 109 | 32 | 145 | 124 | 122 | 49 | 145 | 128 |

| | Granito | | | Granodiorita | |
|----|---------|-------|-------|--------------|-------|
| | P-62 | P-29 | P-30 | P-27 | P-27b |
| Ba | 634 | 658 | 579 | 915 | 748 |
| Ce | 142.5 | 178 | 156.5 | 54.6 | 51.3 |
| Cr | 100 | 9 | 90 | 30 | 40 |
| Cs | 3.71 | 2.45 | 6.13 | 5.32 | 11.05 |
| Dy | 16.55 | 14.6 | 13.95 | 6.29 | 5.2 |
| Er | 10.6 | 8.98 | 9.1 | 3.79 | 2.95 |
| Eu | 1.39 | 1.59 | 1.36 | 1.82 | 1.55 |
| Ga | 21.7 | 21.5 | 22.2 | 18.2 | 19.2 |
| Gd | 15.3 | 14.45 | 13.35 | 6.33 | 5.04 |
| Hf | 14.1 | 12.1 | 13.7 | 2.7 | 3.2 |
| Ho | 3.42 | 3.03 | 2.91 | 1.32 | 1.01 |
| La | 81.8 | 81 | 80.3 | 25.3 | 23.7 |
| Lu | 1.39 | 1.27 | 1.25 | 0.58 | 0.43 |
| Nb | 33.8 | 28.5 | 32 | 8.8 | 9.6 |
| Nd | 76.1 | 69.4 | 72.3 | 26.3 | 24.6 |
| Pr | 19.45 | 20 | 18.7 | 6.94 | 6.37 |
| Rb | 211 | 258 | 229 | 80.6 | 102.5 |
| Sm | 16.35 | 15.95 | 15.55 | 6.64 | 5.91 |
| Sn | 7 | 6 | 8 | 2 | 2 |
| Sr | 15.5 | 12.3 | 9.2 | 292 | 305 |
| Ta | 2.2 | 1.9 | 2.2 | 0.5 | 0.6 |
| Tb | 2.52 | 2.31 | 2.05 | 1 | 0.83 |
| Th | 31.6 | 24.3 | 28.8 | 3.18 | 3.9 |
| Tm | 1.48 | 1.37 | 1.27 | 0.59 | 0.44 |
| U | 7.02 | 6.03 | 6.52 | 1.06 | 1.56 |
| V | 5 | 6 | 5 | 114 | 101 |
| W | 8 | 3 | 9 | 36 | 4 |
| Y | 95.2 | 85.8 | 74.7 | 36.1 | 28.6 |
| Yb | 9.76 | 8.4 | 8.53 | 3.69 | 2.77 |
| Zr | 461 | 479 | 445 | 108 | 128 |

**ANEXO II:
CORRELACIÓN DE
SPEARMAN**

Correlación de Spearman de las muestras de diques máficos

| | SiO2 | Al2O3 | Fe2O3 | CaO | MgO | Na2O | K2O | TiO2 | MnO | P2O5 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO2 | 1.000 | | | | | | | | | |
| Al2O3 | 0.164 | 1.000 | | | | | | | | |
| Fe2O3 | -0.218 | -0.709 | 1.000 | | | | | | | |
| CaO | -0.627 | 0.391 | -0.264 | 1.000 | | | | | | |
| MgO | -0.118 | 0.309 | -0.536 | 0.364 | 1.000 | | | | | |
| Na2O | 0.018 | -0.282 | 0.500 | -0.127 | -0.764 | 1.000 | | | | |
| K2O | 0.364 | 0.336 | -0.173 | -0.355 | 0.018 | -0.355 | 1.000 | | | |
| TiO2 | 0.009 | -0.382 | 0.527 | -0.291 | -0.836 | 0.745 | -0.382 | 1.000 | | |
| MnO | 0.118 | 0.082 | 0.245 | -0.118 | -0.800 | 0.800 | -0.264 | 0.827 | 1.000 | |
| P2O5 | 0.500 | -0.345 | 0.136 | -0.764 | -0.636 | 0.345 | 0.073 | 0.673 | 0.491 | 1.000 |
| Ba | 0.050 | 0.041 | 0.342 | -0.374 | -0.169 | -0.237 | 0.706 | -0.150 | -0.114 | -0.005 |
| Ce | 0.255 | -0.369 | 0.159 | -0.588 | -0.633 | 0.415 | 0.018 | 0.738 | 0.487 | 0.916 |
| Cr | -0.517 | 0.453 | -0.374 | 0.568 | 0.134 | -0.300 | -0.042 | 0.042 | 0.083 | -0.152 |
| Cs | 0.382 | -0.509 | 0.491 | -0.864 | -0.527 | 0.255 | 0.382 | 0.291 | 0.173 | 0.636 |
| Dy | 0.109 | -0.436 | 0.482 | -0.536 | -0.791 | 0.618 | -0.055 | 0.873 | 0.682 | 0.827 |
| Er | 0.055 | -0.500 | 0.518 | -0.509 | -0.864 | 0.591 | -0.091 | 0.882 | 0.673 | 0.827 |
| Eu | 0.073 | -0.482 | 0.473 | -0.509 | -0.782 | 0.645 | -0.127 | 0.882 | 0.673 | 0.818 |
| Ga | 0.278 | -0.369 | 0.296 | -0.702 | -0.132 | 0.082 | 0.214 | 0.305 | 0.068 | 0.597 |
| Gd | 0.164 | -0.409 | 0.391 | -0.600 | -0.773 | 0.545 | 0.027 | 0.809 | 0.636 | 0.882 |
| Hf | 0.373 | -0.364 | 0.100 | -0.727 | -0.382 | 0.245 | 0.100 | 0.527 | 0.309 | 0.891 |
| Ho | 0.109 | -0.482 | 0.436 | -0.545 | -0.818 | 0.655 | -0.155 | 0.900 | 0.691 | 0.855 |
| La | 0.291 | -0.282 | 0.255 | -0.600 | -0.691 | 0.473 | 0.082 | 0.800 | 0.582 | 0.891 |
| Lu | 0.027 | -0.555 | 0.518 | -0.464 | -0.827 | 0.564 | -0.173 | 0.882 | 0.636 | 0.809 |
| Nb | 0.319 | -0.387 | 0.077 | -0.661 | -0.323 | 0.150 | 0.064 | 0.519 | 0.232 | 0.861 |
| Nd | 0.264 | -0.327 | 0.218 | -0.573 | -0.564 | 0.318 | 0.027 | 0.736 | 0.491 | 0.891 |
| Pr | 0.205 | -0.401 | 0.173 | -0.569 | -0.629 | 0.415 | 0.032 | 0.715 | 0.465 | 0.902 |
| Rb | 0.364 | 0.218 | -0.273 | -0.427 | 0.200 | -0.555 | 0.918 | -0.555 | -0.491 | 0.055 |
| Sm | 0.164 | -0.391 | 0.209 | -0.555 | -0.591 | 0.427 | -0.018 | 0.736 | 0.500 | 0.882 |
| Sn | 0.598 | 0.060 | 0.000 | -0.538 | -0.120 | -0.120 | 0.299 | 0.299 | 0.179 | 0.598 |
| Sr | -0.236 | 0.400 | 0.045 | 0.464 | 0.000 | 0.236 | -0.055 | 0.073 | 0.200 | -0.455 |
| Ta | 0.405 | -0.428 | 0.070 | -0.721 | -0.456 | 0.237 | 0.060 | 0.558 | 0.293 | 0.940 |
| Tb | 0.100 | -0.469 | 0.487 | -0.506 | -0.761 | 0.579 | -0.100 | 0.870 | 0.651 | 0.815 |
| Th | 0.483 | -0.360 | 0.087 | -0.761 | -0.424 | 0.333 | 0.073 | 0.551 | 0.351 | 0.916 |
| Tm | 0.096 | -0.465 | 0.465 | -0.524 | -0.793 | 0.661 | -0.132 | 0.897 | 0.692 | 0.829 |
| U | 0.436 | -0.355 | 0.055 | -0.709 | -0.409 | 0.282 | 0.164 | 0.509 | 0.264 | 0.882 |
| V | -0.178 | -0.706 | 0.916 | -0.182 | -0.433 | 0.519 | -0.269 | 0.342 | 0.150 | -0.032 |
| W | 0.114 | -0.337 | 0.045 | -0.411 | -0.302 | 0.506 | -0.129 | 0.466 | 0.312 | 0.580 |
| Y | 0.164 | -0.455 | 0.345 | -0.609 | -0.800 | 0.582 | -0.073 | 0.836 | 0.645 | 0.909 |
| Yb | 0.068 | -0.469 | 0.542 | -0.492 | -0.834 | 0.583 | -0.077 | 0.888 | 0.679 | 0.806 |
| Zr | 0.387 | -0.405 | 0.050 | -0.756 | -0.424 | 0.260 | 0.027 | 0.547 | 0.314 | 0.934 |

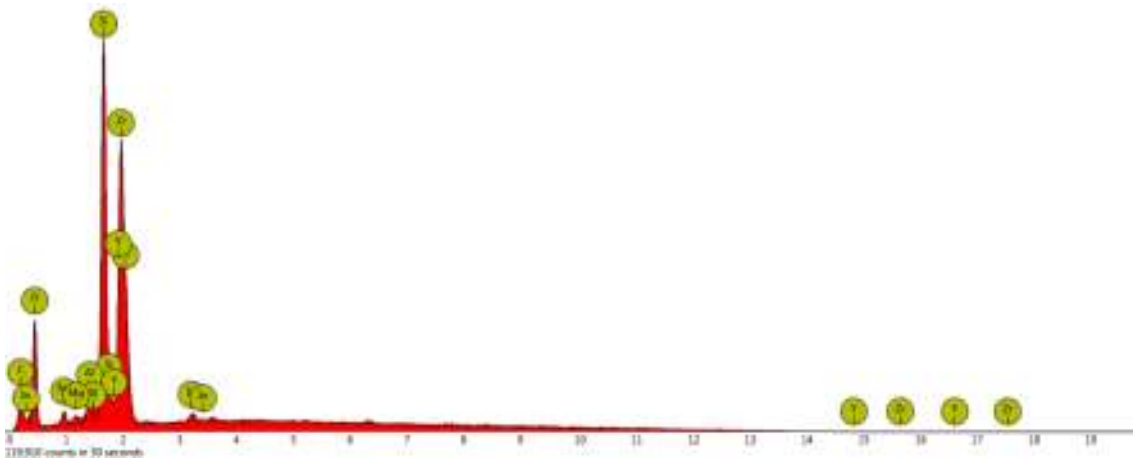
**ANEXO III:
RESULTADOS DEL
ANÁLISIS POR
MICROSONDA
ELECTRÓNICA (SEM)**

Resultados del Análisis SEM

| Lámina | Punto | Mineral identificado | Formula química | Observaciones |
|--------------|-------|----------------------|---|--|
| P-30 (1) | 1 | Circón | (Zr,Y,In) (Si,Al) O4 | trazas de itrio e indio |
| | 2 | Circón | (Zr,Y,In) (Si,Al) O4 | trazas de itrio e indio |
| | 3 | Circón | (Zr,Al,Fe) Si O4 | trazas de hierro |
| | 4 | Natroglaucionita | (Na,K) (Fe,Mg,Zr)3 (Si,Fe)4 O10 (OH,Br,Cl)2 | mica de capas deficientes con exceso de sodio (alteración) |
| | 5 | Esfena | (Fe,Mg) Ti Si O5 | reemplazamiento de calcio por hierro |
| | 6 | Óxido de Zn | Zn O | trazas de silice y titanio |
| | 7 | Rutilo | (Ti,Fe)O2 | mineral de titanio con trazas de hierro |
| | 8 | Cuarzo | Si O2 | trazas de aluminio y titanio |
| | 9 | Circón | (Zr,Al,Fe) Si O4 | trazas de hierro |
| | 10 | Leucoxeno | TiO2 | mineral de alteracion de ilmenita (con albita) |
| P-30 (2) | 1 | Circón | (Zr,Y,In) Si O4 | trazas de itrio e indio |
| | 2 | Leucoxeno | (Ti,Fe)O2 | reemplazamiento de calcio por hierro y trazas de indio |
| | 3 | Chamosita | (Na,k,Fe,Ca)6 (Si,Fe4) O10 (OH,Cl,Br)8 | clorita sin aluminio y exceso de hierro, mal análisis |
| | 4 | Ferroceldonita | (Fe,Na,Ca,K) (Fe,Ti)3 (Fe,Si,Ti,Al)4 O10 (OH,Cl)2 | Mica verdadera, sin magnesio |
| | 5 | Circón | (Zr,Y,In) Si O4 | trazas de itrio e indio |
| | 6 | Circón | (Zr,Y,In) Si O4 | trazas de itrio e indio |
| | 7 | Cuarzo | Si O2 | trazas de calcio |
| P-27b (3) | 1 | Illita | (K,Na) (Al,Ca,Mg,Fe)2 (Si,Al)4 O10 (OH)2 | mica de capas deficientes (alteración) |
| | 2 | Willemita | Zn2 (Si,Al,Fe) O4 | mineral secundario de esfalerita con trazas de hierro |
| | 3 | Ortoclasa | (K,Na) (Si,Al)4 O8 | feldespato con 57% de potasio |
| | 4 | Hematita | (Fe,Si,Al)2 O3 | trazas de cuarzo |
| | 5 | Illita | (Na,Ca) (Al,Mg,Fe)2 Si4 O10 (OH)2 | mica de capas deficientes (alteración) |
| | 6 | Ferrosilita | Fe (Fe,Mg,Ti) (Si,Fe)2 O6 | piroxeno de Magnesio y hierro con trazas de titanio |
| | 7 | Cuarzo | Si O2 | trazas de titanio |
| | 8 | Muscovita | K (Al,Ca,Na)3 (Al,Si)4 O10 (OH,Cl)2 | mica verdadera (alteración) |
| | 9 | Hematita | (Fe,Cr,Al,Ni)2 O3 | trazas de cromo y niquel |
| | 10 | Albita | (Na,Ca) (Al,Si)3 O8 | plagioclasa sódica (Na>90%) con trazas de ortoclasa |
| | 11 | No determinado | | |
| P-27b (4) | 1 | ClinoEnstatita | (Mg,Fe,Te) (Mg,Ti,Fe,Al) (Si,Al)2 O6 | piroxeno de magnesio con trazas de telurio |
| | 2 | Circón | (Zr,Nb,Fe) Si O4 | trazas de niobio y hierro |
| | 3 | Augita | (Fe,Na,Ca,K) (Al,Mg,Zr,Fe) (Si,Al)2 O6 | Porxeno cálcico con enriquecimiento en Fe sobre Mg |
| | 4 | Circón | (Zr,Tb,Fe) Si O4 | trazas de terbio |

| | | | | |
|-------------|---|-------------------------|---|--|
| | 5 | Delessita | $(\text{Fe,Mg,Na,Ca,Zr})_6 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH,Br,Cl})_8$ | clorita con trazas de Circónio, mal análisis |
| | 6 | Barroisita | $(\text{K,Na}) (\text{Na,Ca})_2 (\text{Fe,Mg,Zr,Al})_5 (\text{Si,Al})_8 (\text{OH,Cl})_2$ | anfíbol sódico-cálcico con trazas de Circónio |
| | 7 | Diabantita | $(\text{Fe,Mg,Na,Zr})_6 (\text{Si,Fe})_4 \text{O}_{10} (\text{OH,Cl,Br})_8$ | clorita sin Fe_2O_3 , trazas de Circónio. Mal análisis |
| | 8 | Hematita | $(\text{Fe,Si,Zr})_2 \text{O}_3$ | Trazas de sílice y Circónio |
| | 1 | Augita | $(\text{Ca,Fe}) (\text{Al,Fe,Mg}) (\text{Si,Al})_2 \text{O}_6$ | Piroxeno Cálcico |
| | 2 | Leucóxeno | $(\text{Ti,Fe})\text{O}_2$ | mineral de titanio con trazas de hierro y magnesio |
| P-15 (5) | 3 | Ferro-Aluminoceladonita | $(\text{K,Na}) (\text{Al,Mg,Fe})_2 (\text{Si,Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH,S,Cl})_2$ | mica verdadera (alteración) |
| | 4 | Augita | $(\text{Ca, Fe}) (\text{Mg,Al,Fe}) (\text{Si,Al})_2 \text{O}_6$ | Piroxeno Cálcico |

P-30 (1) 1. spot (1)



Disabled elements: Hg, Pt

Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

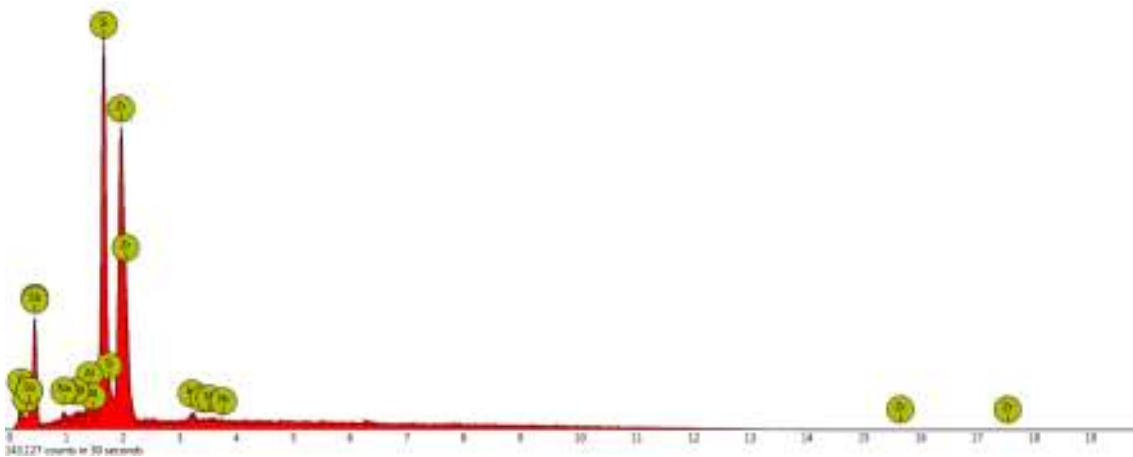
| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 13.0 | 0.0 |
| 40 | Zr | Zirconium | 37.4 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 24.0 | 0.1 |
| 39 | Y | Yttrium | 1.8 | 0.0 |
| 13 | Al | Aluminium | 1.2 | 1.0 |
| 6 | C | Carbon | 19.5 | 0.6 |
| 11 | Na | Sodium | 0.8 | 0.2 |
| 49 | In | Indium | 2.1 | 1.5 |
| 12 | Mg | Magnesium | 0.3 | 0.6 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 13.00 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 27.81 | SiO2 | 31.97 |
| Zr | 37.40 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 50.52 | ZrO2 | 58.07 |
| Y | 1.80 | 225.81 | 88.90 | 2.00 | 2.29 | Y2O3 | 2.63 |
| Al | 1.20 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 2.27 | Al2O3 | 2.61 |
| Na | 0.80 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 1.08 | Na2O | 1.24 |
| In | 2.10 | 277.64 | 114.81 | 2.00 | 2.54 | In2O3 | 2.92 |
| Mg | 0.30 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 0.50 | MgO | 0.57 |
| total | 56.60 | | | total | 86.99 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|--------|------|------|------|------|
| SiO2 | 31.97 | 60.08 | 0.53 | 1.06 | 1.95 | 0.97 |
| ZrO2 | 58.07 | 123.22 | 0.47 | 0.94 | 1.73 | 0.86 |
| Y2O3 | 2.63 | 225.81 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.04 |
| Al2O3 | 2.61 | 101.96 | 0.03 | 0.08 | 0.14 | 0.09 |
| Na2O | 1.24 | 61.98 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.07 |
| In2O3 | 2.92 | 277.64 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.04 |
| MgO | 0.57 | 40.30 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.03 |
| | | | | 2.18 | | 2.11 |

4 oxígenos
1.83

2. spot (2)



Disabled elements: Au

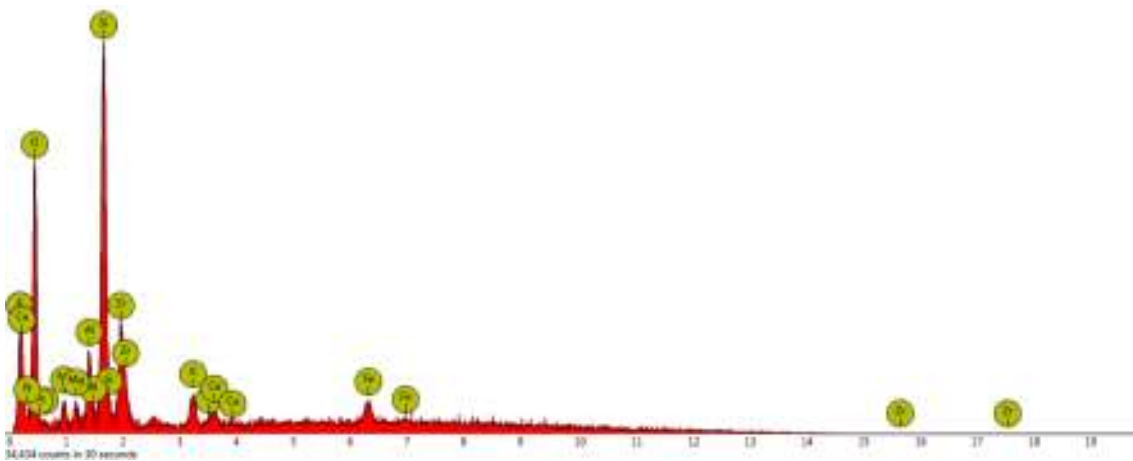
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 13.6 | 0.0 |
| 40 | Zr | Zirconium | 41.0 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 24.3 | 0.0 |
| 13 | Al | Aluminium | 1.2 | 5.7 |
| 6 | C | Carbon | 14.4 | 0.5 |
| 49 | In | Indium | 2.9 | 3.0 |
| 12 | Mg | Magnesium | 0.6 | 0.8 |
| 11 | Na | Sodium | 0.8 | 1.0 |
| 51 | Sb | Antimony | 1.2 | 4.9 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 13.60 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 29.09 | SiO2 | 31.51 |
| Zr | 41.00 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 55.38 | ZrO2 | 59.99 |
| Al | 1.20 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 2.27 | Al2O3 | 2.46 |
| Na | 0.80 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 1.08 | Na2O | 1.17 |
| In | 2.90 | 277.64 | 114.81 | 2.00 | 3.51 | In2O3 | 3.80 |
| Mg | 0.60 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 0.99 | MgO | 1.08 |
| total | 60.10 | | | total | 92.32 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|----------|------|------|------|------|
| SiO2 | 31.51 | 60.08 | 0.52 | 1.05 | 1.92 | 0.96 |
| ZrO2 | 59.99 | 123.22 | 0.49 | 0.97 | 1.79 | 0.89 |
| Al2O3 | 2.46 | 101.96 | 0.02 | 0.07 | 0.13 | 0.09 |
| Na2O | 1.17 | 61.98 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.07 |
| In2O3 | 3.80 | 277.64 | 0.01 | 0.04 | 0.08 | 0.05 |
| MgO | 1.08 | 40.30 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.05 |
| | | | | 2.18 | | 2.11 |
| | 4 | oxígenos | | | | |
| | | 1.83 | | | | |

3. spot (3)



Disabled elements: C, Sb

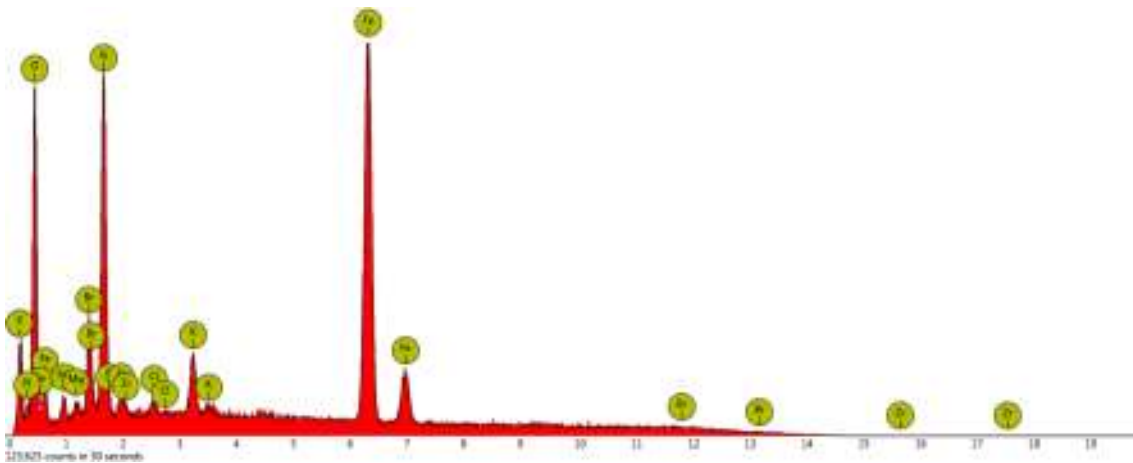
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 15.2 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 43.7 | 0.2 |
| 40 | Zr | Zirconium | 15.7 | 0.0 |
| 13 | Al | Aluminium | 3.7 | 0.2 |
| 19 | K | Potassium | 2.3 | 1.0 |
| 26 | Fe | Iron | 5.7 | 0.6 |
| 11 | Na | Sodium | 2.1 | 1.3 |
| 12 | Mg | Magnesium | 1.4 | 0.8 |
| 20 | Ca | Calcium | 1.3 | 0.8 |
| 7 | N | Nitrogen | 8.7 | 2.3 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 15.20 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 32.52 | SiO2 | 40.68 |
| Zr | 15.70 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 21.21 | ZrO2 | 26.53 |
| Al | 3.70 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 6.99 | Al2O3 | 8.75 |
| K | 2.30 | 84.20 | 39.10 | 2.00 | 2.48 | K2O | 3.10 |
| Fe | 5.70 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 7.33 | FeO | 9.17 |
| Na | 2.10 | 61.98 | 22.99 | 1.00 | 5.66 | NaO | 7.08 |
| Mg | 1.40 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 2.32 | MgO | 2.90 |
| Ca | 1.30 | 44.01 | 40.08 | 1.00 | 1.43 | CaO | 1.79 |
| total | 47.40 | | | total | 79.93 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|-------|--------|------|------|------|------|
| SiO2 | 40.68 | 60.08 | 0.68 | 1.35 | 2.01 | 1.01 |
| ZrO2 | 26.53 | 123.22 | 0.22 | 0.43 | 0.64 | 0.32 |
| Al2O3 | 8.75 | 101.96 | 0.09 | 0.26 | 0.38 | 0.26 |
| K2O | 3.10 | 84.20 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.11 |
| FeO | 9.17 | 71.85 | 0.13 | 0.38 | 0.57 | 0.38 |
| NaO | 7.08 | 61.98 | 0.11 | 0.11 | 0.17 | 0.17 |
| MgO | 2.90 | 40.30 | 0.07 | 0.07 | 0.11 | 0.11 |
| CaO | 1.79 | 44.01 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.06 |
| | | | | 2.69 | 2.41 | |
| 4 oxígenos | | | | | | 1.49 |

4. spot (4)



Disabled elements: C, Pt

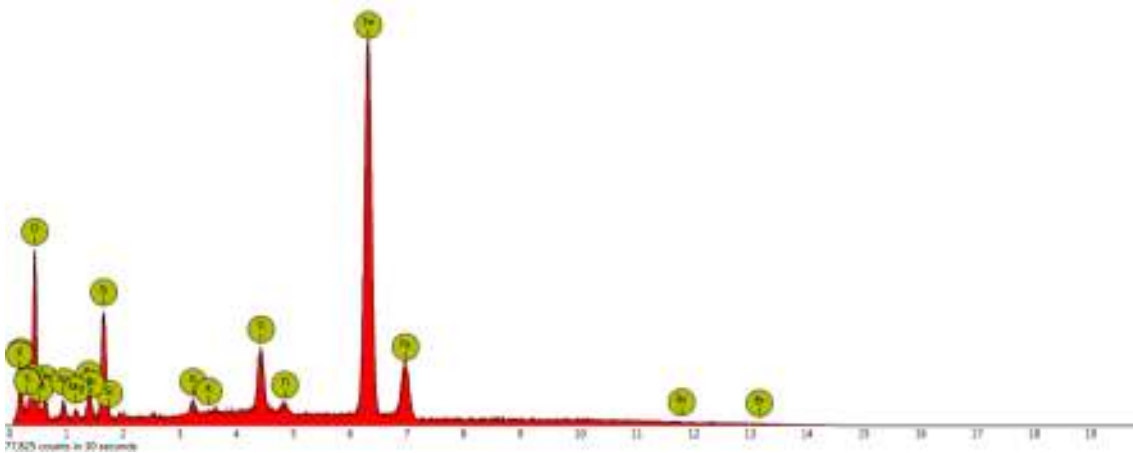
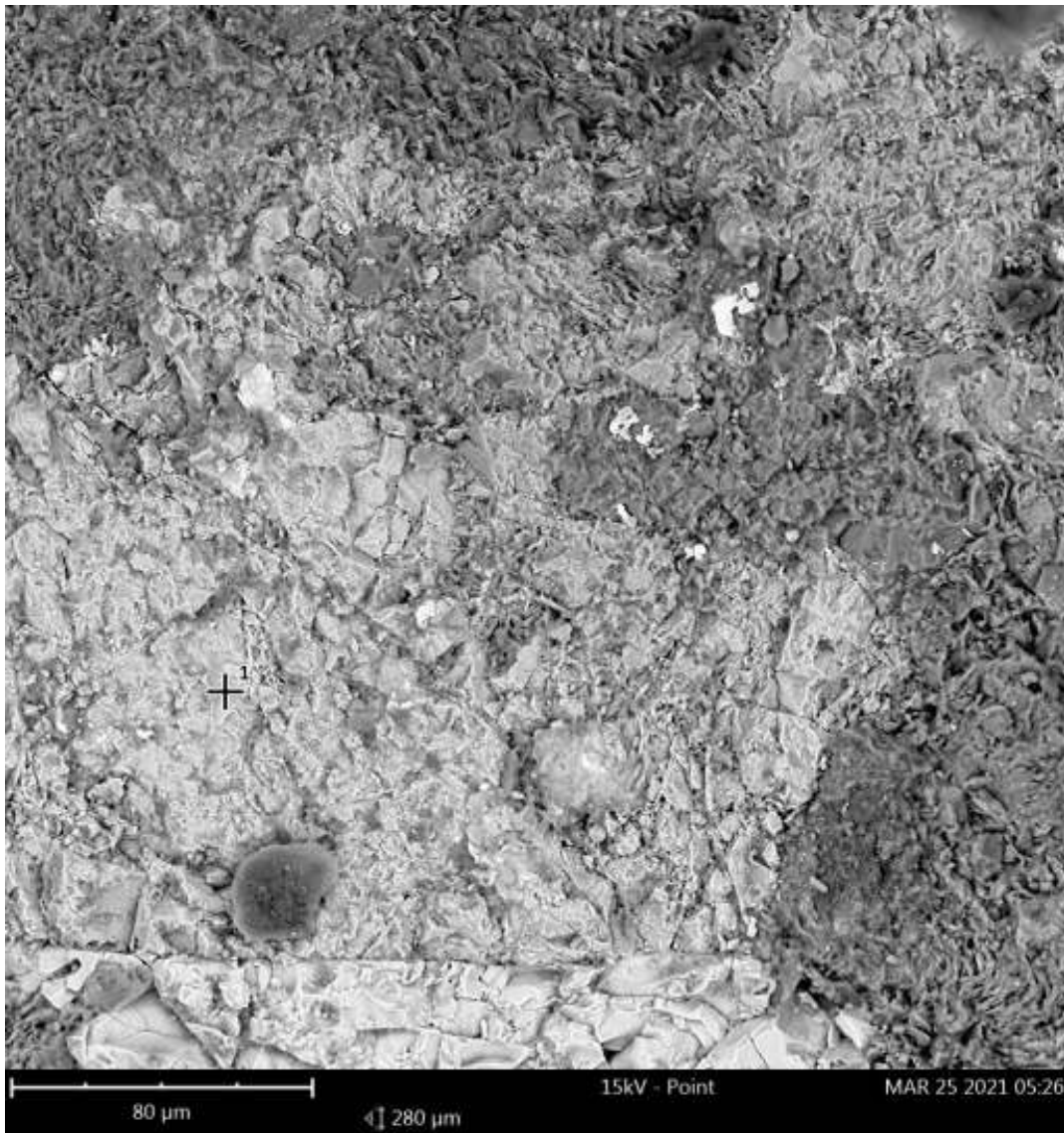
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 26 | Fe | Iron | 52.3 | 0.0 |
| 14 | Si | Silicon | 10.1 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 19.3 | 0.1 |
| 35 | Br | Bromine | 8.3 | 0.0 |
| 19 | K | Potassium | 2.2 | 0.2 |
| 40 | Zr | Zirconium | 1.9 | 0.0 |
| 11 | Na | Sodium | 1.4 | 0.3 |
| 17 | Cl | Chlorine | 0.5 | 1.3 |
| 7 | N | Nitrogen | 3.4 | 1.4 |
| 12 | Mg | Magnesium | 0.6 | 0.7 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Fe | 52.30 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 67.29 | FeO | 63.77 |
| Si | 10.10 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 21.61 | SiO2 | 20.48 |
| Br | 8.30 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 8.30 | Br | 7.87 |
| K | 2.20 | 84.20 | 39.10 | 2.00 | 2.37 | K2O | 2.25 |
| Zr | 1.90 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 2.57 | ZrO2 | 2.43 |
| Na | 1.40 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 1.89 | Na2O | 1.79 |
| Cl | 0.50 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 0.50 | Cl | 0.47 |
| Mg | 0.60 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 0.99 | MgO | 0.94 |
| total | 77.30 | | | total | 105.51 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|-------|----------|------|------|------|------|
| FeO* | 27.08 | 71.85 | 0.38 | 0.38 | 2.02 | 2.02 |
| Fe2O3* | 40.78 | 159.69 | 0.26 | 0.77 | 4.10 | 2.73 |
| SiO2 | 20.48 | 60.08 | 0.34 | 0.68 | 3.65 | 1.82 |
| Br | 7.87 | 79.90 | 0.10 | 0.10 | 0.53 | 0.53 |
| K2O | 2.25 | 84.20 | 0.03 | 0.03 | 0.14 | 0.29 |
| ZrO2 | 2.43 | 123.22 | 0.02 | 0.04 | 0.21 | 0.11 |
| Na2O | 1.79 | 61.98 | 0.03 | 0.03 | 0.15 | 0.31 |
| Cl | 0.47 | 35.45 | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 0.07 |
| MgO | 0.94 | 40.30 | 0.02 | 0.02 | 0.13 | 0.13 |
| | | | | 2.05 | | 8.00 |
| | 11 | oxígenos | | | | |
| | | 5.35 | | | | |

1. spot (5)



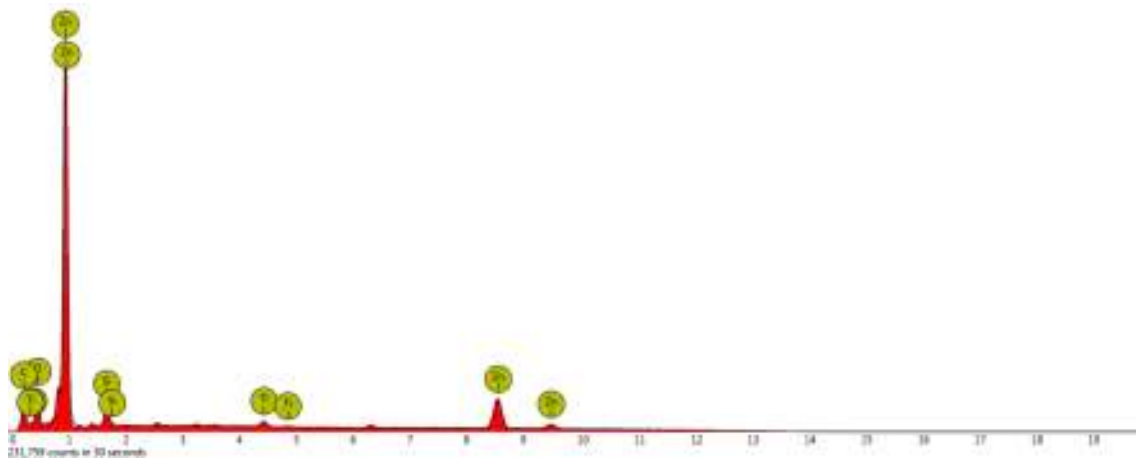
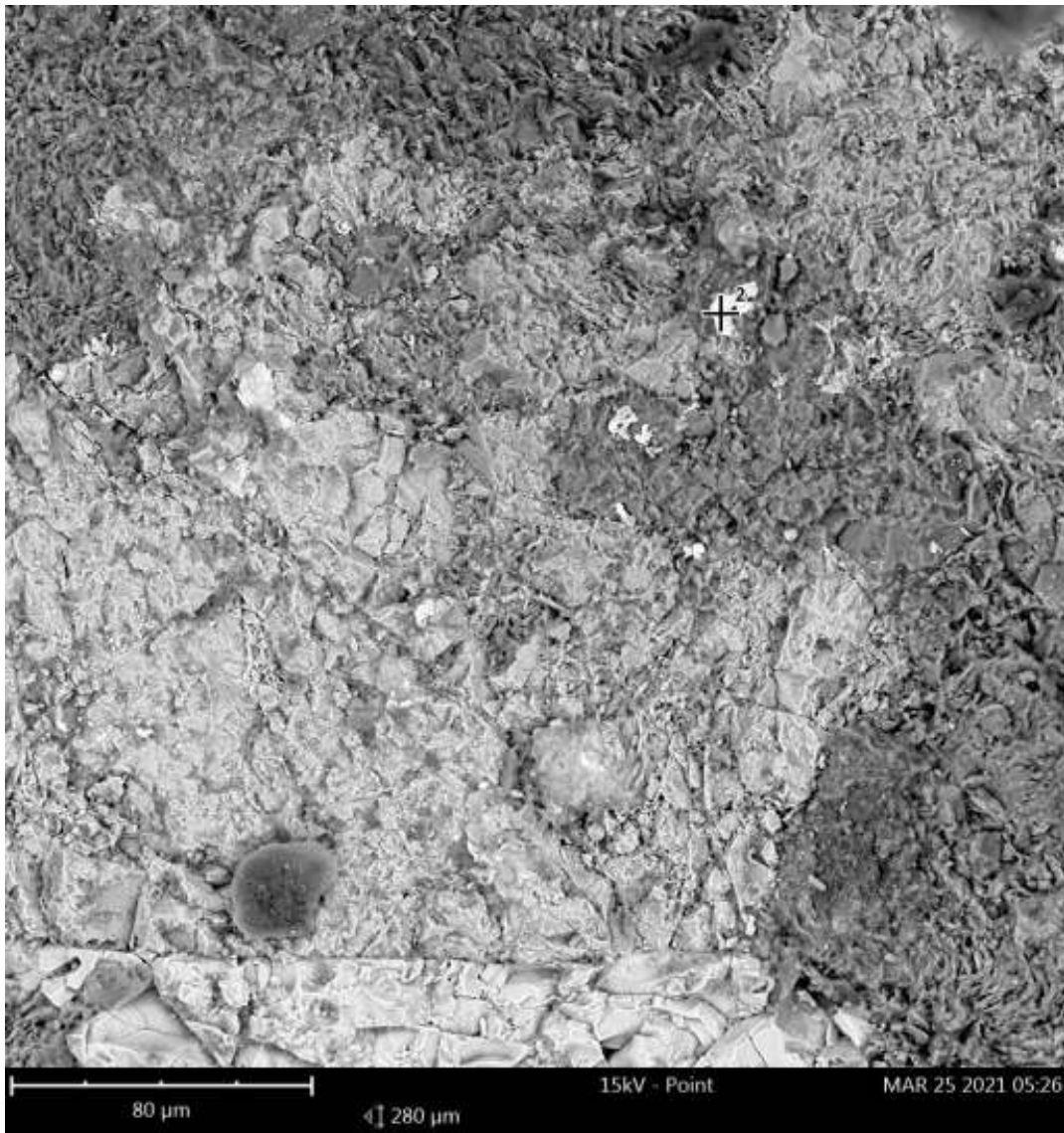
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 26 | Fe | Iron | 61.9 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 12.7 | 0.1 |
| 14 | Si | Silicon | 3.8 | 0.1 |
| 22 | Ti | Titanium | 4.3 | 0.1 |
| 6 | C | Carbon | 12.0 | 0.2 |
| 35 | Br | Bromine | 2.9 | 0.0 |
| 11 | Na | Sodium | 1.5 | 0.8 |
| 19 | K | Potassium | 0.5 | 0.4 |
| 12 | Mg | Magnesium | 0.5 | 0.9 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 3.80 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 8.13 | SiO2 | 37.64 |
| Ti | 4.30 | 79.87 | 47.86 | 1.00 | 7.18 | TiO2 | 33.23 |
| Br | 2.90 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 2.90 | Br | 13.43 |
| Na | 1.50 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 2.02 | Na2O | 9.36 |
| K | 0.50 | 84.20 | 39.10 | 2.00 | 0.54 | K2O | 2.49 |
| Mg | 0.50 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 0.83 | MgO | 3.84 |
| total | 13.50 | | | total | 21.59 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|-------|----------|------|------|------|------|
| SiO2 | 37.64 | 60.08 | 0.63 | 1.25 | 2.48 | 1.24 |
| TiO2 | 33.23 | 79.87 | 0.42 | 0.83 | 1.64 | 0.82 |
| Br | 13.43 | 79.90 | 0.17 | 0.17 | 0.33 | 0.33 |
| Na2O | 9.36 | 61.98 | 0.15 | 0.15 | 0.30 | 0.60 |
| K2O | 2.49 | 84.20 | 0.03 | 0.03 | 0.06 | 0.12 |
| MgO | 3.84 | 40.30 | 0.10 | 0.10 | 0.19 | 0.19 |
| | | | | 2.53 | | 3.30 |
| | 5 | oxígenos | | | | |
| | | 1.98 | | | | |

2. spot (6)



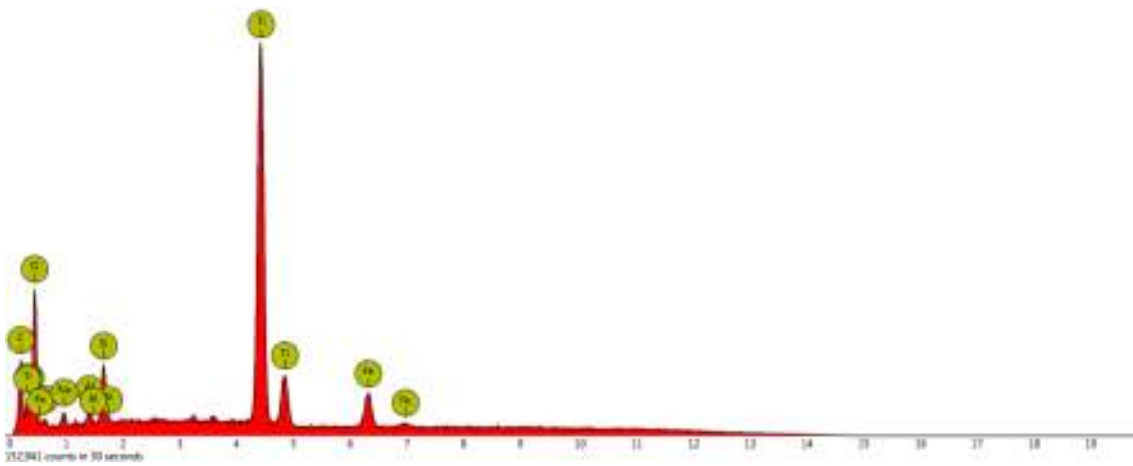
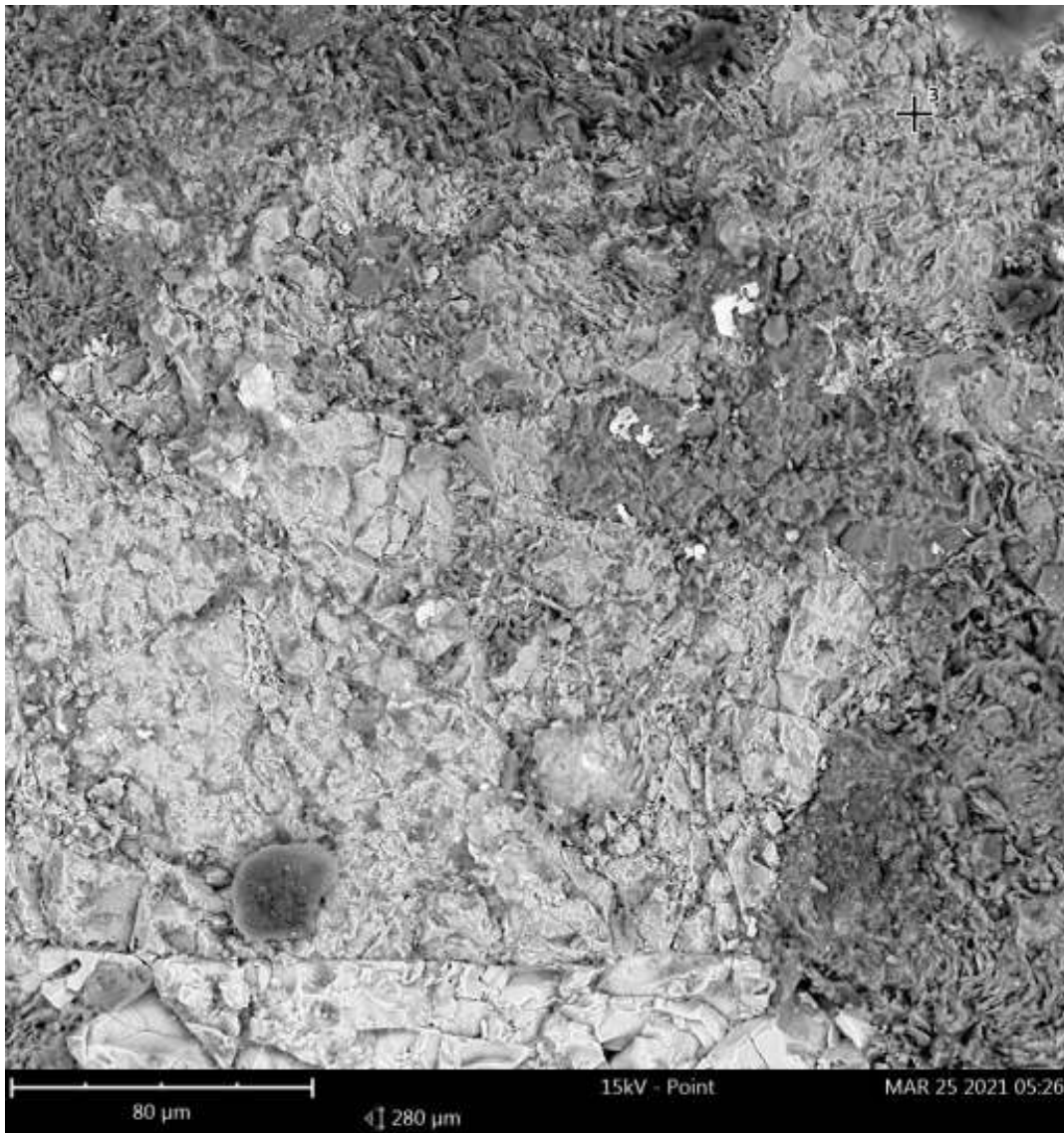
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|----------|------|-----|
| 30 | Zn | Zinc | 55.5 | 0.1 |
| 8 | O | Oxygen | 11.5 | 0.0 |
| 6 | C | Carbon | 28.9 | 0.1 |
| 14 | Si | Silicon | 2.8 | 0.1 |
| 22 | Ti | Titanium | 1.3 | 0.2 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Zn | 55.50 | 81.38 | 65.35 | 1.00 | 69.11 | ZnO | 89.44 |
| Si | 2.80 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 5.99 | SiO2 | 7.75 |
| Ti | 1.30 | 79.87 | 47.86 | 1.00 | 2.17 | TiO2 | 2.81 |
| total | 59.60 | | | total | 77.27 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|----------|-------|------|------|------|------|
| ZnO | 89.44 | 81.38 | 1.10 | 1.10 | 1.54 | 1.54 |
| SiO2 | 7.75 | 60.08 | 0.13 | 0.26 | 0.36 | 0.18 |
| TiO2 | 2.81 | 79.87 | 0.04 | 0.07 | 0.10 | 0.05 |
| | | | | 1.43 | | 1.77 |
| 2 | oxígenos | | | | | |
| | | 1.40 | | | | |

3. spot (7)



Disabled elements: Te

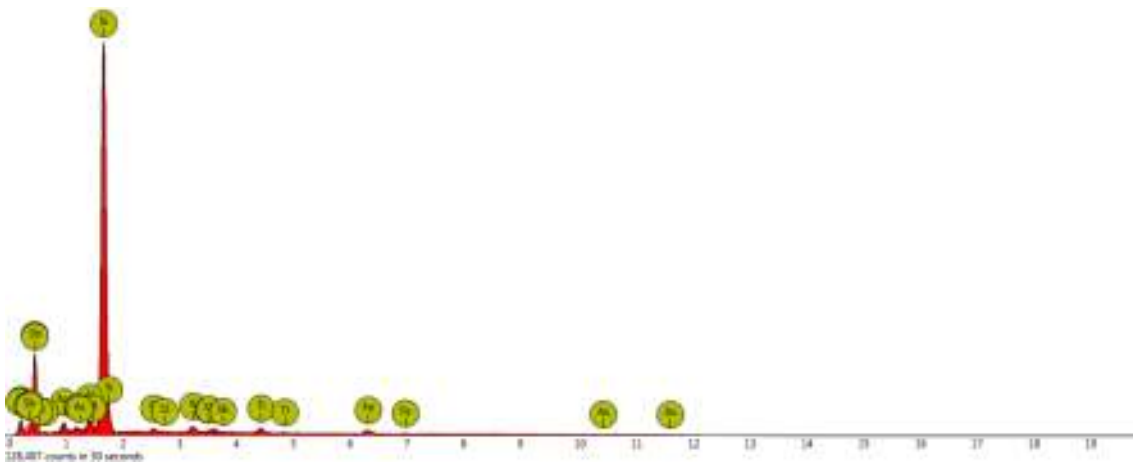
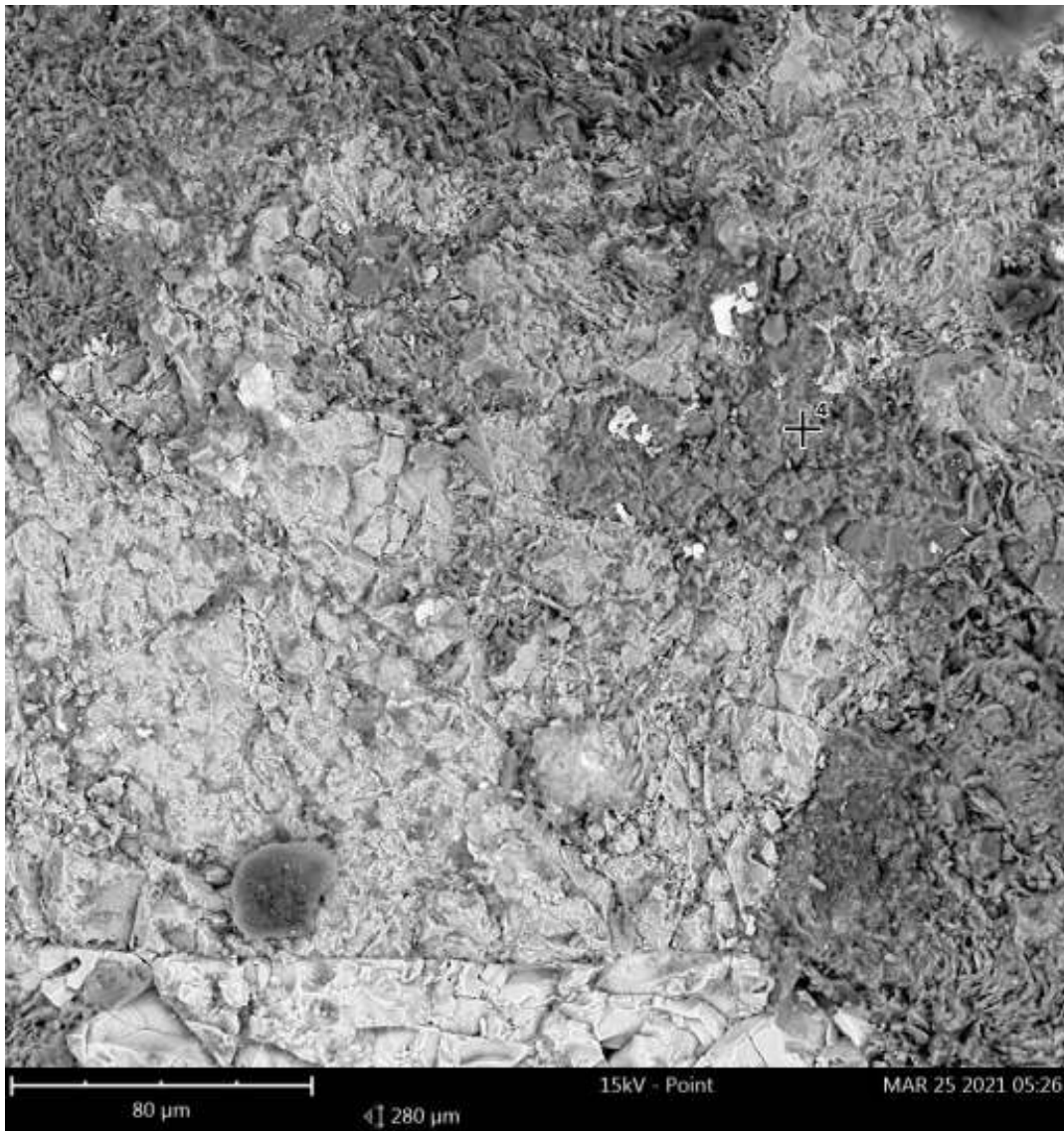
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| Element Number | Element Symbol | Element Name | Weight | Concentration | Error |
|----------------|----------------|--------------|--------|---------------|-------|
| 22 | Ti | Titanium | 37.9 | | 0.1 |
| 8 | O | Oxygen | 36.3 | | 0.0 |
| 14 | Si | Silicon | 2.1 | | 0.0 |
| 6 | C | Carbon | 13.5 | | 0.1 |
| 26 | Fe | Iron | 8.2 | | 0.1 |
| 13 | Al | Aluminium | 0.8 | | 0.1 |
| 11 | Na | Sodium | 1.2 | | 0.5 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Ti | 37.90 | 79.87 | 47.87 | 1.00 | 63.24 | TiO2 | 80.78 |
| Si | 2.10 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 4.49 | SiO2 | 5.74 |
| Fe | 8.20 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 10.55 | FeO | 13.48 |
| Al | 0.80 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 1.51 | Al2O3 | 1.93 |
| Na | 1.20 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 1.62 | Na2O | 2.07 |
| total | 50.20 | | | total | 78.28 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|----------|------|------|------|------|
| TiO2 | 80.78 | 79.87 | 1.01 | 2.02 | 1.68 | 0.84 |
| SiO2 | 5.74 | 60.08 | 0.10 | 0.19 | 0.16 | 0.08 |
| FeO | 13.48 | 71.85 | 0.19 | 0.19 | 0.16 | 0.16 |
| Al2O3 | 1.93 | 101.96 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.02 |
| Na2O | 2.07 | 61.98 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.06 |
| | | | | 2.40 | | 1.15 |
| | 2 | oxígenos | | | | |
| | | 0.83 | | | | |

4. spot (8)



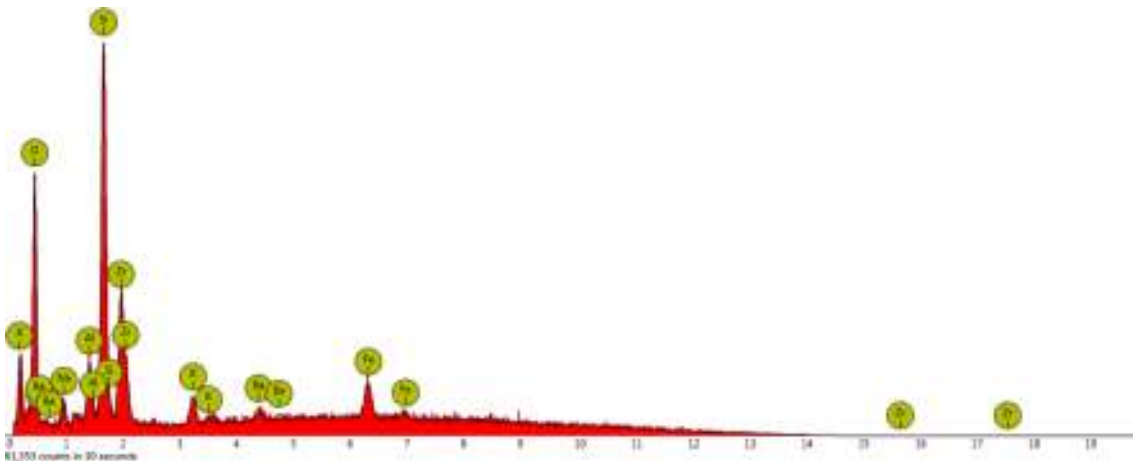
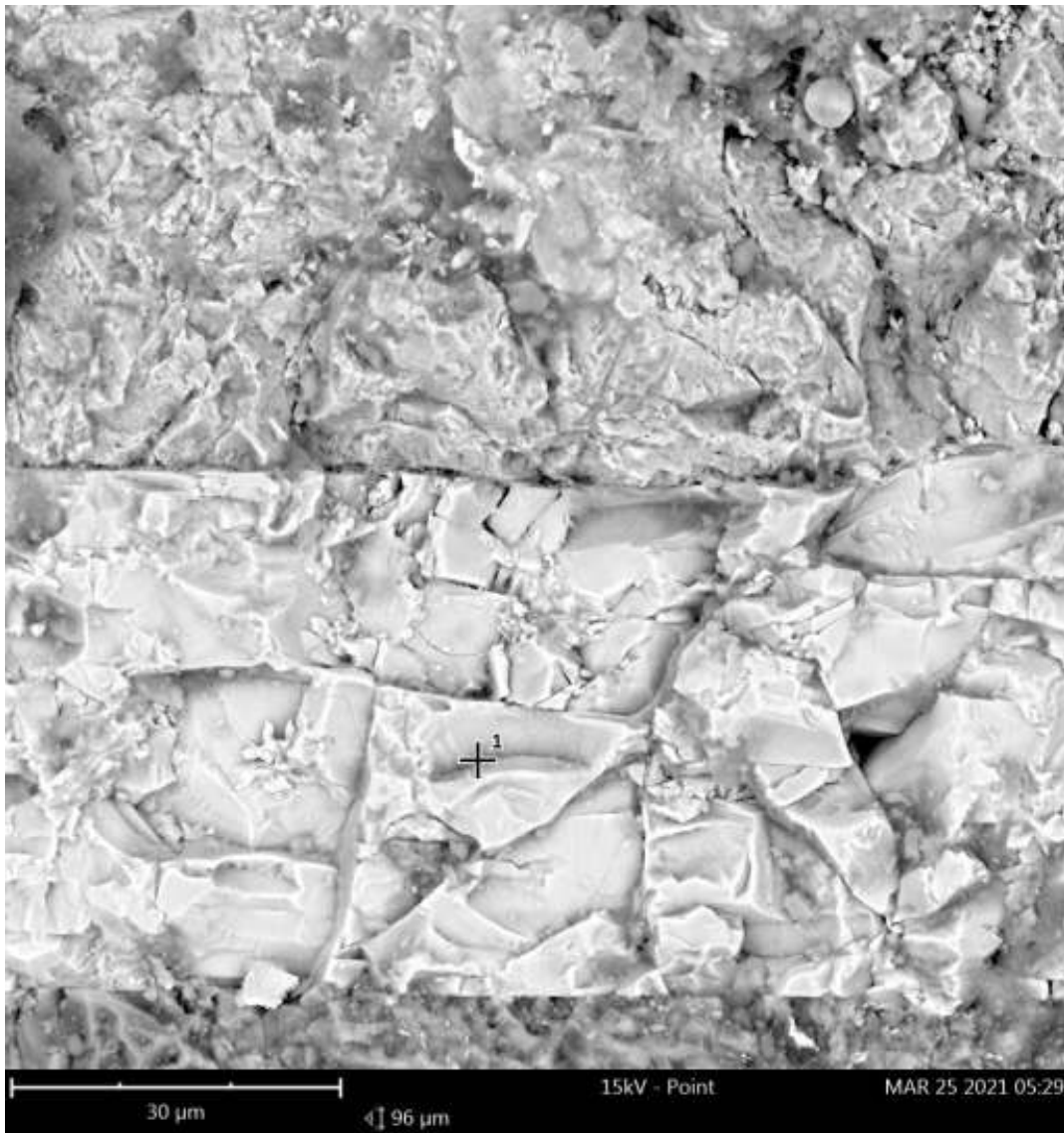
Disabled elements: Lu

Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 34.0 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 34.0 | 0.1 |
| 13 | Al | Aluminium | 1.5 | 1.0 |
| 6 | C | Carbon | 20.8 | 0.1 |
| 11 | Na | Sodium | 1.6 | 0.4 |
| 19 | K | Potassium | 1.1 | 0.6 |
| 22 | Ti | Titanium | 1.4 | 0.4 |
| 26 | Fe | Iron | 2.3 | 0.5 |
| 33 | As | Arsenic | 1.4 | 1.6 |
| 17 | Cl | Chlorine | 0.5 | 0.8 |
| 51 | Sb | Antimony | 1.4 | 0.8 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------------------|--------|
| Si | 34.00 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 72.73 | SiO ₂ | 93.58 |
| Al | 1.50 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 2.83 | Al ₂ O ₃ | 3.65 |
| Na | 1.60 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 2.16 | Na ₂ O | 2.77 |
| K | 1.10 | 84.20 | 39.10 | 2.00 | 1.18 | K ₂ O | 1.52 |
| Ti | 1.40 | 79.87 | 47.86 | 1.00 | 2.34 | TiO ₂ | 3.01 |
| Fe | 2.30 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 2.96 | FeO | 3.81 |
| Cl | 0.50 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 0.50 | Cl | 0.64 |
| total | 42.40 | | | total | 77.72 | | 100.00 |

1. spot (9)



Disabled elements: C, Cs, Nb, Sb, Ti

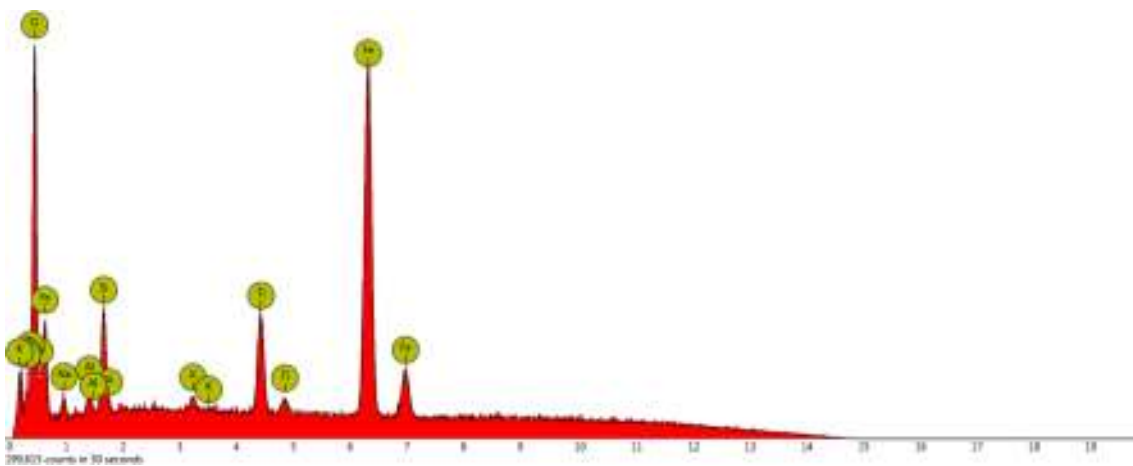
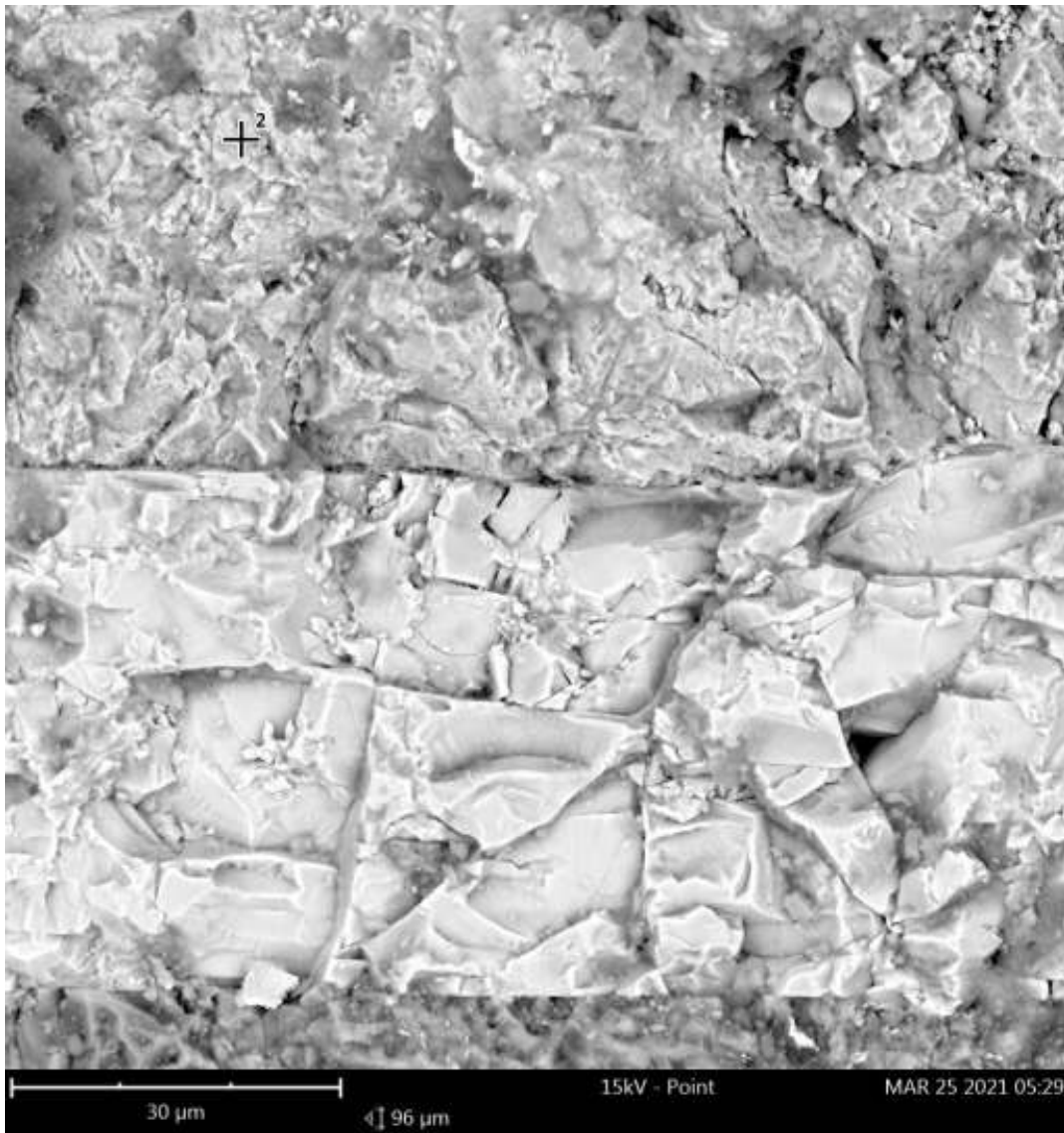
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 17.0 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 37.2 | 0.1 |
| 40 | Zr | Zirconium | 21.8 | 0.0 |
| 13 | Al | Aluminium | 3.2 | 0.1 |
| 26 | Fe | Iron | 10.4 | 0.3 |
| 19 | K | Potassium | 2.2 | 0.8 |
| 11 | Na | Sodium | 2.2 | 0.8 |
| 56 | Ba | Barium | 6.1 | 1.0 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 17.00 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 36.37 | SiO2 | 50.61 |
| Zr | 21.80 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 29.45 | ZrO2 | 40.98 |
| Al | 3.20 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 6.05 | Al2O3 | 8.41 |
| Fe | 10.40 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 13.38 | FeO | 18.62 |
| K | 2.20 | 84.20 | 39.10 | 2.00 | 2.37 | K2O | 3.30 |
| Na | 2.20 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 2.97 | Na2O | 4.13 |
| Ba | 6.10 | 153.33 | 137.33 | 1.00 | 6.81 | BaO | 9.48 |
| total | 62.90 | | | total | 71.86 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|----------|--------|------|------|------|------|
| SiO2 | 50.61 | 60.08 | 0.84 | 1.68 | 2.23 | 1.11 |
| ZrO2 | 40.98 | 123.22 | 0.33 | 0.67 | 0.88 | 0.44 |
| Al2O3 | 8.41 | 101.96 | 0.08 | 0.25 | 0.33 | 0.22 |
| FeO | 18.62 | 71.85 | 0.26 | 0.26 | 0.34 | 0.34 |
| K2O | 3.30 | 84.20 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.10 |
| Na2O | 4.13 | 61.98 | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.18 |
| BaO | 9.48 | 153.33 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.08 |
| | | | | 3.02 | | 2.48 |
| 4 | oxígenos | | | | | |
| | 1.32 | | | | | |

2. spot (10)



Disabled elements: C

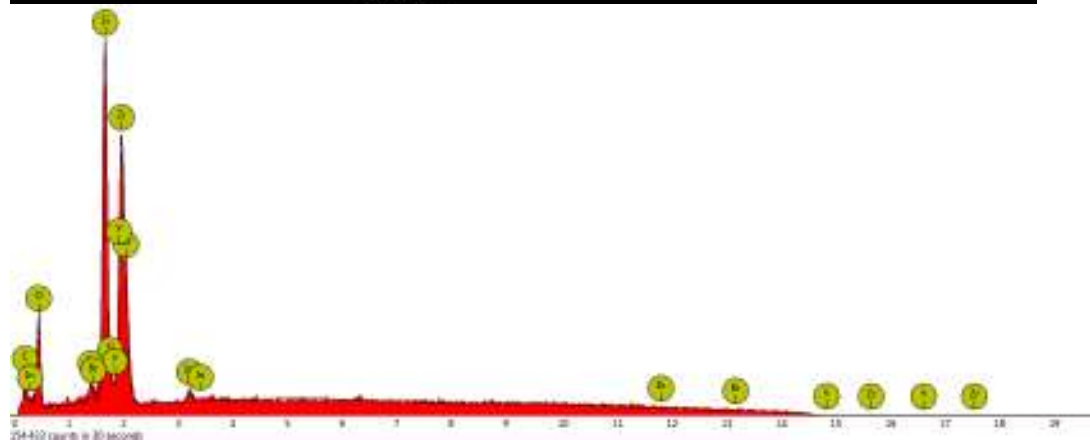
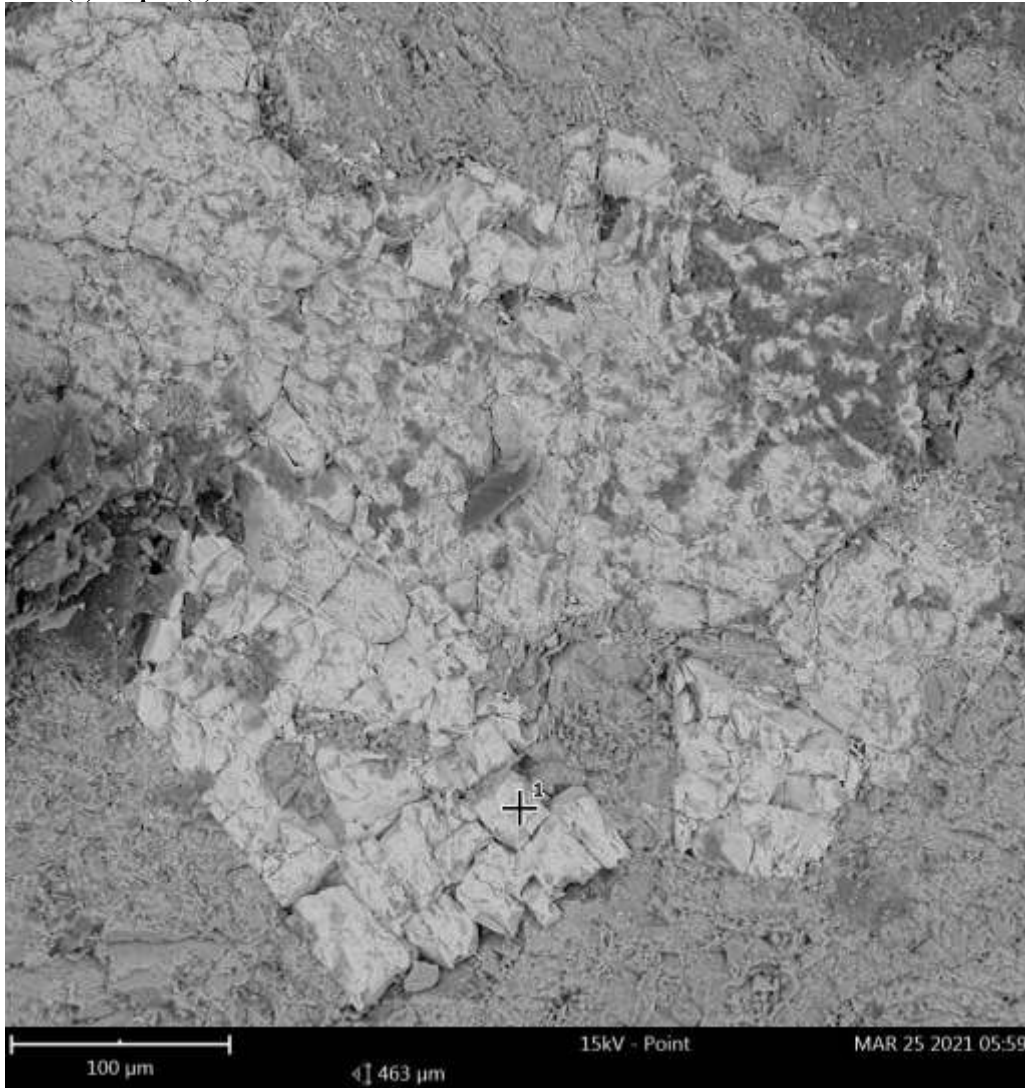
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 26 | Fe | Iron | 60.7 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 24.7 | 0.0 |
| 22 | Ti | Titanium | 7.2 | 0.2 |
| 14 | Si | Silicon | 3.6 | 0.1 |
| 13 | Al | Aluminium | 1.1 | 0.1 |
| 11 | Na | Sodium | 2.0 | 0.3 |
| 19 | K | Potassium | 0.6 | 0.6 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|------------|
| Ti | 7.2 | 79.87 | 47.86 | 1 | 12.0155453 | TiO2 | 60.9412612 |
| Si | 3.6 | 60.08 | 28.0855 | 1 | 7.7010557 | SiO2 | 39.0587388 |
| Al | 1.1 | 101.96 | 26.9815 | 2 | 2.07838704 | Al2O3 | 10.541305 |
| Na | 2 | 61.98 | 22.9897 | 2 | 2.69598994 | Na2O | 13.6737054 |
| K | 0.6 | 94.2 | 39.0983 | 2 | 0.72279357 | K2O | 3.66591368 |
| total | 14.5 | | | total | 19.716601 | | 100 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|----------|------|------|------|------|
| TiO2 | 60.94 | 79.87 | 0.76 | 1.53 | 0.90 | 0.45 |
| SiO2 | 39.06 | 60.08 | 0.65 | 1.30 | 0.77 | 0.38 |
| Al2O3 | 10.54 | 101.96 | 0.10 | 0.31 | 0.18 | 0.12 |
| Na2O | 13.67 | 61.98 | 0.22 | 0.22 | 0.13 | 0.26 |
| K2O | 3.67 | 94.20 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 0.05 |
| | | | | 3.40 | | 1.26 |
| | 2 | oxígenos | | | | |
| | | 0.59 | | | | |

P-30 (2) 1. spot (1)



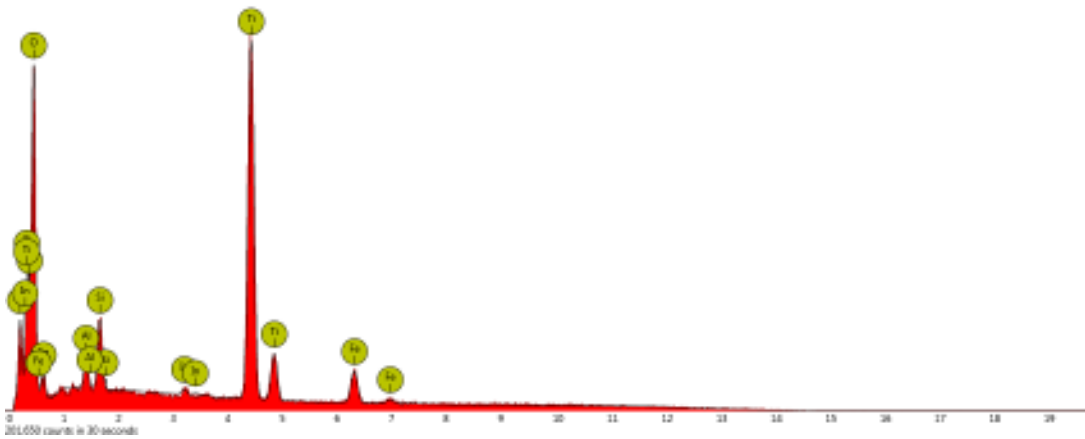
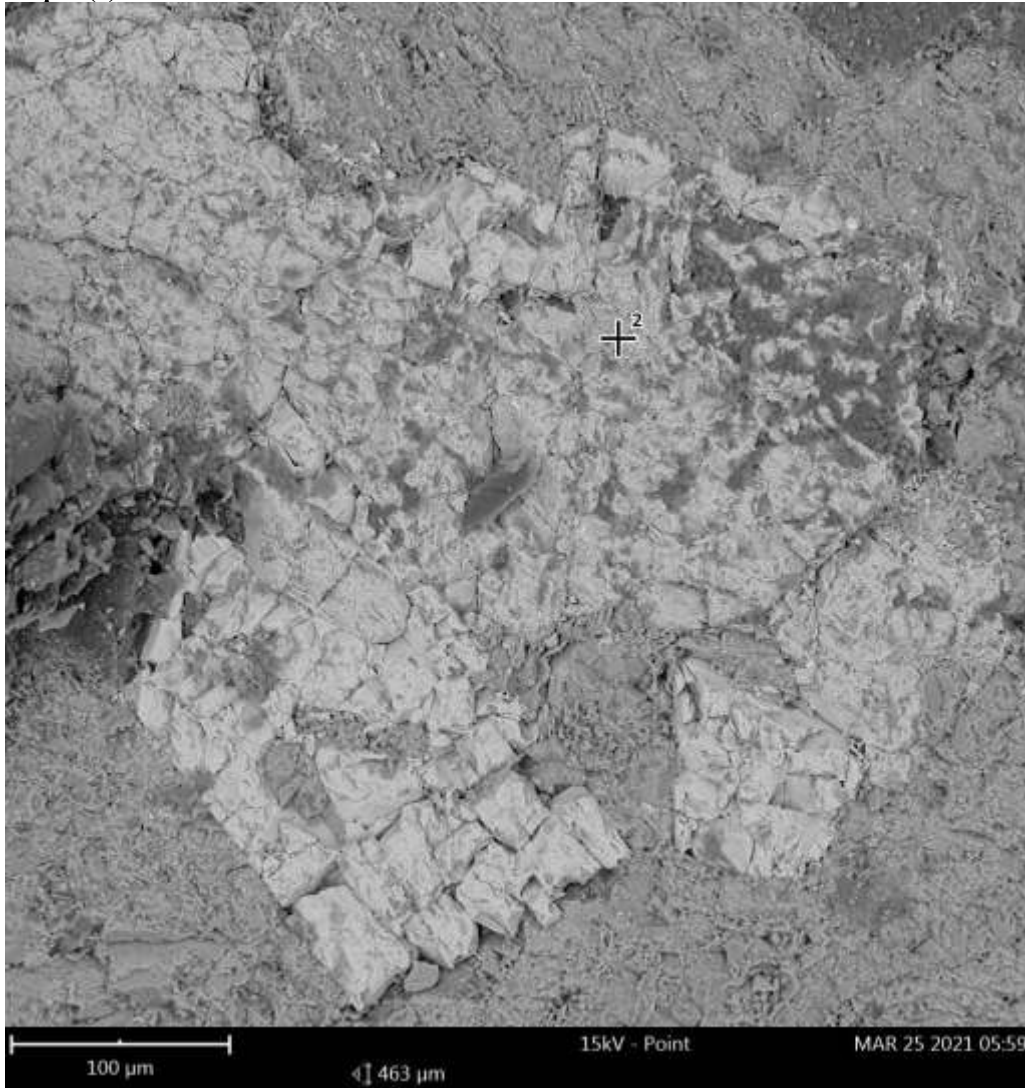
Disabled elements: Sb

| Element Number | Element Symbol | Element Name | Weight Concentration | Error |
|----------------|----------------|--------------|----------------------|-------|
| 14 | Si | Silicon | 13.5 | 0.0 |
| 40 | Zr | Zirconium | 38.7 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 22.0 | 0.1 |
| 39 | Y | Yttrium | 2.5 | 0.0 |
| 6 | C | Carbon | 17.9 | 1.1 |
| 35 | Br | Bromine | 2.2 | 0.0 |
| 49 | In | Indium | 3.2 | 1.5 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 13.50 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 28.88 | SiO2 | 31.95 |
| Zr | 38.70 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 52.27 | ZrO2 | 57.83 |
| Y | 2.50 | 225.81 | 88.90 | 2.00 | 3.18 | Y2O3 | 3.51 |
| Br | 2.20 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 2.20 | Br | 2.43 |
| In | 3.20 | 277.64 | 114.81 | 2.00 | 3.87 | In2O3 | 4.28 |
| total | 60.10 | | | total | 90.40 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|----------|------|------|------|------|
| SiO2 | 31.95 | 60.08 | 0.53 | 1.06 | 2.00 | 1.00 |
| ZrO2 | 57.83 | 123.22 | 0.47 | 0.94 | 1.77 | 0.88 |
| Y2O3 | 3.51 | 225.81 | 0.02 | 0.05 | 0.09 | 0.06 |
| Br | 2.43 | 79.90 | 0.03 | 0.03 | 0.06 | 0.06 |
| In2O3 | 4.28 | 277.64 | 0.02 | 0.05 | 0.09 | 0.06 |
| | | | | 2.13 | | 2.06 |
| | 4 | oxígenos | | | | |
| | | 1.88 | | | | |

2. spot (2)

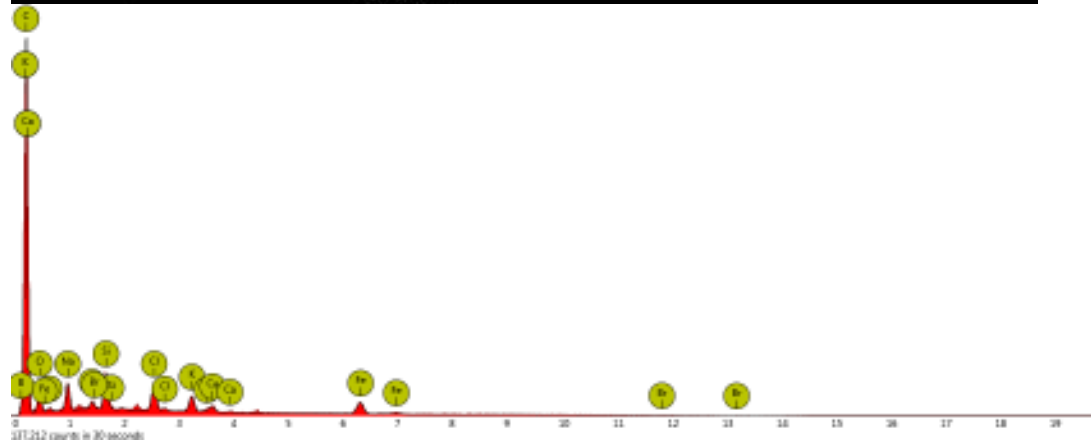
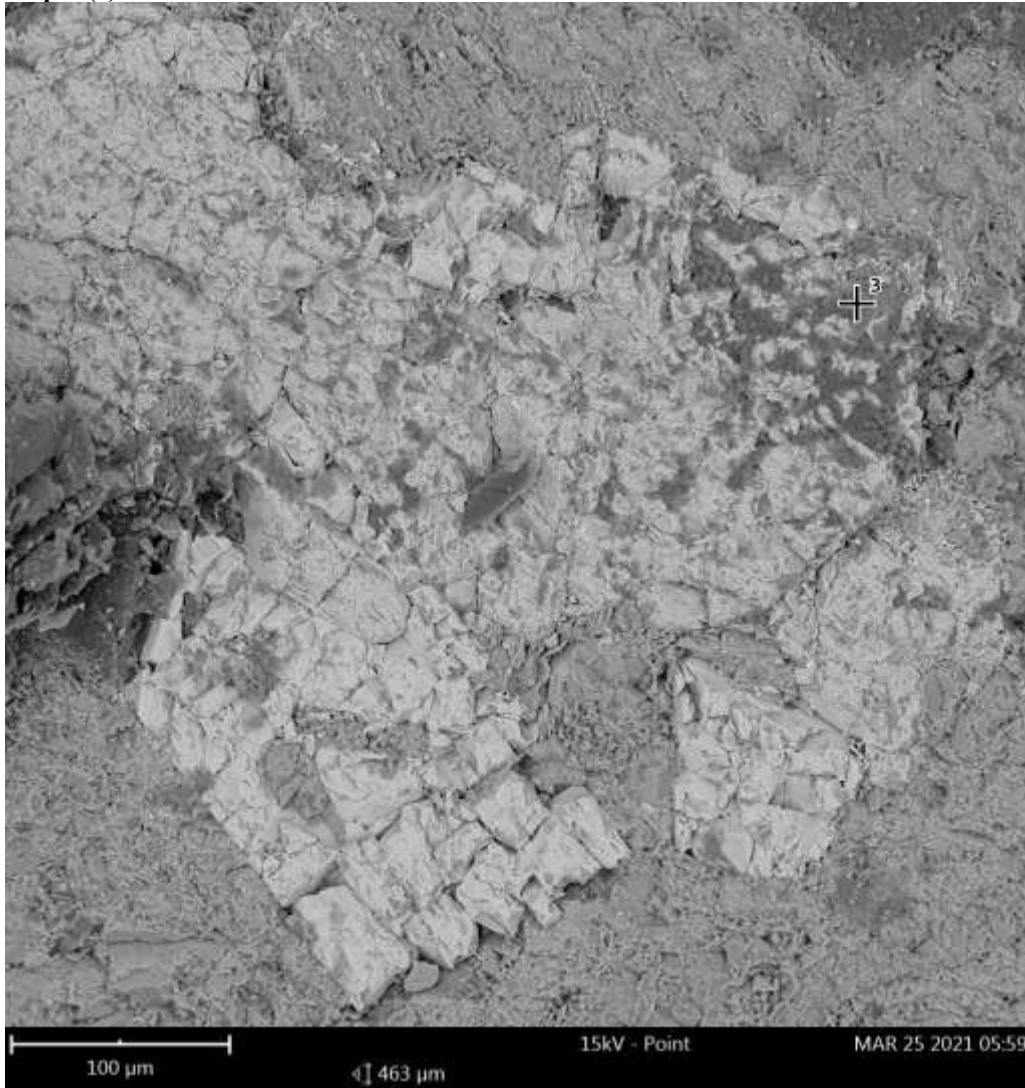


| Element Number | Element Symbol | Element Name | Weight Concentration | Error |
|----------------|----------------|--------------|----------------------|-------|
| 22 | Ti | Titanium | 27.4 | 0.1 |
| 8 | O | Oxygen | 51.9 | 0.0 |
| 14 | Si | Silicon | 1.8 | 0.1 |
| 6 | C | Carbon | 11.2 | 0.3 |
| 26 | Fe | Iron | 5.9 | 0.2 |
| 13 | Al | Aluminium | 1.1 | 0.1 |
| 49 | In | Indium | 0.8 | 2.4 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Ti | 27.40 | 79.87 | 47.86 | 1.00 | 45.73 | TiO2 | 75.94 |
| Si | 1.80 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 3.85 | SiO2 | 6.39 |
| Fe | 5.90 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 7.59 | FeO | 12.61 |
| Al | 1.10 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 2.08 | Al2O3 | 3.45 |
| In | 0.80 | 277.64 | 114.81 | 2.00 | 0.97 | In2O3 | 1.61 |
| total | 37.00 | | | total | 60.21 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|----------|--------|------|------|------|------|
| TiO2 | 45.73 | 79.87 | 0.57 | 1.15 | 1.58 | 0.79 |
| SiO2 | 3.85 | 60.08 | 0.06 | 0.13 | 0.18 | 0.09 |
| FeO | 7.59 | 71.85 | 0.11 | 0.11 | 0.15 | 0.15 |
| Al2O3 | 2.08 | 101.96 | 0.02 | 0.06 | 0.08 | 0.06 |
| In2O3 | 0.97 | 277.64 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| | | | | 1.45 | | 1.09 |
| 2 | oxígenos | | | | | |
| | | | | | | 1.38 |

3. spot (3)

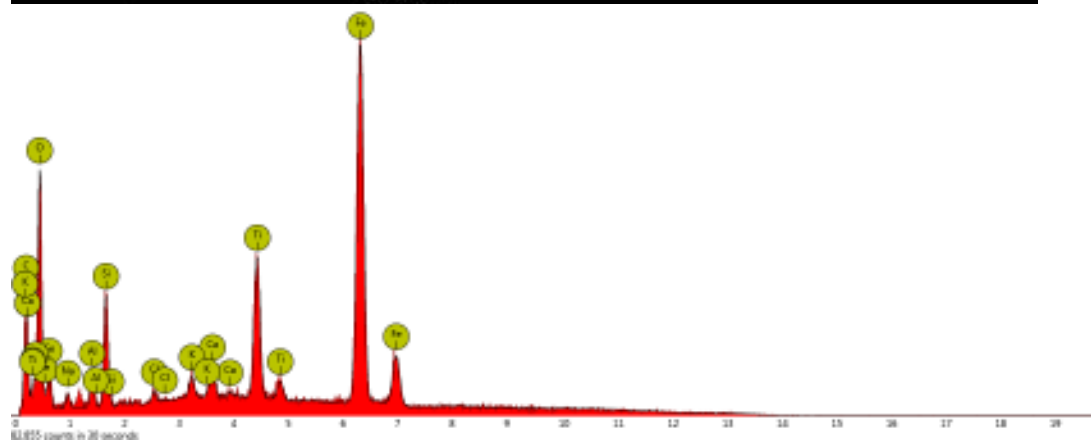
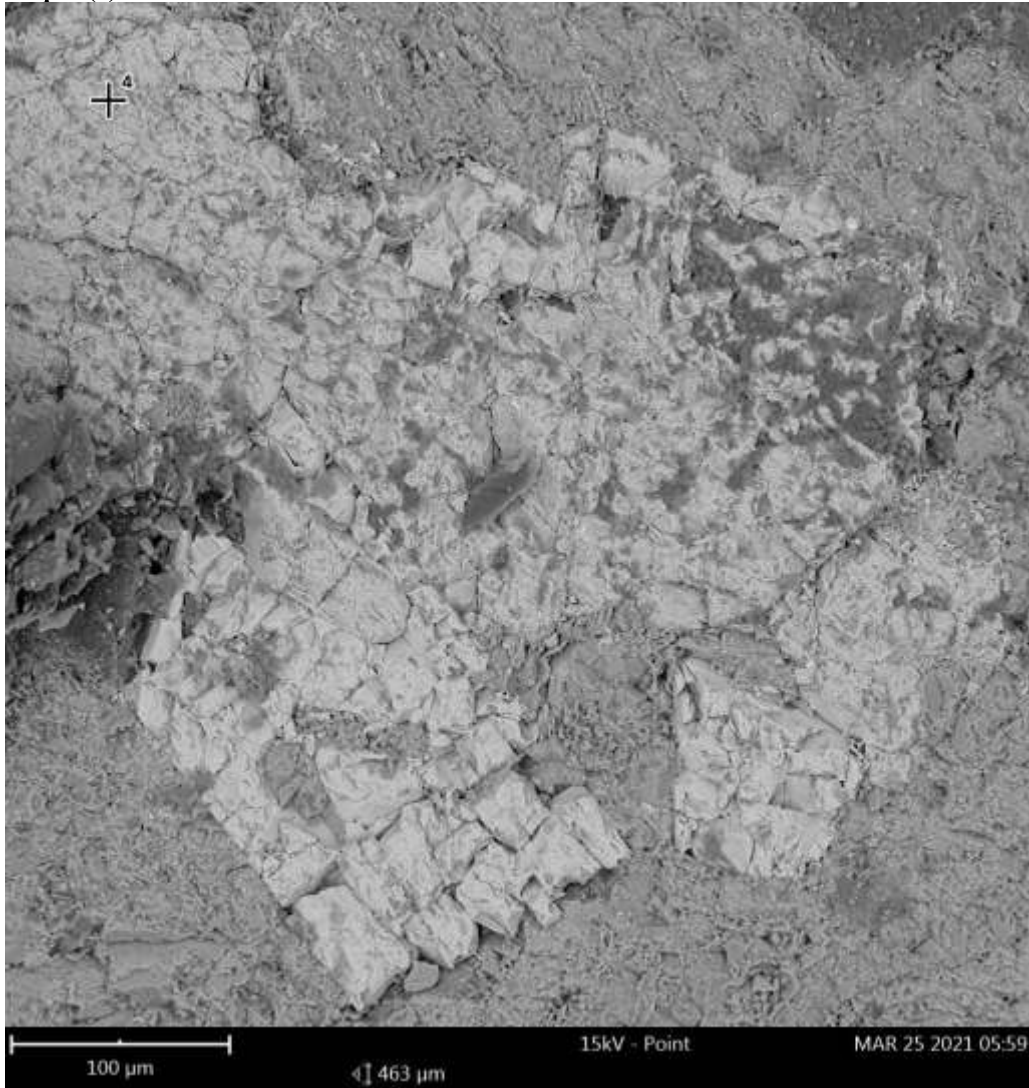


| Element Number | Element Symbol | Element Name | Weight Concentration | Error |
|----------------|----------------|--------------|----------------------|-------|
| 6 | C | Carbon | 78.1 | 0.1 |
| 14 | Si | Silicon | 1.0 | 0.0 |
| 17 | Cl | Chlorine | 1.1 | 0.1 |
| 11 | Na | Sodium | 1.3 | 0.1 |
| 8 | O | Oxygen | 8.5 | 0.1 |
| 19 | K | Potassium | 0.8 | 0.1 |
| 26 | Fe | Iron | 2.5 | 0.2 |
| 5 | B | Boron | 5.8 | 0.1 |
| 35 | Br | Bromine | 0.6 | 0.1 |
| 20 | Ca | Calcium | 0.3 | 0.4 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 1.00 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 2.14 | SiO2 | 20.28 |
| Cl | 1.10 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 1.10 | Cl | 10.43 |
| Na | 1.30 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 1.75 | Na2O | 16.61 |
| K | 0.80 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 0.96 | K2O | 9.14 |
| Fe | 2.50 | 159.69 | 55.85 | 2.00 | 3.57 | Fe2O3 | 33.88 |
| Br | 0.60 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 0.60 | Br | 5.69 |
| Ca | 0.30 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 0.42 | CaO | 3.98 |
| total | 7.60 | | | total | 10.55 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------|-------|--------|------|------|------|-------|
| SiO2 | 20.28 | 60.08 | 0.34 | 0.68 | 5.75 | 2.88 |
| Cl | 10.43 | 35.45 | 0.29 | 0.29 | 2.51 | 2.51 |
| Na2O | 16.61 | 61.98 | 0.27 | 0.27 | 2.28 | 4.57 |
| K2O | 9.14 | 94.20 | 0.10 | 0.10 | 0.83 | 1.65 |
| Fe2O3 | 33.88 | 159.69 | 0.21 | 0.64 | 5.42 | 3.62 |
| Br | 5.69 | 79.90 | 0.07 | 0.07 | 0.61 | 0.61 |
| CaO | 3.98 | 56.08 | 0.07 | 0.07 | 0.60 | 0.60 |
| | | | | 2.11 | | 16.43 |
| 18 oxígenos | | | | | | 8.52 |

4. spot (4)



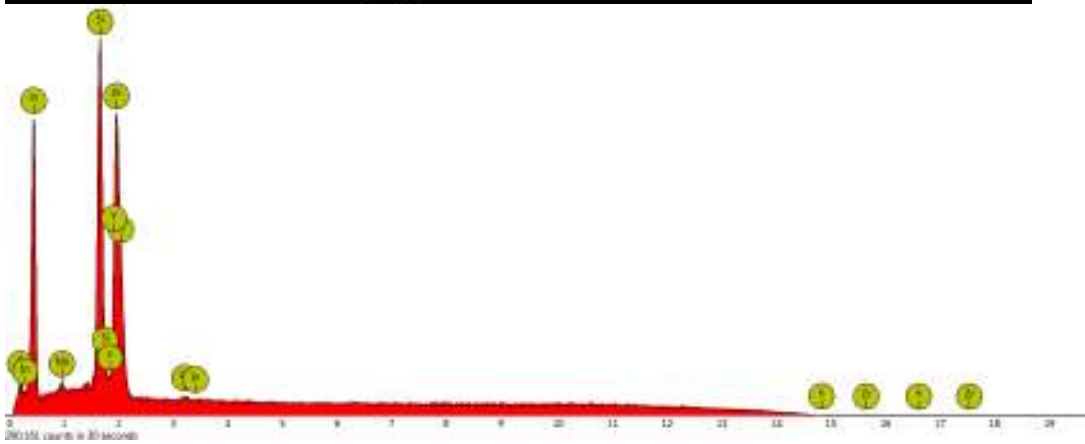
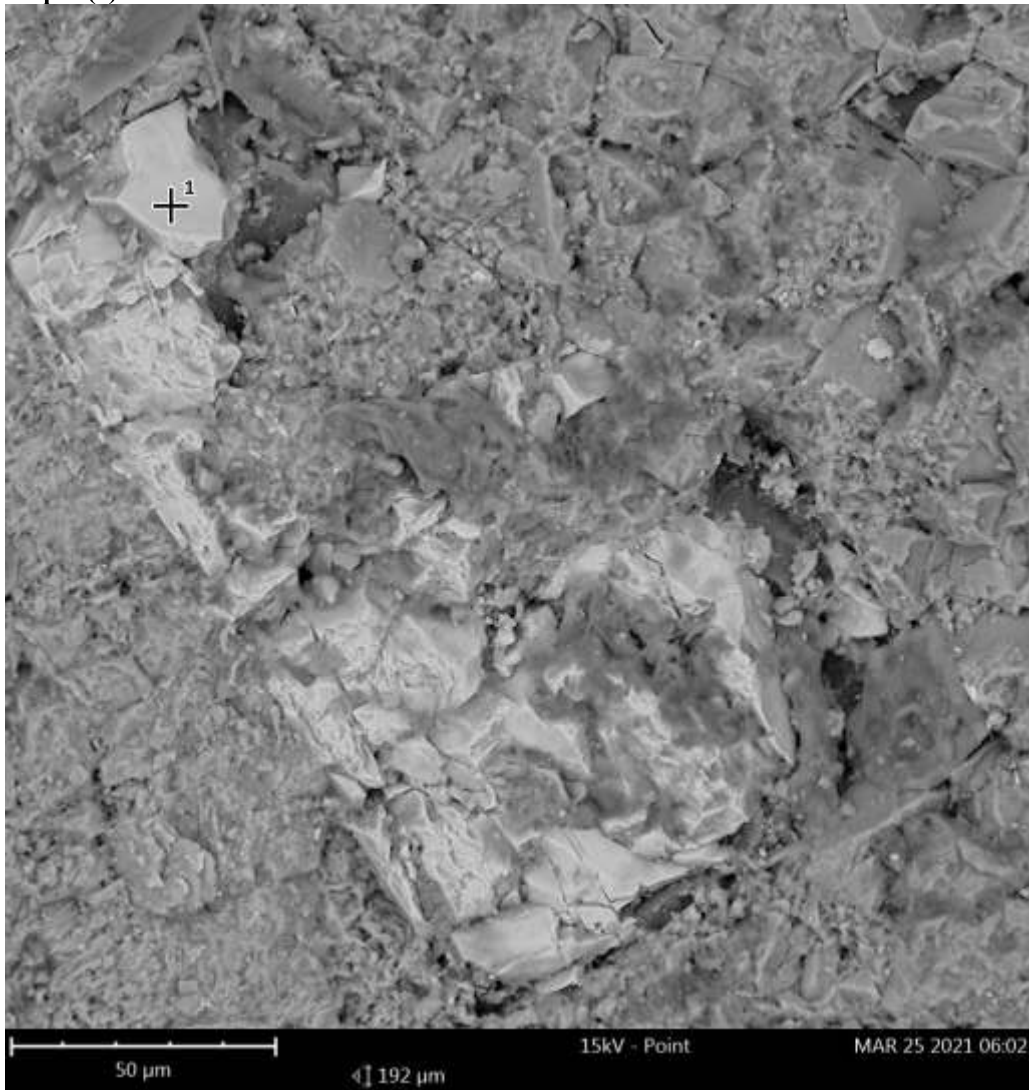
| Element Number | Element Symbol | Element Name | Weight Concentration | Error |
|----------------|----------------|--------------|----------------------|-------|
| 26 | Fe | Iron | 48.6 | 0.0 |
| 22 | Ti | Titanium | 8.0 | 0.1 |
| 8 | O | Oxygen | 18.3 | 0.1 |
| 14 | Si | Silicon | 2.8 | 0.1 |
| 6 | C | Carbon | 18.1 | 0.1 |
| 20 | Ca | Calcium | 1.1 | 0.5 |
| 13 | Al | Aluminium | 1.2 | 0.1 |
| 19 | K | Potassium | 0.7 | 0.2 |
| 11 | Na | Sodium | 0.9 | 0.3 |
| 17 | Cl | Chlorine | 0.3 | 0.5 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Fe | 48.60 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 62.53 | FeO | 71.03 |
| Ti | 8.00 | 79.87 | 47.86 | 1.00 | 13.35 | TiO2 | 15.17 |
| Si | 2.80 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 5.99 | SiO2 | 6.80 |
| Ca | 1.10 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 1.54 | CaO | 1.75 |
| Al | 1.20 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 2.27 | Al2O3 | 2.58 |
| K | 0.70 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 0.84 | K2O | 0.96 |
| Na | 0.90 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 1.21 | Na2O | 1.38 |
| Cl | 0.30 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 0.30 | Cl | 0.34 |
| total | 63.60 | | | total | 88.03 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|-------|--------|------|------|------|------|
| FeO* | 35.54 | 71.85 | 0.49 | 0.49 | 2.73 | 2.73 |
| Fe2O3* | 39.44 | 159.69 | 0.25 | 0.74 | 4.09 | 2.73 |
| TiO2 | 15.17 | 79.87 | 0.19 | 0.38 | 2.10 | 1.05 |
| SiO2 | 6.80 | 60.08 | 0.11 | 0.23 | 1.25 | 0.63 |
| CaO | 1.75 | 56.08 | 0.03 | 0.03 | 0.17 | 0.17 |
| Al2O3 | 2.58 | 101.96 | 0.03 | 0.08 | 0.42 | 0.28 |
| K2O | 0.96 | 94.20 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.11 |
| Na2O | 1.38 | 61.98 | 0.02 | 0.02 | 0.12 | 0.25 |
| Cl | 0.34 | 35.45 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.05 |
| | | | | 1.99 | | 8.00 |

11 oxígenos
5.53

1. spot (5)

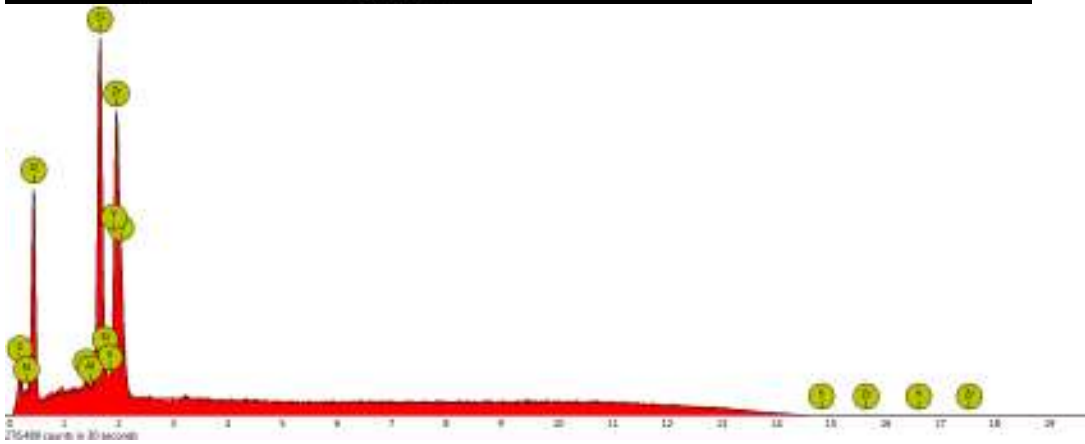
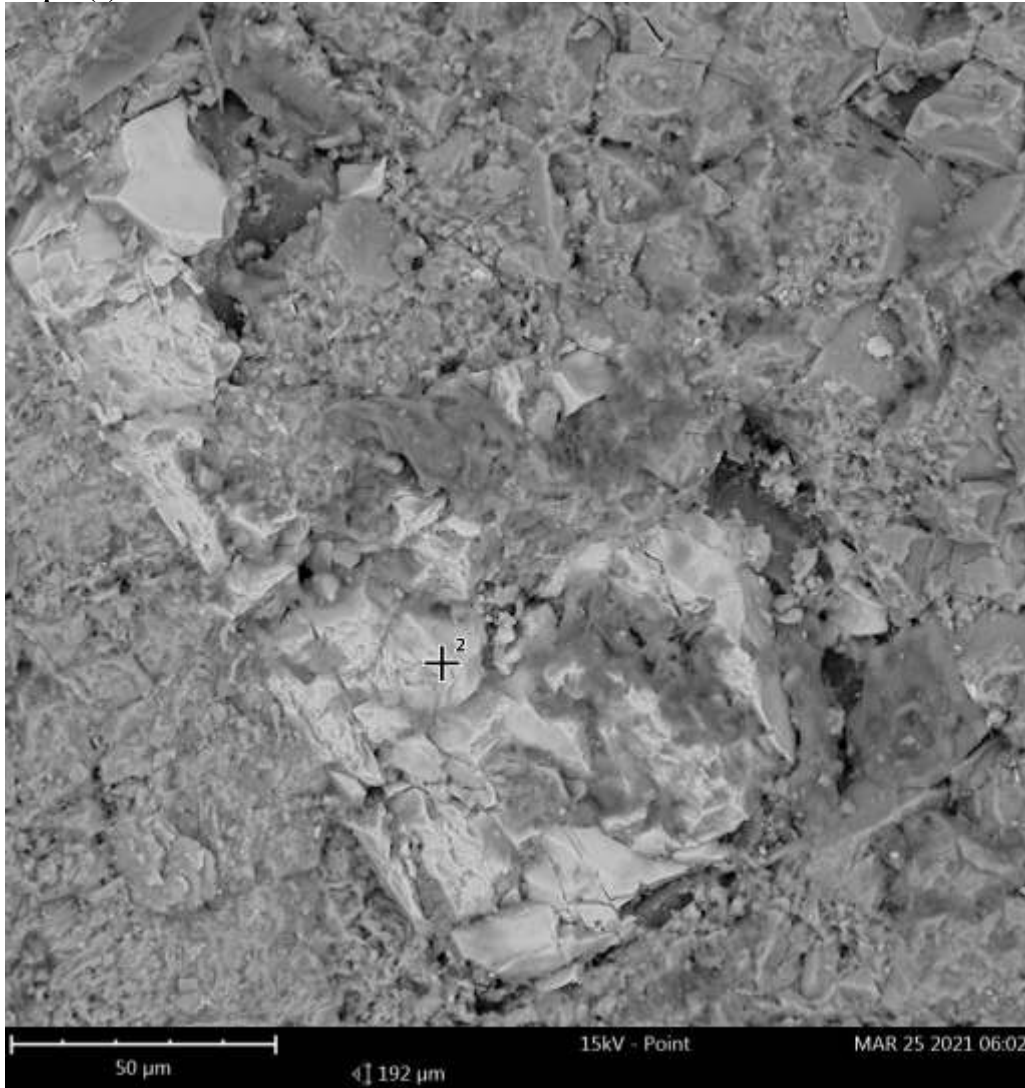


| Element Number | Element Symbol | Element Name | Weight Concentration | Error |
|----------------|----------------|--------------|----------------------|-------|
| 14 | Si | Silicon | 11.1 | 0.0 |
| 40 | Zr | Zirconium | 34.1 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 44.0 | 0.0 |
| 39 | Y | Yttrium | 1.5 | 0.0 |
| 6 | C | Carbon | 8.1 | 1.1 |
| 11 | Na | Sodium | 0.5 | 0.5 |
| 49 | In | Indium | 0.7 | 1.7 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------------------|--------|
| Si | 11.10 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 23.74 | SiO ₂ | 30.87 |
| Zr | 34.10 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 46.06 | ZrO ₂ | 59.87 |
| Y | 1.50 | 225.81 | 88.90 | 2.00 | 1.91 | Y ₂ O ₃ | 2.48 |
| Na | 0.50 | 61.98 | 22.99 | 1.00 | 1.35 | Na ₂ O | 1.75 |
| In | 3.20 | 277.64 | 114.81 | 2.00 | 3.87 | In ₂ O ₃ | 5.03 |
| total | 50.40 | | | total | 76.93 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------|-------|--------|------|------|------|------|
| SiO ₂ | 30.87 | 60.08 | 0.51 | 1.03 | 1.92 | 0.96 |
| ZrO ₂ | 59.87 | 123.22 | 0.49 | 0.97 | 1.81 | 0.91 |
| Y ₂ O ₃ | 2.48 | 225.81 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.04 |
| Na ₂ O | 1.75 | 61.98 | 0.03 | 0.06 | 0.11 | 0.21 |
| In ₂ O ₃ | 5.03 | 277.64 | 0.02 | 0.05 | 0.10 | 0.07 |
| | | | | 2.14 | 2.19 | |
| 4 oxígenos | | | | | | 1.87 |

2. spot (6)



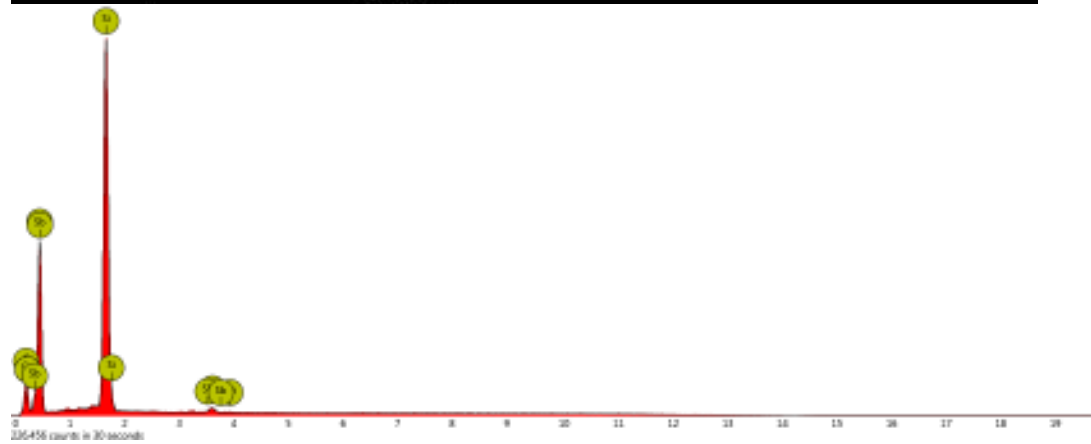
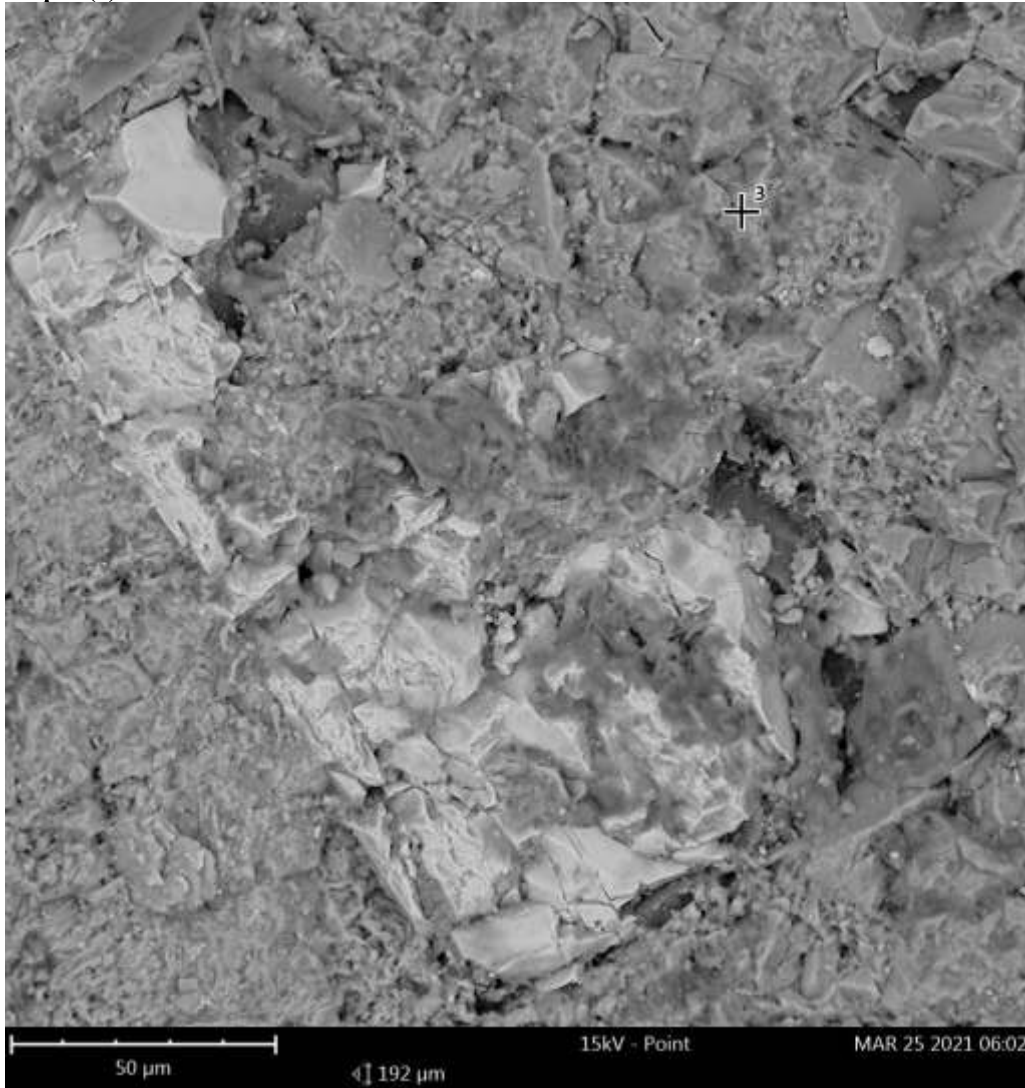
Disabled elements: Na

| Element Number | Element Symbol | Element Name | Weight Concentration | Error |
|----------------|----------------|--------------|----------------------|-------|
| 14 | Si | Silicon | 10.4 | 0.0 |
| 40 | Zr | Zirconium | 32.1 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 36.8 | 0.0 |
| 39 | Y | Yttrium | 1.3 | 0.0 |
| 6 | C | Carbon | 13.7 | 0.4 |
| 7 | N | Nitrogen | 5.4 | 1.5 |
| 13 | Al | Aluminium | 0.3 | 2.7 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------------------|--------|
| Si | 10.40 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 22.25 | SiO ₂ | 30.86 |
| Zr | 34.10 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 46.06 | ZrO ₂ | 63.88 |
| Y | 1.50 | 225.81 | 88.90 | 2.00 | 1.91 | Y ₂ O ₃ | 2.64 |
| Al | 0.50 | 101.96 | 26.98 | 1.00 | 1.89 | Al ₂ O ₃ | 2.62 |
| total | 46.50 | | | total | 72.10 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------|-------|--------|------|------|------|------|
| SiO ₂ | 30.86 | 60.08 | 0.51 | 1.03 | 1.89 | 0.94 |
| ZrO ₂ | 63.88 | 123.22 | 0.52 | 1.04 | 1.91 | 0.95 |
| Y ₂ O ₃ | 2.64 | 225.81 | 0.01 | 0.04 | 0.06 | 0.04 |
| Al ₂ O ₃ | 2.62 | 101.96 | 0.03 | 0.08 | 0.14 | 0.09 |
| | | | | 2.18 | | 2.03 |
| 4 oxígenos | | | | | | 1.84 |

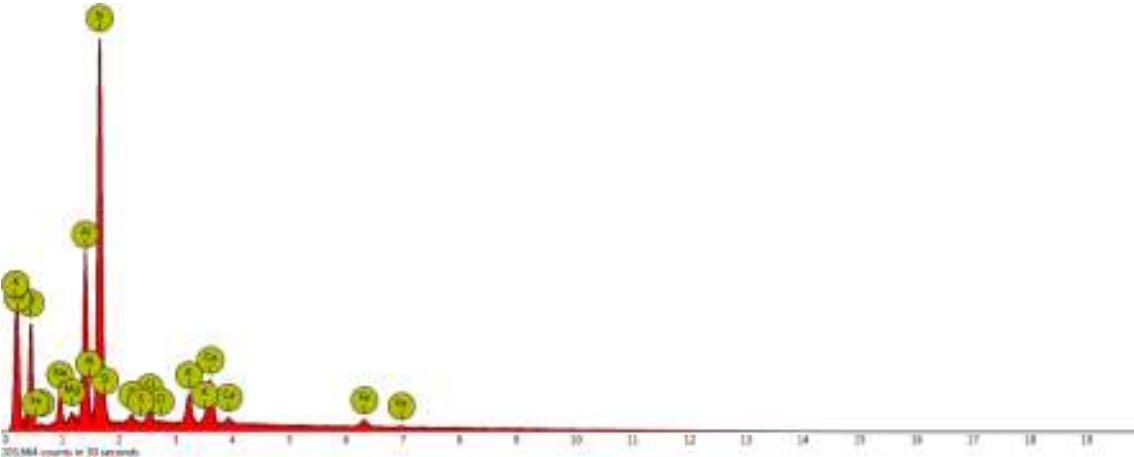
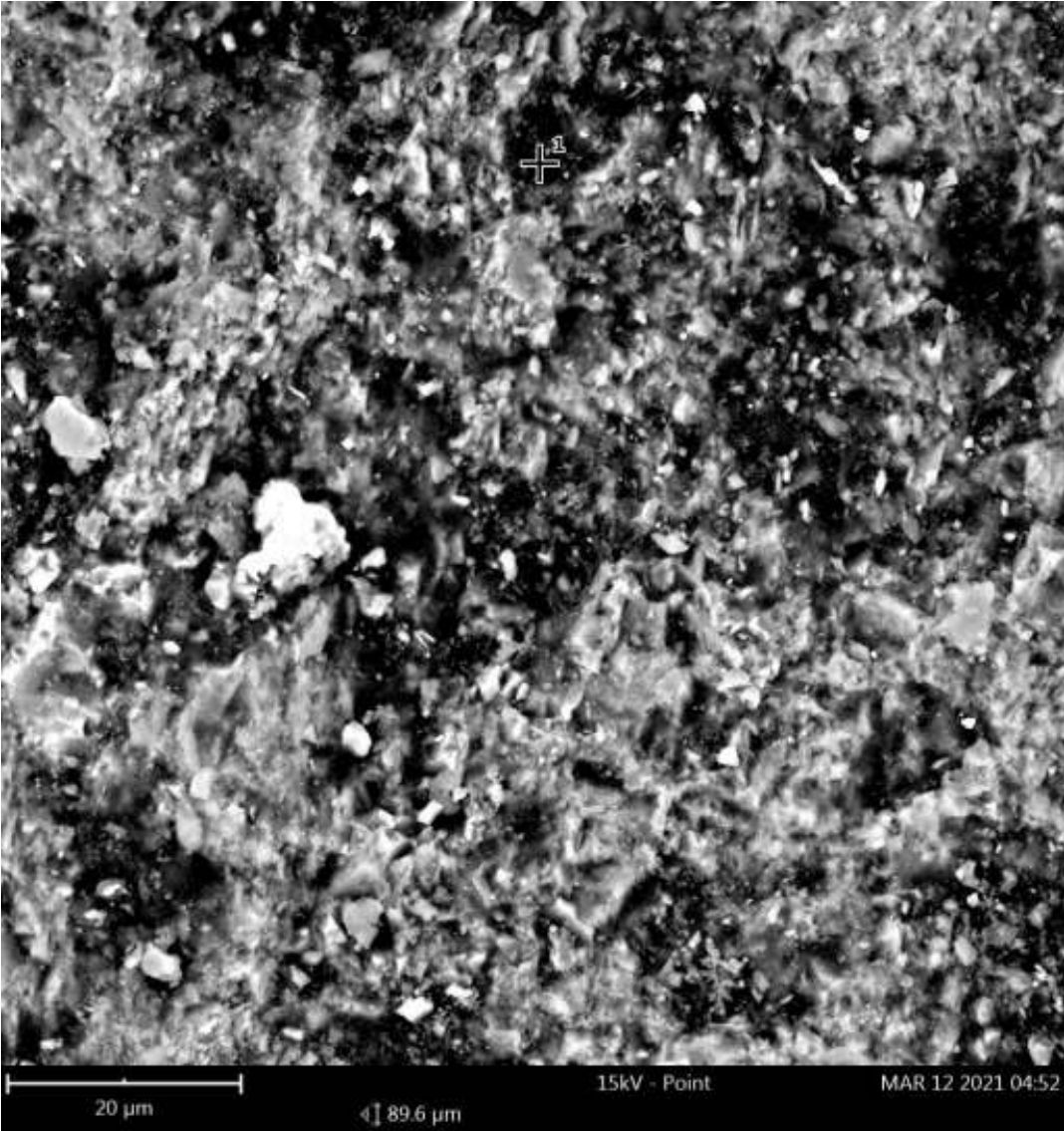
3. spot (7)



| Element Number | Element Symbol | Element Name | Weight Concentration | Error |
|----------------|----------------|--------------|----------------------|-------|
| 14 | Si | Silicon | 22.9 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 49.4 | 0.0 |
| 6 | C | Carbon | 26.8 | 0.0 |
| 20 | Ca | Calcium | 0.6 | 0.5 |
| 51 | Sb | Antimony | 0.3 | 0.5 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|------------|
| Si | 22.9 | 60.08 | 28.0855 | 1 | 48.987271 | SiO2 | 98.3150387 |
| Ca | 0.6 | 56.08 | 40.078 | 1 | 0.83956285 | CaO | 1.68496127 |
| total | 23.5 | | | total | 49.8268339 | | 100 |

P- 27b (3) 1. spot (1)



Disabled elements: C

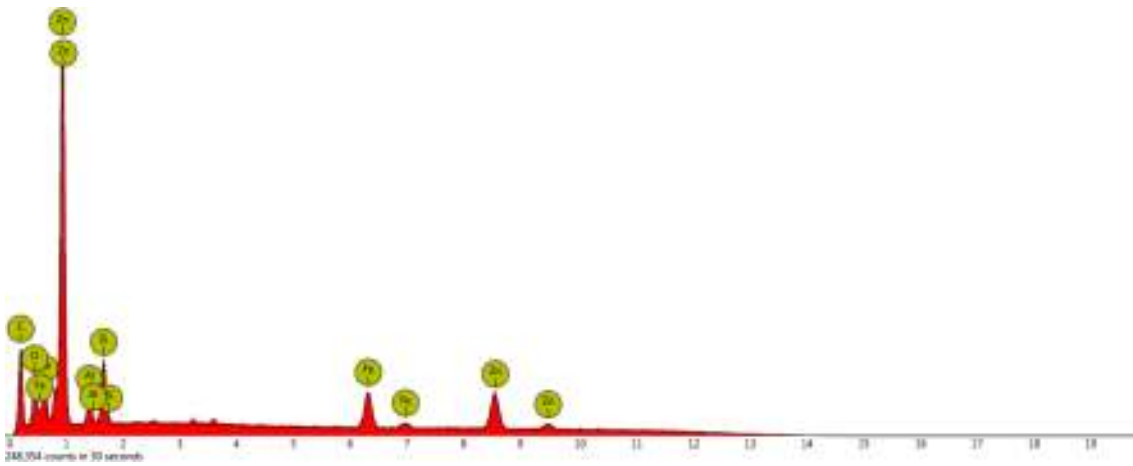
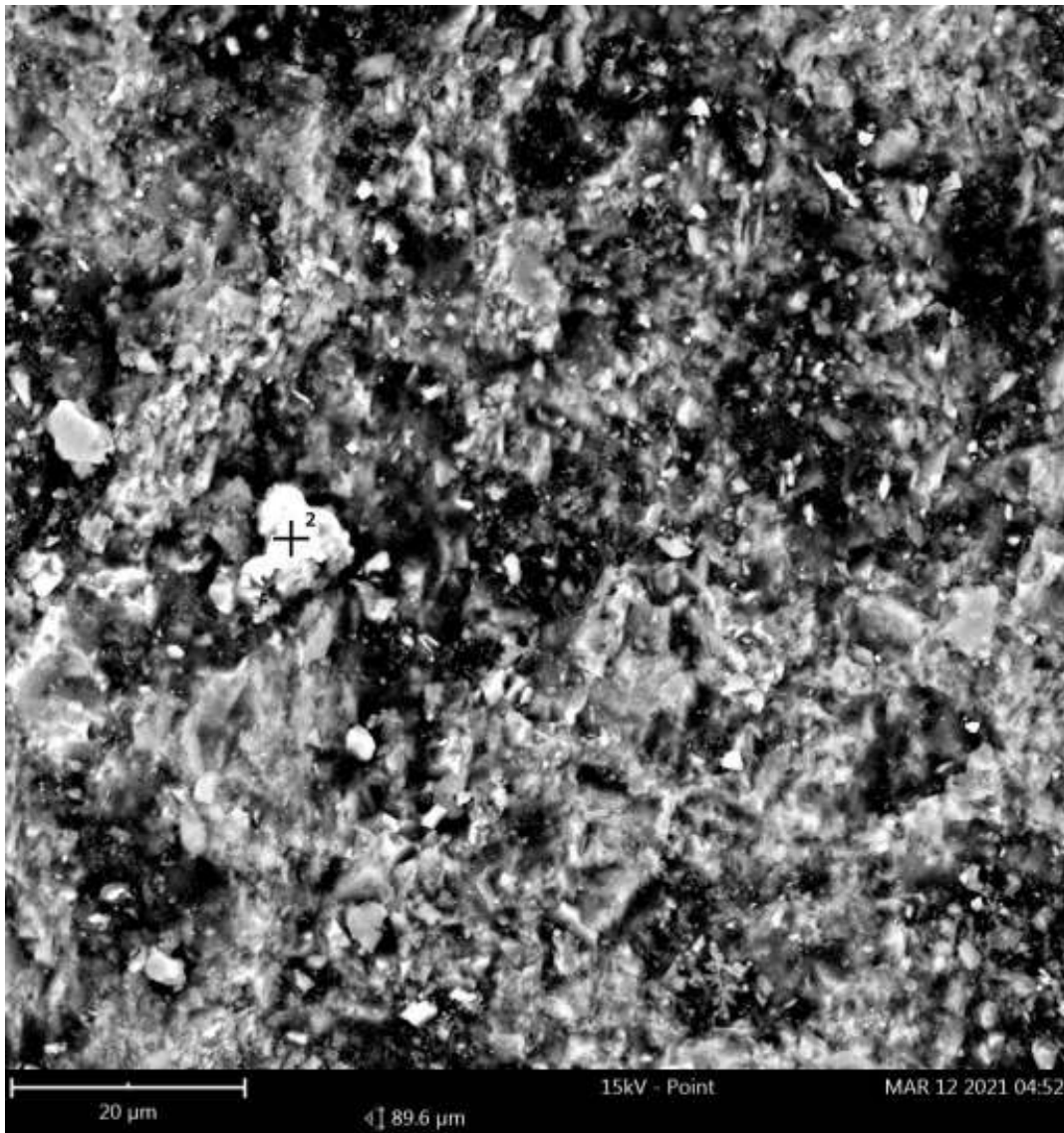
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 31.7 | 0.0 |
| 13 | Al | Aluminium | 14.1 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 33.6 | 0.1 |
| 20 | Ca | Calcium | 6.5 | 0.1 |
| 19 | K | Potassium | 3.8 | 0.0 |
| 11 | Na | Sodium | 3.4 | 0.1 |
| 17 | Cl | Chlorine | 1.9 | 0.5 |
| 12 | Mg | Magnesium | 1.0 | 0.3 |
| 26 | Fe | Iron | 3.1 | 0.4 |
| 16 | S | Sulfur | 0.9 | 1.0 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 31.70 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 67.81 | SiO2 | 55.97 |
| Al | 14.10 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 26.64 | Al2O3 | 21.99 |
| Ca | 6.50 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 9.10 | CaO | 7.51 |
| K | 3.80 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 4.58 | K2O | 3.78 |
| Na | 3.40 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 4.58 | Na2O | 3.78 |
| Mg | 1.00 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 1.66 | MgO | 1.37 |
| Fe | 3.10 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 3.99 | FeO | 3.29 |
| Cl | 1.90 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 1.90 | Cl | 1.57 |
| S | 0.90 | 32.00 | 32.00 | 1.00 | 0.90 | S | 0.74 |
| total | 66.40 | | | total | 121.16 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|----------|--------|------|------|------|------|
| SiO2 | 55.97 | 60.08 | 0.93 | 1.86 | 7.06 | 3.53 |
| Al2O3 | 21.99 | 101.96 | 0.22 | 0.65 | 2.45 | 1.64 |
| CaO | 7.51 | 56.08 | 0.13 | 0.13 | 0.51 | 0.51 |
| K2O | 3.78 | 94.20 | 0.04 | 0.04 | 0.15 | 0.30 |
| Na2O | 3.78 | 61.98 | 0.06 | 0.06 | 0.23 | 0.46 |
| MgO | 1.37 | 40.30 | 0.03 | 0.03 | 0.13 | 0.13 |
| FeO* | 2.01 | 71.85 | 0.03 | 0.03 | 0.11 | 0.11 |
| Fe2O3* | 1.42 | 159.69 | 0.01 | 0.03 | 0.10 | 0.07 |
| Cl | 1.57 | 35.45 | 0.04 | 0.04 | 0.17 | 0.17 |
| S | 0.74 | 32.00 | 0.02 | 0.02 | 0.09 | 0.09 |
| | | | | 2.90 | | 7.00 |
| 11 | oxígenos | | | | | |
| | | 3.79 | | | | |

2. spot (2)



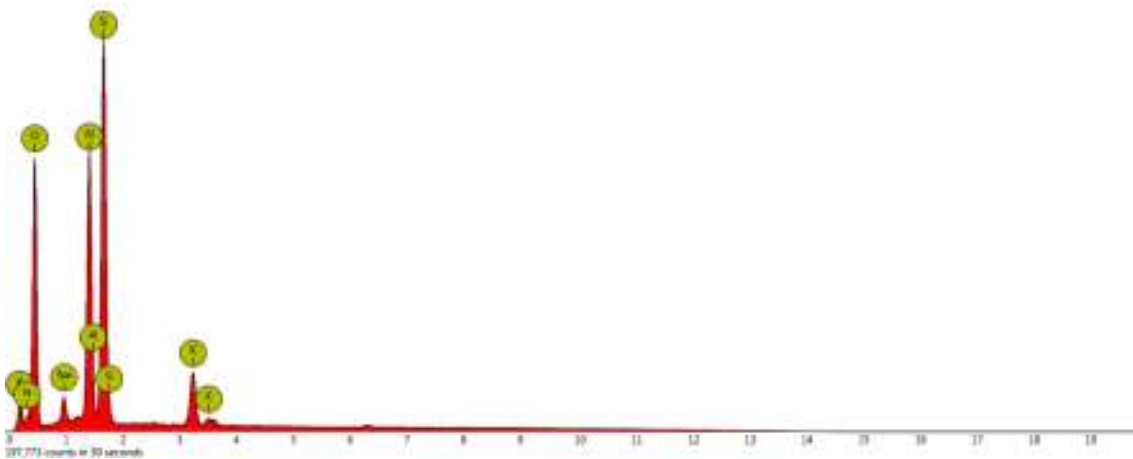
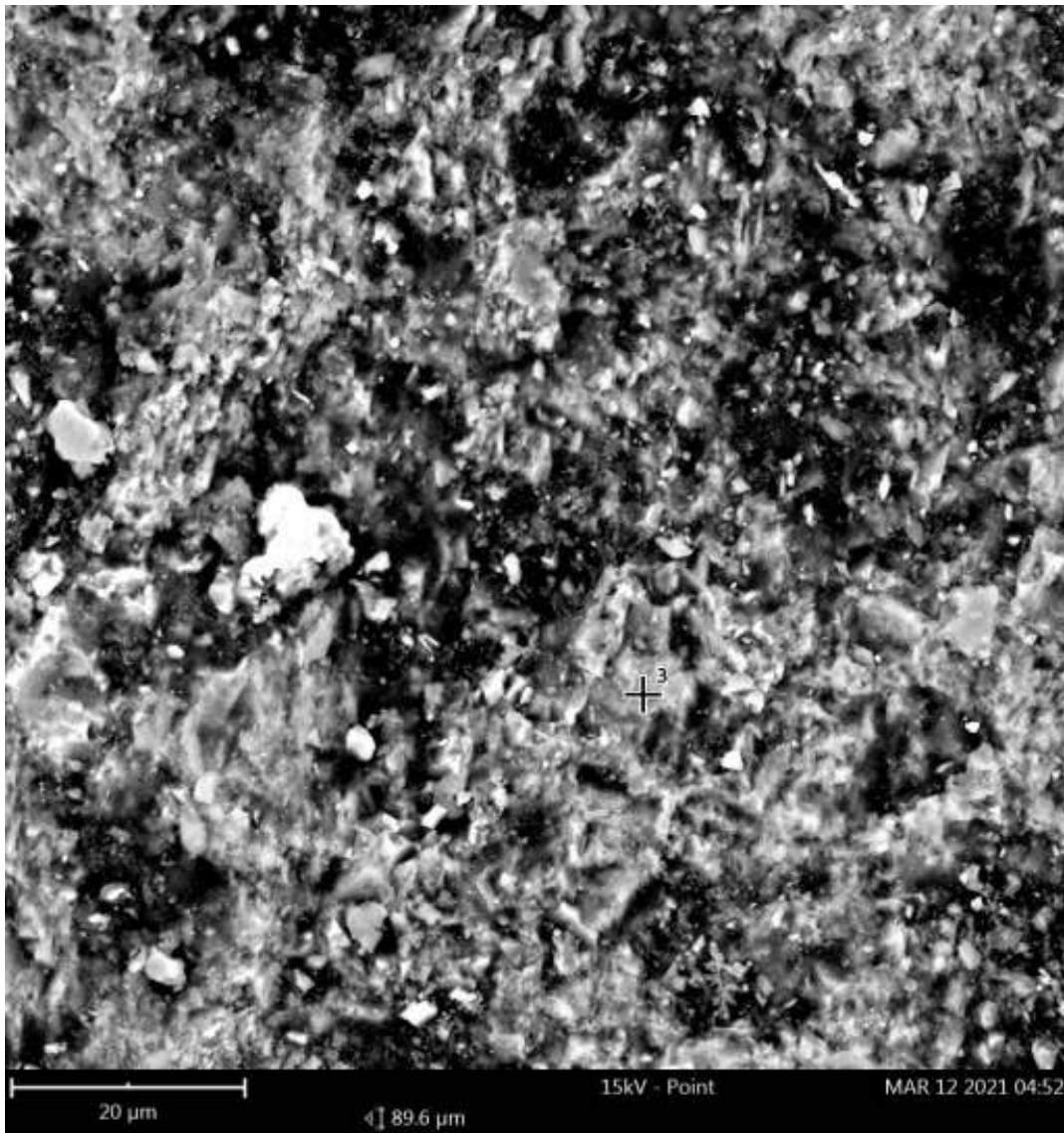
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 6 | C | Carbon | 36.5 | 0.1 |
| 30 | Zn | Zinc | 37.6 | 0.1 |
| 14 | Si | Silicon | 4.0 | 0.0 |
| 26 | Fe | Iron | 10.6 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 9.1 | 0.1 |
| 13 | Al | Aluminium | 2.1 | 0.0 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 6.31 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 13.50 | SiO2 | 16.62 |
| Al | 3.31 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 6.26 | Al2O3 | 7.71 |
| Zn | 59.31 | 44.01 | 65.38 | 1.00 | 39.92 | ZnO | 49.17 |
| Fe | 16.72 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 21.51 | FeO | 26.49 |
| total | 85.65 | | | total | 81.19 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|----------|------|------|------|------|
| SiO2 | 16.62 | 60.08 | 0.28 | 0.55 | 0.98 | 0.49 |
| Al2O3 | 7.71 | 101.96 | 0.08 | 0.23 | 0.40 | 0.27 |
| ZnO | 49.17 | 44.01 | 1.12 | 1.12 | 1.97 | 1.97 |
| FeO | 26.49 | 71.85 | 0.37 | 0.37 | 0.65 | 0.65 |
| | | | | 2.27 | | 3.38 |
| | 4 | oxígenos | | | | |
| | | 1.77 | | | | |

3. spot (3)



Disabled elements: C

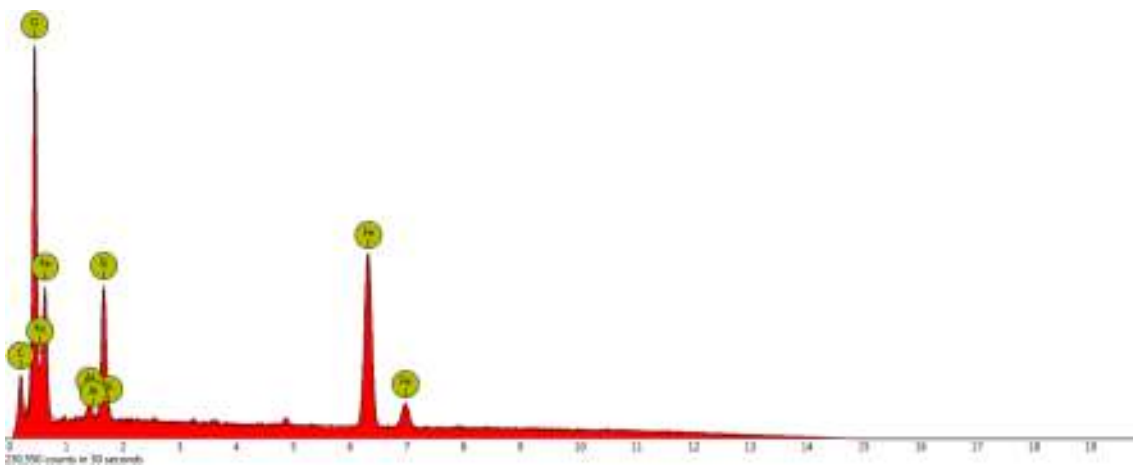
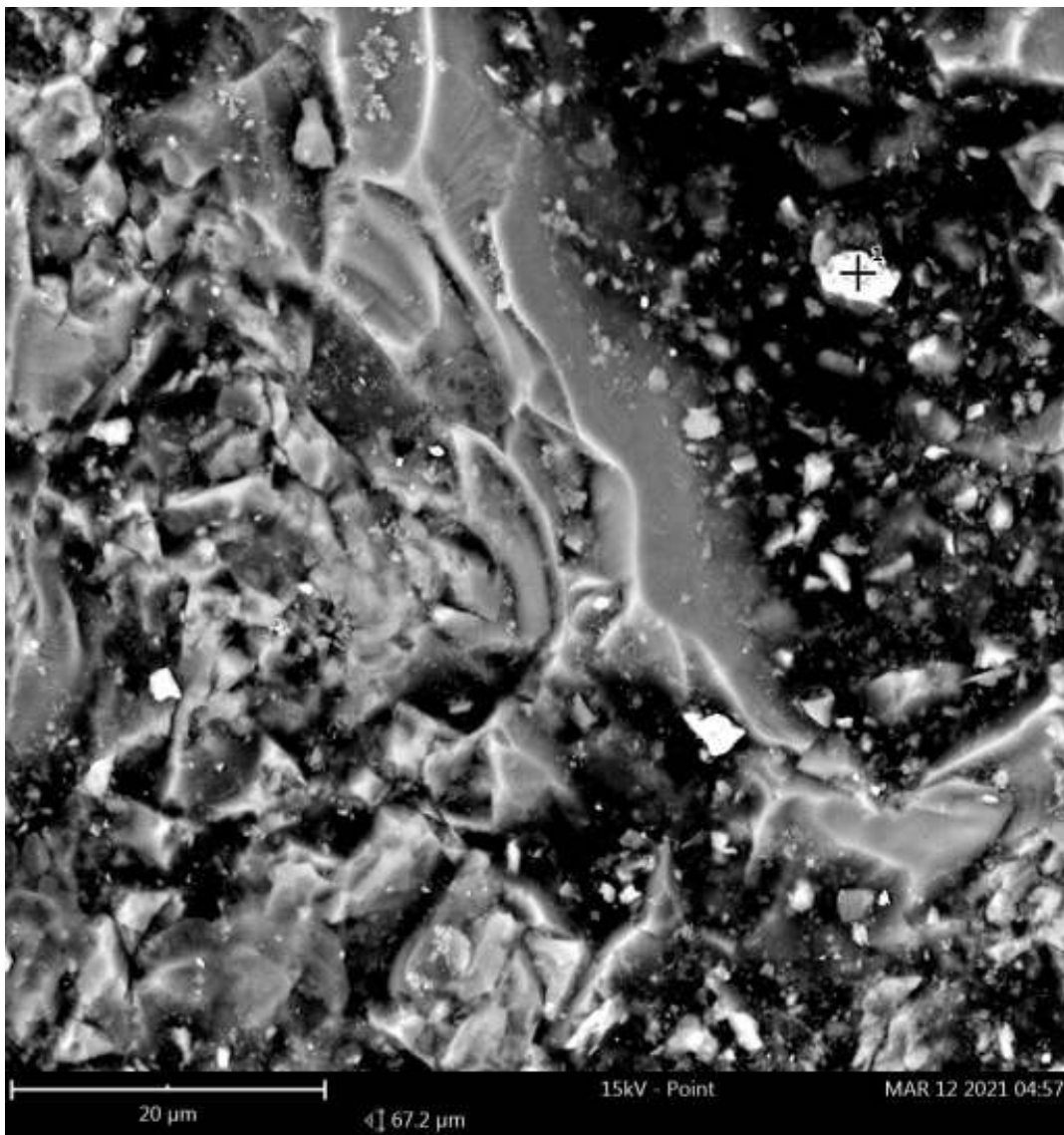
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 21.9 | 0.0 |
| 13 | Al | Aluminium | 15.4 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 49.7 | 0.0 |
| 19 | K | Potassium | 5.0 | 0.0 |
| 11 | Na | Sodium | 2.2 | 0.3 |
| 7 | N | Nitrogen | 5.9 | 1.2 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 21.90 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 46.85 | SiO2 | 55.16 |
| Al | 15.40 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 29.10 | Al2O3 | 34.26 |
| K | 5.00 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 6.02 | K2O | 7.09 |
| Na | 2.20 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 2.97 | Na2O | 3.49 |
| total | 44.50 | | | total | 84.93 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|----------|--------|------|------|------|------|
| SiO2 | 55.16 | 60.08 | 0.92 | 1.84 | 4.94 | 2.47 |
| Al2O3 | 34.26 | 101.96 | 0.34 | 1.01 | 2.71 | 1.81 |
| K2O | 7.09 | 94.20 | 0.08 | 0.08 | 0.20 | 0.40 |
| Na2O | 3.49 | 61.98 | 0.06 | 0.06 | 0.15 | 0.30 |
| | | | | 2.98 | | |
| 8 | oxígenos | | | | | |
| | | 2.69 | | | | |

1. spot (4)



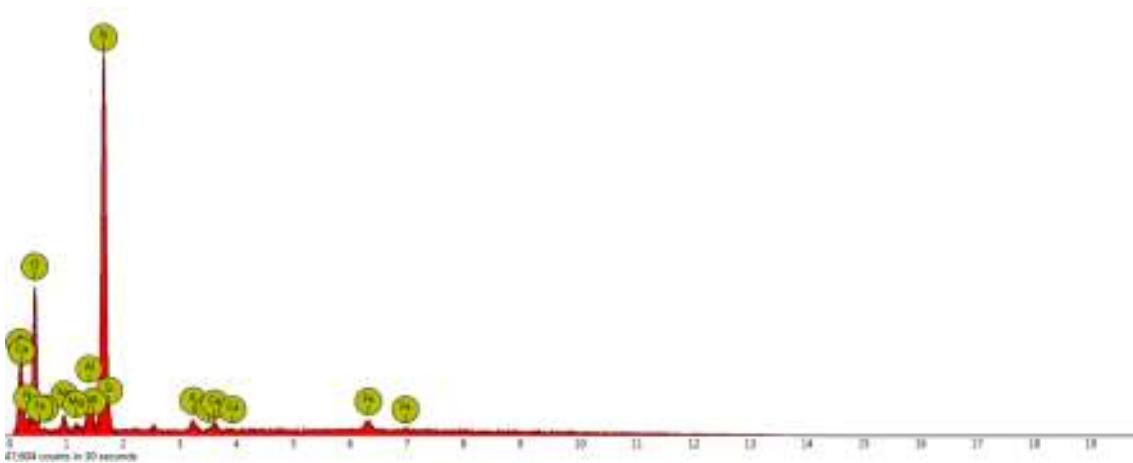
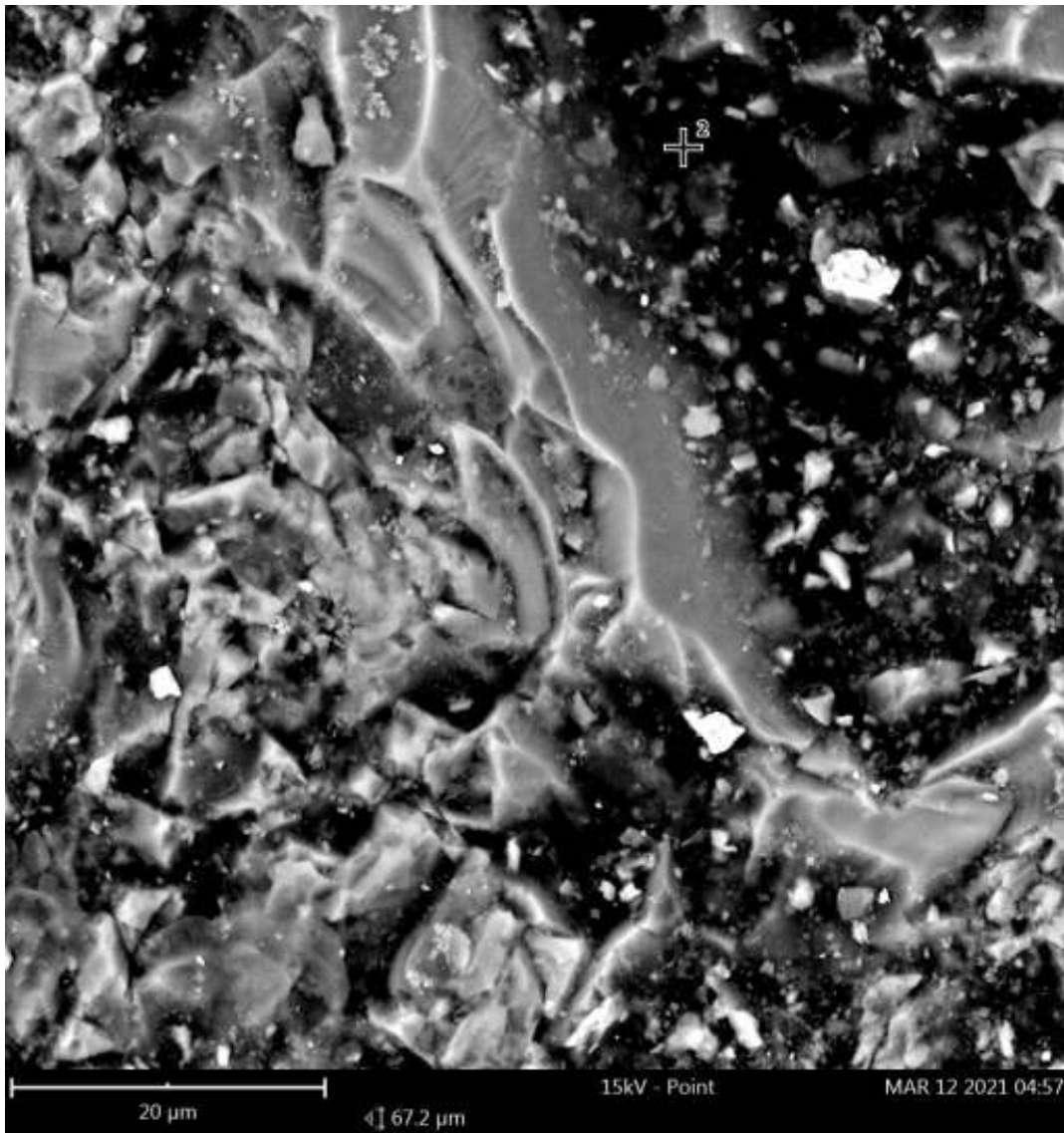
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 8 | O | Oxygen | 33.3 | 0.0 |
| 26 | Fe | Iron | 45.7 | 0.0 |
| 14 | Si | Silicon | 6.3 | 0.0 |
| 6 | C | Carbon | 13.6 | 0.1 |
| 13 | Al | Aluminium | 1.1 | 0.1 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------------------|--------|
| Fe | 45.70 | 159.69 | 55.85 | 2.00 | 65.34 | Fe ₂ O ₃ | 80.77 |
| Si | 6.30 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 13.48 | SiO ₂ | 16.66 |
| Al | 1.10 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 2.08 | Al ₂ O ₃ | 2.57 |
| total | 53.10 | | | total | 80.89 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------|----------|--------|------|------|------|------|
| Fe ₂ O ₃ | 80.77 | 159.69 | 0.51 | 0.51 | 1.34 | 1.34 |
| SiO ₂ | 16.66 | 60.08 | 0.28 | 0.55 | 1.46 | 0.73 |
| Al ₂ O ₃ | 2.57 | 101.96 | 0.03 | 0.08 | 0.20 | 0.13 |
| | | | | 1.14 | | 2.20 |
| 3 | oxígenos | | | | | |
| | 2.64 | | | | | |

2. spot (5)



Disabled elements: C, Pm

Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

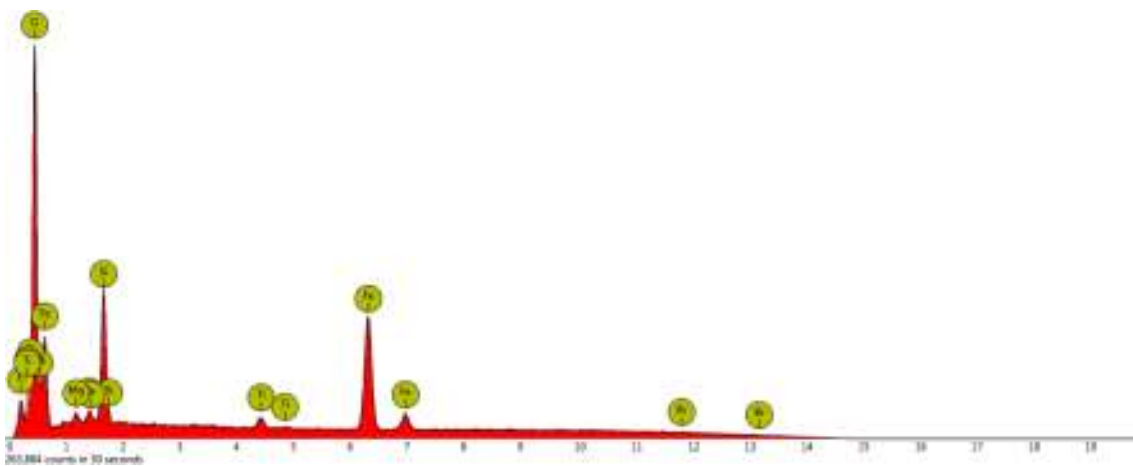
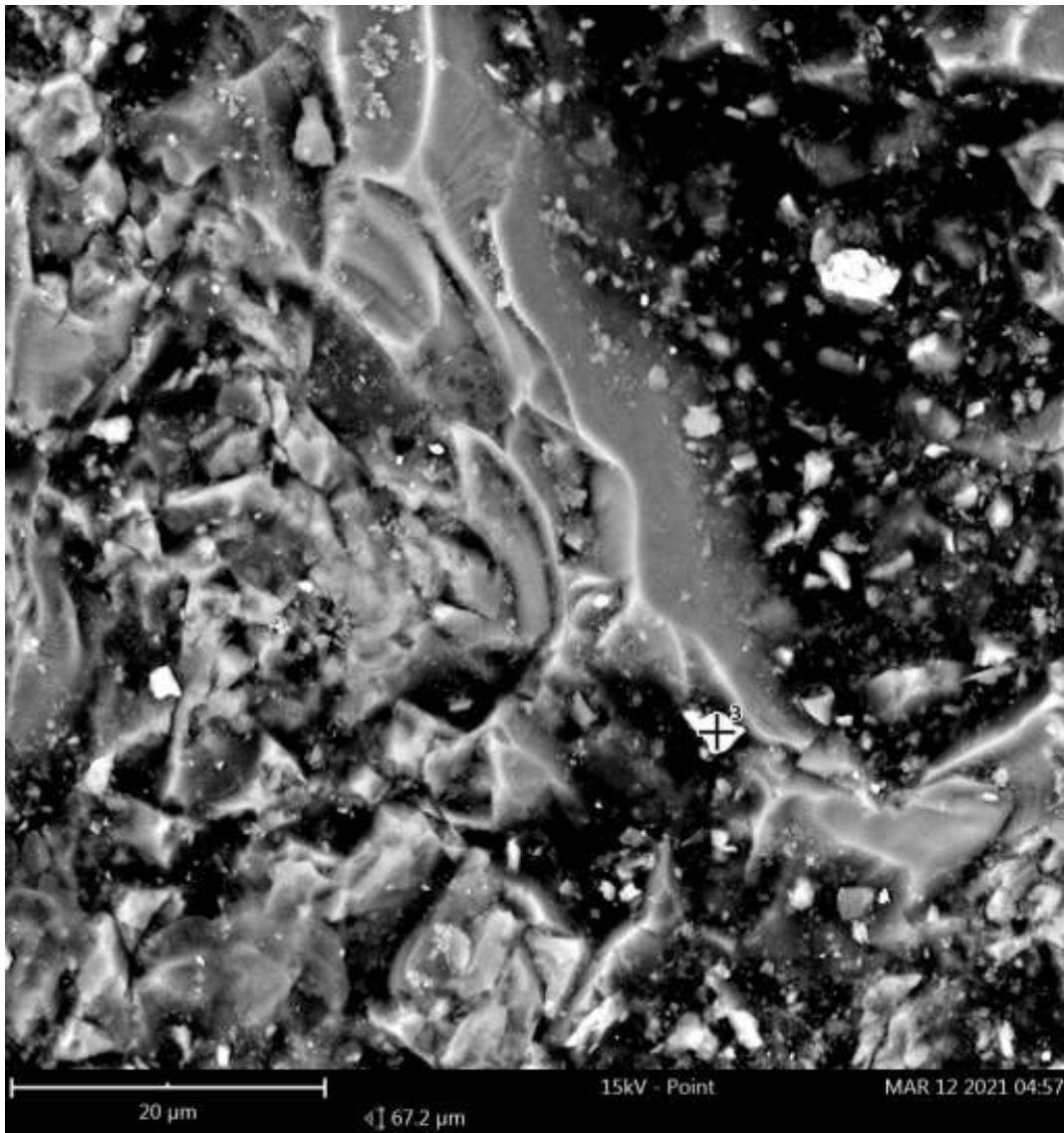
| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 28.7 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 45.2 | 0.1 |
| 13 | Al | Aluminium | 4.0 | 0.2 |
| 11 | Na | Sodium | 2.6 | 0.2 |
| 7 | N | Nitrogen | 11.8 | 2.4 |
| 26 | Fe | Iron | 4.3 | 0.6 |
| 19 | K | Potassium | 1.4 | 0.3 |
| 20 | Ca | Calcium | 1.1 | 0.6 |
| 12 | Mg | Magnesium | 0.9 | 1.5 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 28.70 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 61.39 | SiO2 | 74.23 |
| Al | 4.00 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 7.56 | Al2O3 | 9.14 |
| Ca | 1.10 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 1.54 | CaO | 1.86 |
| K | 1.40 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 1.69 | K2O | 2.04 |
| Na | 2.60 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 3.50 | Na2O | 4.24 |
| Mg | 0.90 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 1.49 | MgO | 1.80 |
| Fe | 4.30 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 5.53 | FeO | 6.69 |
| total | 43.00 | | | total | 82.71 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|--------|------|------|------|------|
| SiO2 | 74.23 | 60.08 | 1.24 | 2.47 | 9.06 | 4.53 |
| Al2O3 | 9.14 | 101.96 | 0.09 | 0.27 | 0.99 | 0.66 |
| CaO | 1.86 | 56.08 | 0.03 | 0.03 | 0.12 | 0.12 |
| K2O | 2.04 | 94.20 | 0.02 | 0.02 | 0.08 | 0.16 |
| Na2O | 4.24 | 61.98 | 0.07 | 0.07 | 0.25 | 0.50 |
| MgO | 1.80 | 40.30 | 0.04 | 0.04 | 0.16 | 0.16 |
| FeO | 6.69 | 71.85 | 0.09 | 0.09 | 0.34 | 0.34 |
| | | | | 3.00 | | 6.47 |

11 oxígenos
3.67

3. spot (6)



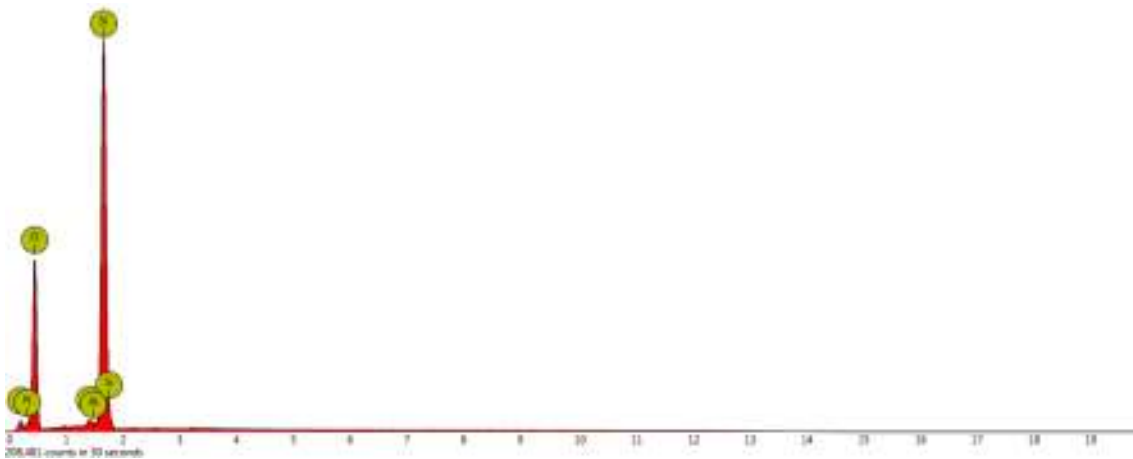
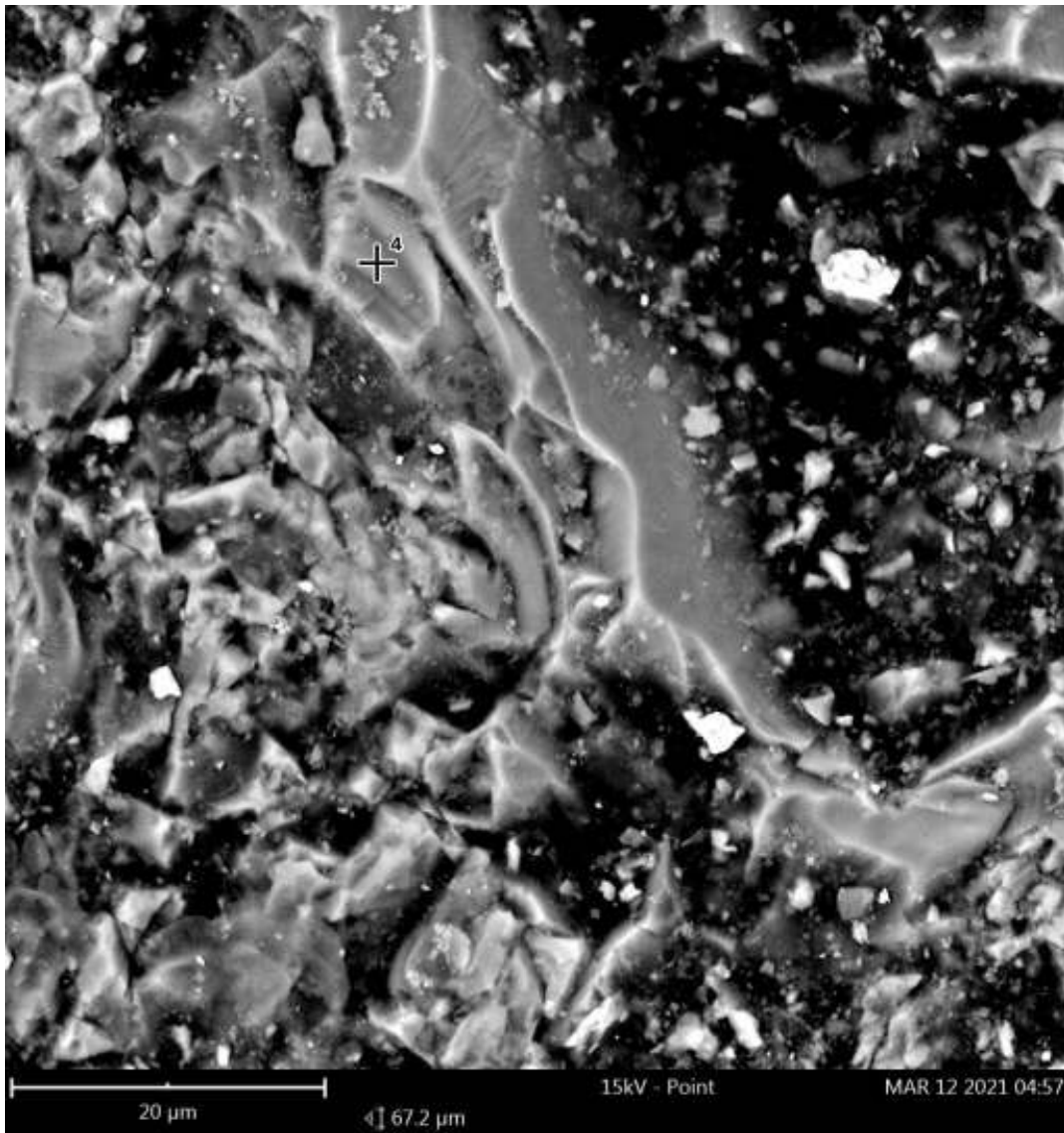
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 8 | O | Oxygen | 42.1 | 0.0 |
| 26 | Fe | Iron | 35.7 | 0.0 |
| 14 | Si | Silicon | 7.0 | 0.0 |
| 6 | C | Carbon | 11.3 | 0.1 |
| 22 | Ti | Titanium | 1.4 | 0.4 |
| 35 | Br | Bromine | 1.7 | 0.0 |
| 12 | Mg | Magnesium | 0.7 | 0.3 |

| 10 | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|-------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 7.00 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 14.97 | SiO2 | 22.65 |
| Ti | 1.40 | 79.87 | 47.86 | 1.00 | 2.34 | TiO2 | 3.53 |
| Fe | 35.70 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 45.93 | FeO | 69.48 |
| Mg | 0.70 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 1.16 | MgO | 1.76 |
| Br | 1.70 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 1.70 | Br | 2.57 |
| total | 46.50 | | | total | 66.10 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|----------|--------|------|------|------|------|
| SiO2 | 22.65 | 60.08 | 0.38 | 0.75 | 2.06 | 1.03 |
| TiO2 | 3.53 | 79.87 | 0.04 | 0.09 | 0.24 | 0.12 |
| FeO* | 24.83 | 71.85 | 0.35 | 0.35 | 0.94 | 0.94 |
| Fe2O3* | 49.63 | 159.69 | 0.31 | 0.93 | 2.55 | 1.70 |
| MgO | 1.76 | 40.30 | 0.04 | 0.04 | 0.12 | 0.12 |
| Br | 2.57 | 79.90 | 0.03 | 0.03 | 0.09 | 0.09 |
| | | | 1.15 | 2.20 | | 4.00 |
| 6 | oxígenos | | | | | |
| | 2.73 | | | | | |

4. spot (7)

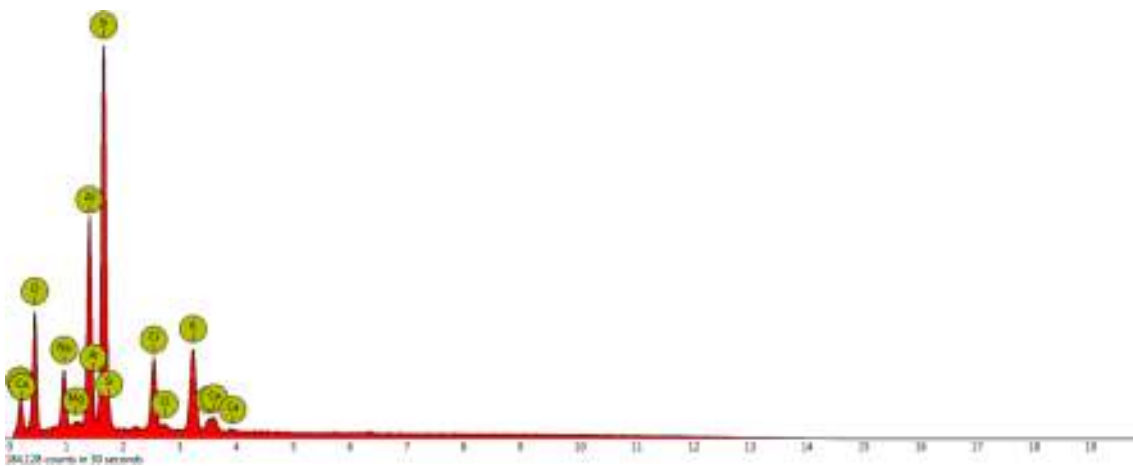


Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 29.3 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 53.8 | 0.0 |
| 13 | Al | Aluminium | 0.6 | 1.8 |
| 6 | C | Carbon | 10.4 | 0.1 |
| 7 | N | Nitrogen | 5.9 | 1.2 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|------------------|--------|
| Si | 29.30 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 62.68 | SiO ₂ | 96.51 |
| Al | 0.60 | 101.96 | 26.98 | 1.00 | 2.27 | TiO ₂ | 3.49 |
| total | 29.90 | | | total | 64.95 | | 100.00 |

1. spot (8)



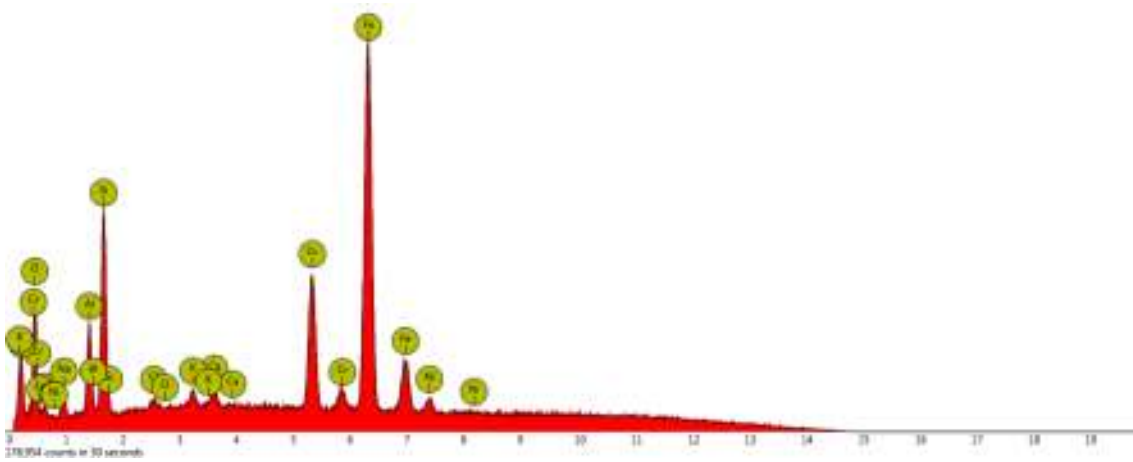
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 26.5 | 0.0 |
| 13 | Al | Aluminium | 14.6 | 0.0 |
| 19 | K | Potassium | 9.9 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 34.5 | 0.1 |
| 17 | Cl | Chlorine | 7.0 | 0.1 |
| 11 | Na | Sodium | 5.5 | 0.0 |
| 20 | Ca | Calcium | 1.6 | 0.2 |
| 12 | Mg | Magnesium | 0.4 | 0.4 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 26.50 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 56.69 | SiO2 | 49.94 |
| Al | 14.60 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 27.59 | Al2O3 | 24.30 |
| Ca | 1.60 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 2.24 | CaO | 1.97 |
| K | 9.90 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 11.93 | K2O | 10.51 |
| Na | 5.50 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 7.41 | Na2O | 6.53 |
| Mg | 0.40 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 0.66 | MgO | 0.58 |
| Cl | 7.00 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 7.00 | Cl | 6.17 |
| total | 65.50 | | | total | 113.52 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------|-------|--------|------|------|------|------|
| SiO2 | 49.94 | 60.08 | 0.83 | 1.66 | 6.49 | 3.24 |
| Al2O3 | 24.30 | 101.96 | 0.24 | 0.72 | 2.79 | 1.86 |
| CaO | 1.97 | 56.08 | 0.04 | 0.04 | 0.14 | 0.14 |
| K2O | 10.51 | 94.20 | 0.11 | 0.11 | 0.44 | 0.87 |
| Na2O | 6.53 | 61.98 | 0.11 | 0.11 | 0.41 | 0.82 |
| MgO | 0.58 | 40.30 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.06 |
| Cl | 6.17 | 35.45 | 0.17 | 0.17 | 0.68 | 0.68 |
| | | | | 2.82 | | 7.67 |
| 11 oxígenos | | | | | | 3.90 |

2. spot (9)



Disabled elements: C

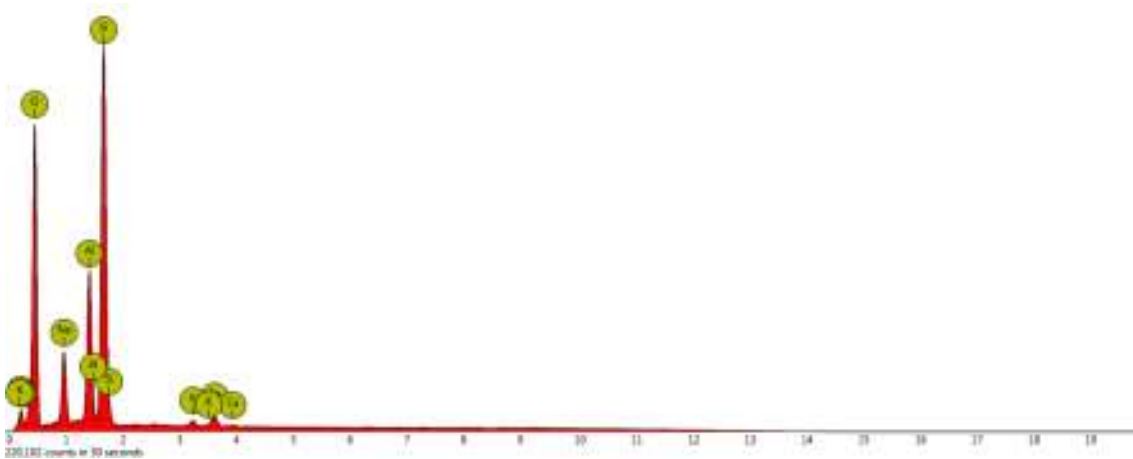
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 26 | Fe | Iron | 60.9 | 0.0 |
| 24 | Cr | Chromium | 12.7 | 0.1 |
| 14 | Si | Silicon | 7.5 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 6.7 | 0.1 |
| 13 | Al | Aluminium | 4.2 | 0.0 |
| 11 | Na | Sodium | 2.4 | 0.0 |
| 20 | Ca | Calcium | 0.8 | 0.5 |
| 28 | Ni | Nickel | 3.9 | 0.4 |
| 19 | K | Potassium | 0.6 | 0.4 |
| 17 | Cl | Chlorine | 0.4 | 1.2 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Fe | 60.90 | 159.69 | 55.85 | 2.00 | 87.07 | Fe2O3 | 62.17 |
| Cr | 12.70 | 151.99 | 51.99 | 2.00 | 18.56 | Cr2O3 | 13.25 |
| Si | 7.50 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 16.04 | SiO2 | 11.46 |
| Al | 4.20 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 7.94 | Al2O3 | 5.67 |
| Na | 2.40 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 3.24 | Na2O | 2.31 |
| Ca | 0.80 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 1.12 | CaO | 0.80 |
| Ni | 3.90 | 74.69 | 58.69 | 1.00 | 4.96 | NiO | 3.54 |
| K | 0.60 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 0.72 | K2O | 0.52 |
| Cl | 0.40 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 0.40 | Cl | 0.29 |
| total | 93.40 | | | total | 140.05 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|-------|--------|------|------|------|------|
| Fe2O3 | 62.17 | 159.69 | 0.39 | 1.17 | 1.69 | 1.12 |
| Cr2O3 | 13.25 | 151.99 | 0.09 | 0.26 | 0.38 | 0.25 |
| SiO2 | 11.46 | 60.08 | 0.19 | 0.38 | 0.55 | 0.28 |
| Al2O3 | 5.67 | 101.96 | 0.06 | 0.17 | 0.24 | 0.16 |
| Na2O | 2.31 | 61.98 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.11 |
| CaO | 0.80 | 56.08 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 |
| NiO | 3.54 | 74.69 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.07 |
| K2O | 0.52 | 94.20 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.03 |
| Cl | 0.29 | 35.45 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| | | | | 2.08 | | 2.05 |
| 3 oxígenos | | | | | | 1.44 |

3. spot (10)



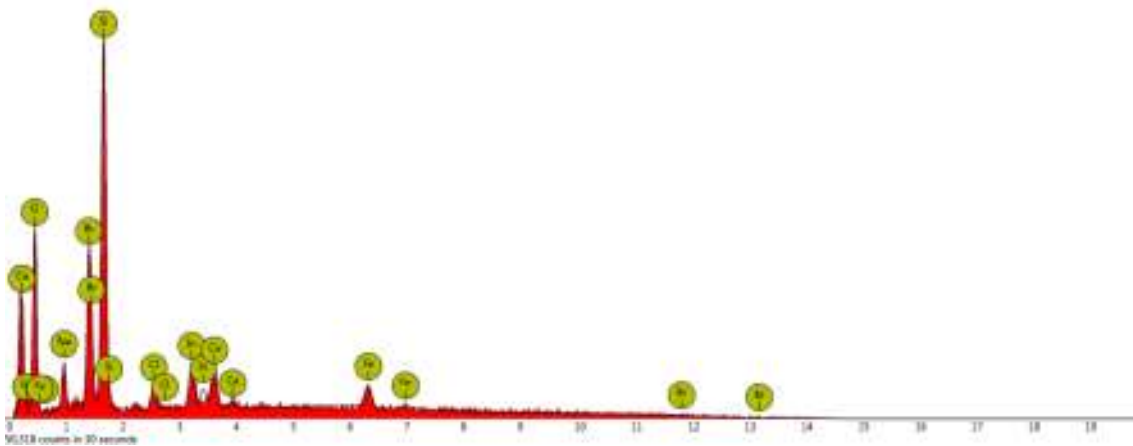
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 20.4 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 49.9 | 0.0 |
| 13 | Al | Aluminium | 9.1 | 0.0 |
| 11 | Na | Sodium | 6.3 | 0.0 |
| 6 | C | Carbon | 12.7 | 0.3 |
| 20 | Ca | Calcium | 1.0 | 0.2 |
| 19 | K | Potassium | 0.5 | 0.1 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 20.40 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 43.64 | SiO2 | 61.18 |
| Al | 9.10 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 17.19 | Al2O3 | 24.11 |
| Ca | 1.00 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 1.40 | CaO | 1.96 |
| K | 0.50 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 0.60 | K2O | 0.84 |
| Na | 6.30 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 8.49 | Na2O | 11.91 |
| total | 37.30 | | | total | 71.33 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|-------|--------|------|------|------|------|
| SiO2 | 61.18 | 60.08 | 1.02 | 2.04 | 5.46 | 2.73 |
| Al2O3 | 24.11 | 101.96 | 0.24 | 0.71 | 1.90 | 1.27 |
| CaO | 1.96 | 56.08 | 0.03 | 0.03 | 0.09 | 0.09 |
| K2O | 0.84 | 94.20 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.05 |
| Na2O | 11.91 | 61.98 | 0.19 | 0.19 | 0.52 | 1.03 |
| | | | | 2.98 | | |
| 8 oxígenos | | | | | | |
| | | 2.68 | | | | |

4. spot (11)



Disabled elements: C

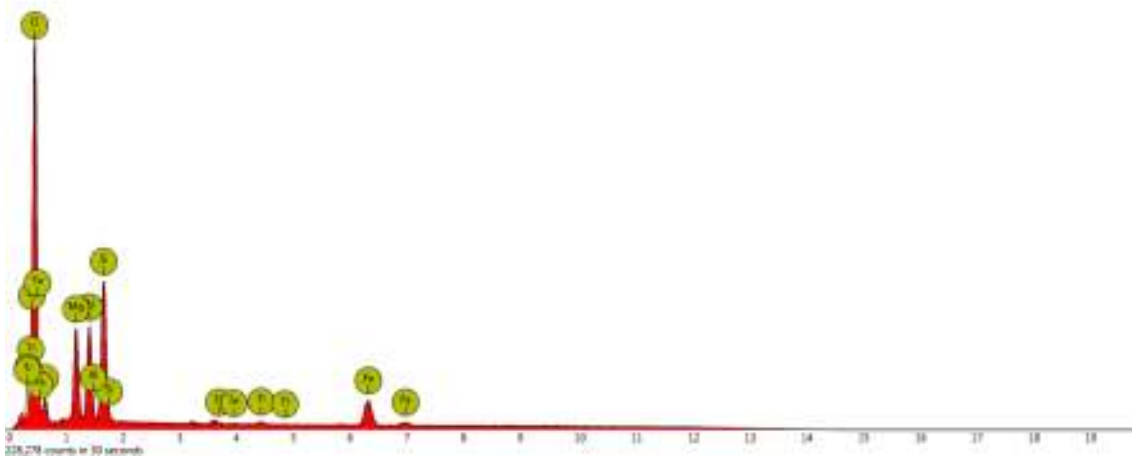
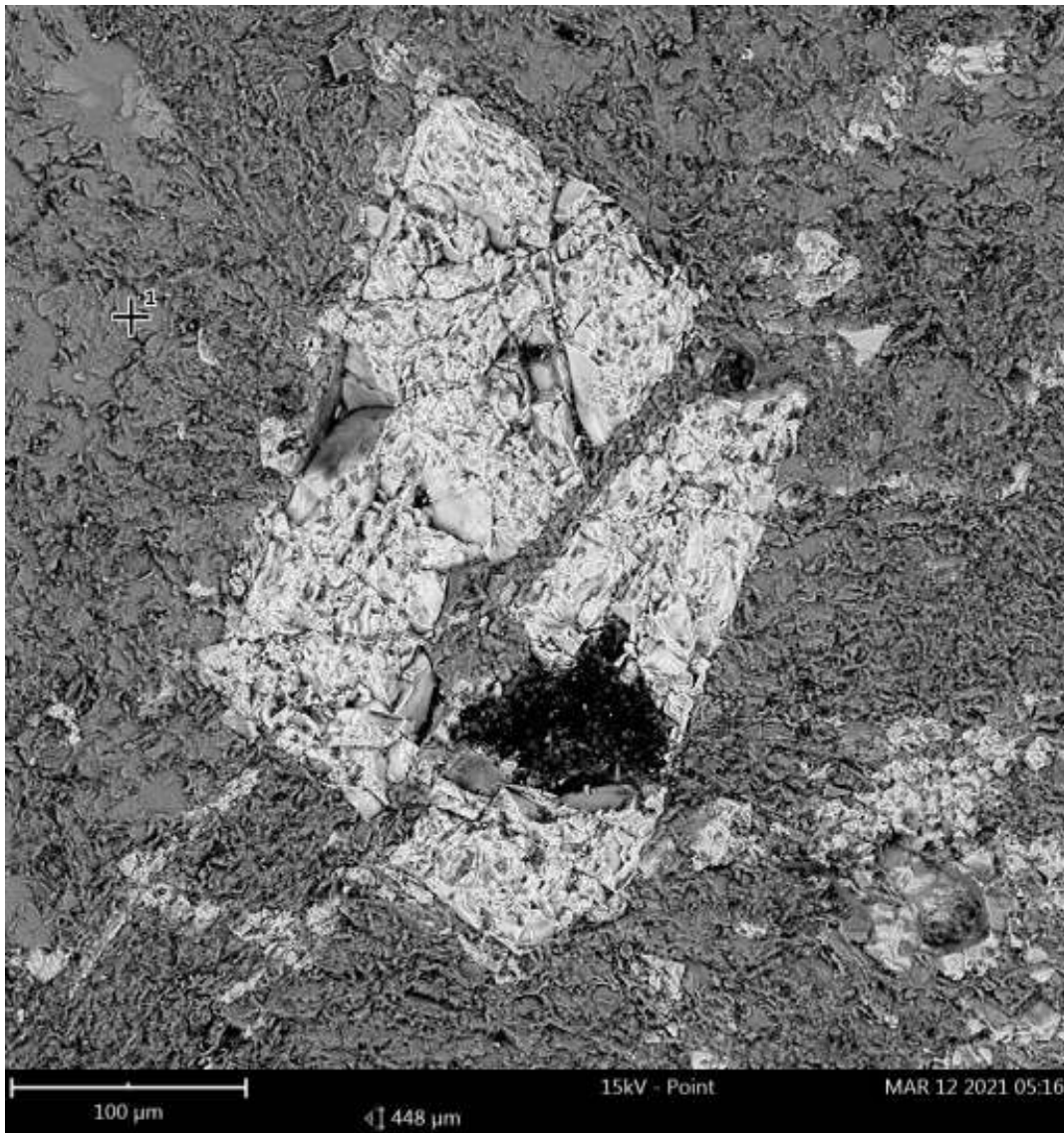
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 21.1 | 0.0 |
| 35 | Br | Bromine | 20.2 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 33.3 | 0.3 |
| 49 | In | Indium | 11.6 | 0.8 |
| 20 | Ca | Calcium | 2.8 | 0.4 |
| 11 | Na | Sodium | 3.5 | 0.3 |
| 26 | Fe | Iron | 5.9 | 0.2 |
| 17 | Cl | Chlorine | 1.5 | 0.4 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------------------|--------|
| Si | 21.10 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 45.14 | SiO ₂ | 46.09 |
| In | 11.60 | 277.64 | 114.81 | 2.00 | 14.03 | In ₂ O ₃ | 14.32 |
| Ca | 2.80 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 3.92 | CaO | 4.00 |
| Na | 3.50 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 4.72 | Na ₂ O | 4.82 |
| Fe | 5.90 | 159.69 | 55.85 | 2.00 | 8.44 | Fe ₂ O ₃ | 8.61 |
| Br | 20.20 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 20.20 | Br | 20.63 |
| Cl | 1.50 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 1.50 | Cl | 1.53 |
| total | 66.60 | | | total | 97.93 | | 100.00 |

NO DETERMINADO

P-27b (4) 1. spot (1)



Disabled elements: C

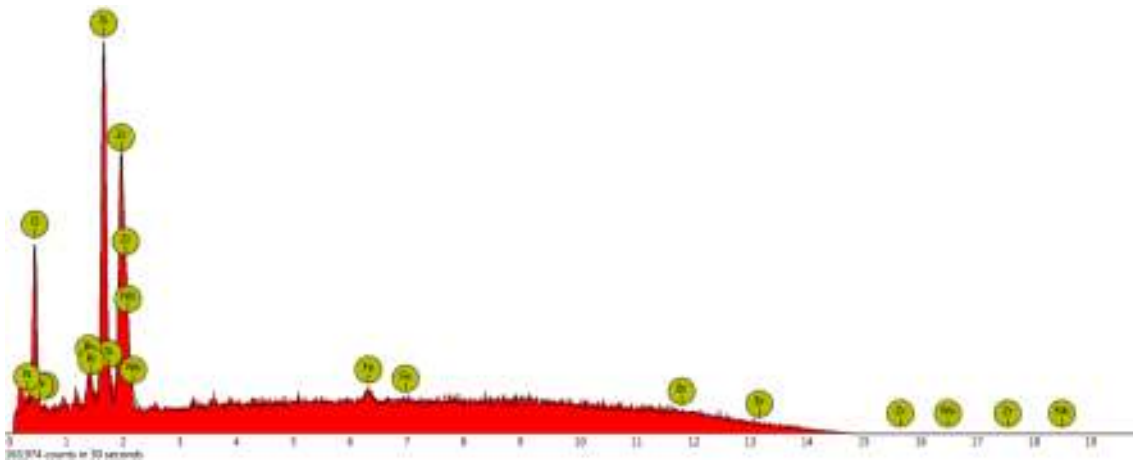
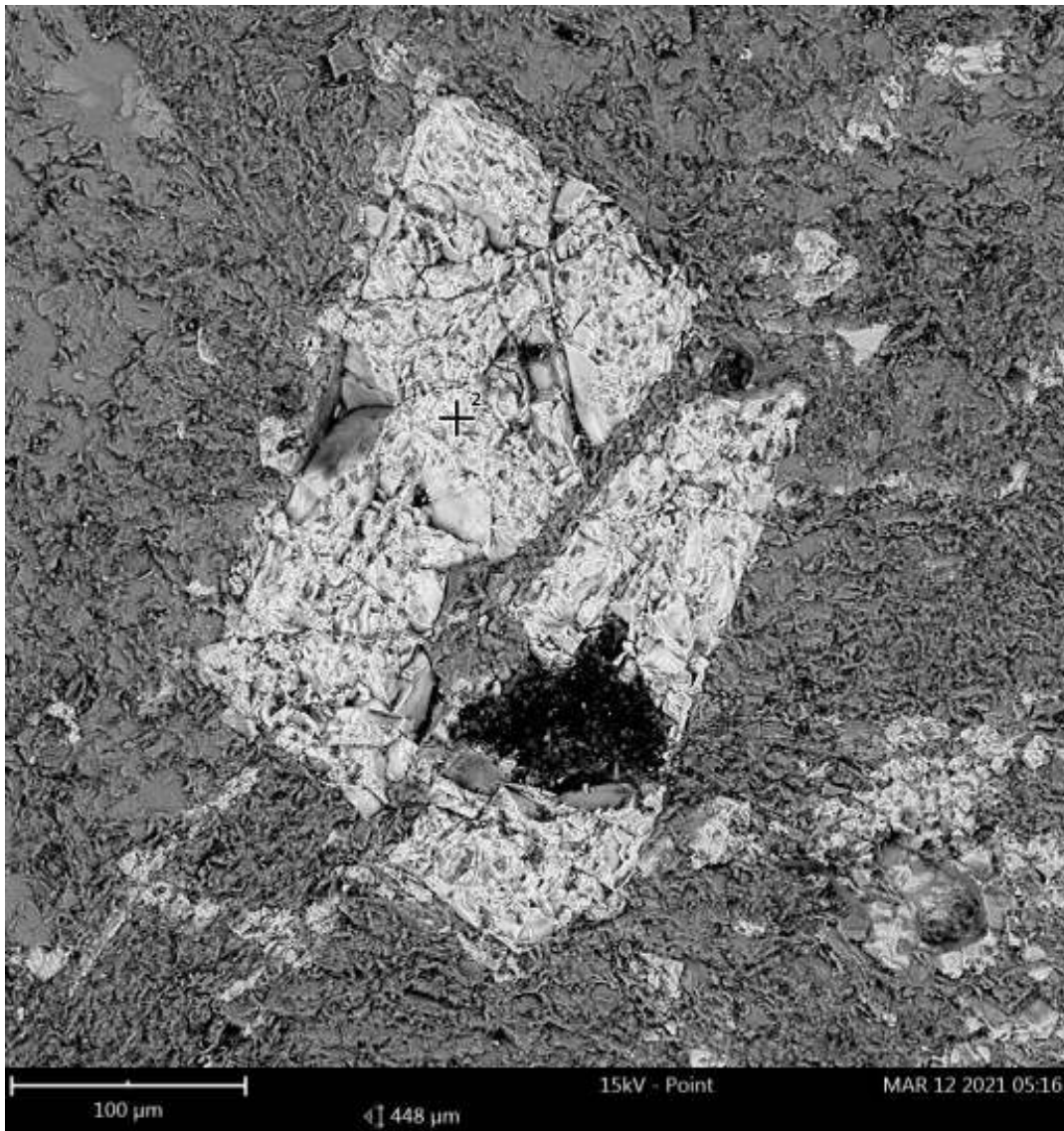
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 8 | O | Oxygen | 54.9 | 0.0 |
| 14 | Si | Silicon | 12.2 | 0.0 |
| 13 | Al | Aluminium | 9.7 | 0.0 |
| 12 | Mg | Magnesium | 9.3 | 0.0 |
| 26 | Fe | Iron | 12.3 | 0.1 |
| 22 | Ti | Titanium | 0.6 | 0.8 |
| 52 | Te | Tellurium | 0.9 | 1.6 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 12.20 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 26.10 | SiO2 | 30.06 |
| Al | 9.70 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 18.33 | Al2O3 | 21.11 |
| Ti | 6.00 | 79.87 | 47.87 | 1.00 | 10.01 | TiO2 | 11.53 |
| Te | 0.90 | 159.60 | 127.60 | 1.00 | 1.13 | TeO2 | 1.30 |
| Mg | 9.30 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 15.42 | MgO | 17.76 |
| Fe | 12.30 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 15.82 | FeO | 18.23 |
| total | 50.40 | | | total | 86.81 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|-------|----------|------|------|------|------|
| SiO2 | 30.06 | 60.08 | 0.50 | 1.00 | 2.27 | 1.14 |
| Al2O3 | 21.11 | 101.96 | 0.21 | 0.62 | 1.41 | 0.94 |
| TiO2 | 11.53 | 79.87 | 0.14 | 0.29 | 0.66 | 0.33 |
| TeO2 | 1.30 | 159.60 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.02 |
| MgO | 17.76 | 40.30 | 0.44 | 0.44 | 1.00 | 1.00 |
| FeO* | 15.24 | 71.85 | 0.21 | 0.21 | 0.48 | 0.48 |
| Fe2O3* | 3.32 | 159.69 | 0.02 | 0.06 | 0.14 | 0.09 |
| | | | | 2.64 | | 3.91 |
| | 6 | oxígenos | | | | 2.27 |

2. spot (2)



Disabled elements: C, Mg, Sb

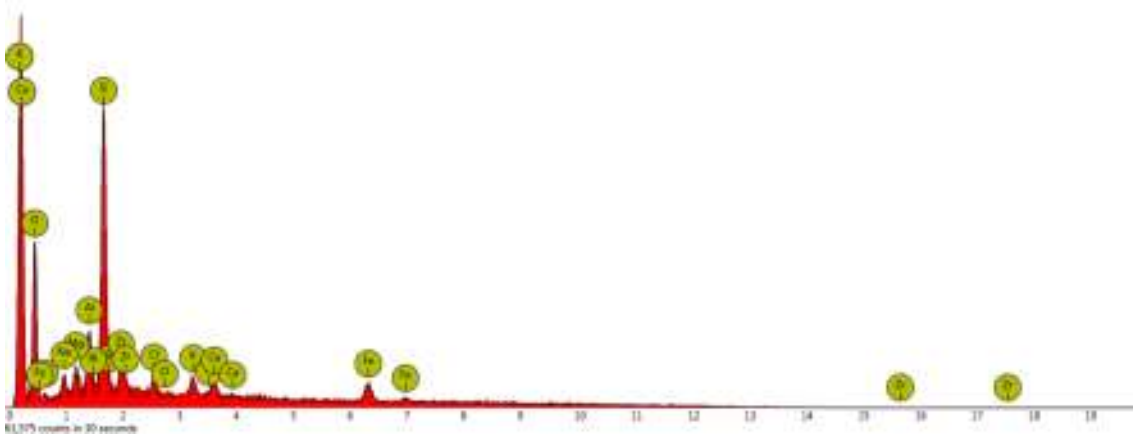
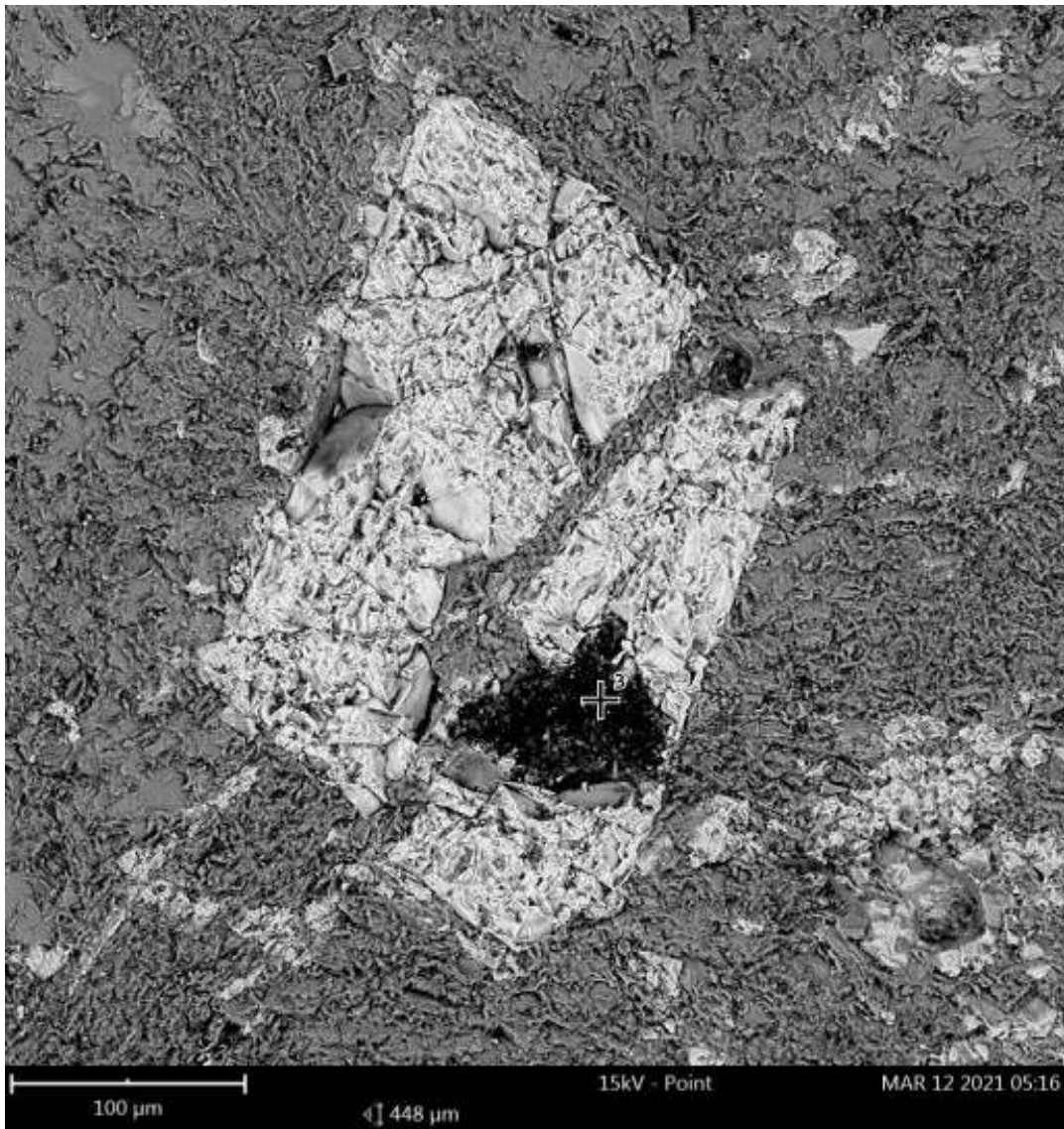
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 13.3 | 0.0 |
| 40 | Zr | Zirconium | 35.5 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 33.4 | 0.1 |
| 41 | Nb | Niobium | 3.7 | 0.0 |
| 35 | Br | Bromine | 3.8 | 0.0 |
| 26 | Fe | Iron | 3.1 | 0.8 |
| 7 | N | Nitrogen | 7.3 | 1.3 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 12.20 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 26.10 | SiO2 | 43.03 |
| Zr | 9.70 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 13.10 | ZrO2 | 21.60 |
| Nb | 6.00 | 265.81 | 92.90 | 2.00 | 8.58 | Nb2O5 | 14.15 |
| Br | 0.90 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 0.90 | Br | 1.48 |
| Fe | 9.30 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 11.96 | FeO | 19.73 |
| total | 38.10 | | | total | 60.65 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|----------|------|------|------|------|
| SiO2 | 43.03 | 60.08 | 0.72 | 1.43 | 2.45 | 1.22 |
| ZrO2 | 21.60 | 123.22 | 0.18 | 0.35 | 0.60 | 0.30 |
| Nb2O5 | 14.15 | 265.81 | 0.05 | 0.27 | 0.45 | 0.18 |
| Br | 1.48 | 79.90 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 |
| FeO | 19.73 | 71.85 | 0.27 | 0.27 | 0.47 | 0.47 |
| | | | | 2.34 | | |
| | 4 | oxígenos | | | | |
| | | 1.71 | | | | |

3. spot (3)



Disabled elements: C

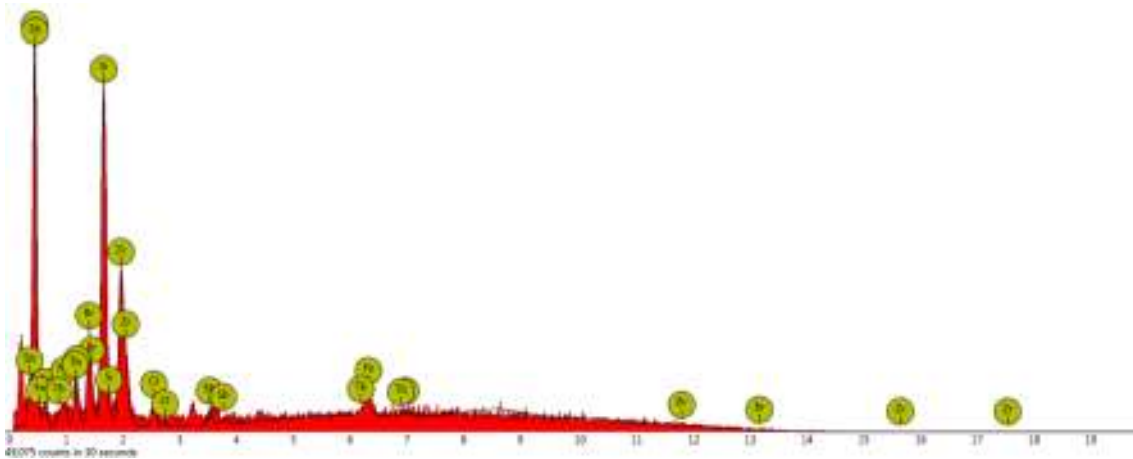
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 21.7 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 40.4 | 0.2 |
| 13 | Al | Aluminium | 6.0 | 0.2 |
| 40 | Zr | Zirconium | 10.1 | 0.0 |
| 12 | Mg | Magnesium | 3.0 | 4.4 |
| 26 | Fe | Iron | 8.9 | 0.4 |
| 17 | Cl | Chlorine | 2.3 | 0.7 |
| 19 | K | Potassium | 2.3 | 0.3 |
| 20 | Ca | Calcium | 2.3 | 0.5 |
| 11 | Na | Sodium | 2.9 | 0.3 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 21.70 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 46.42 | SiO2 | 46.41 |
| Al | 6.00 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 11.34 | Al2O3 | 11.33 |
| Zr | 10.10 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 13.64 | ZrO2 | 13.64 |
| Mg | 3.00 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 4.97 | MgO | 4.97 |
| Ca | 2.30 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 3.22 | CaO | 3.22 |
| Fe | 8.90 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 11.45 | FeO | 11.45 |
| K | 2.30 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 2.77 | K2O | 2.77 |
| Na | 2.90 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 3.91 | Na2O | 3.91 |
| Cl | 2.30 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 2.30 | Cl | 2.30 |
| total | 52.00 | | | total | 100.02 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|----------|------|------|------|------|
| SiO2 | 46.41 | 60.08 | 0.77 | 1.54 | 3.57 | 1.78 |
| Al2O3 | 11.33 | 101.96 | 0.11 | 0.33 | 0.77 | 0.51 |
| ZrO2 | 13.64 | 123.22 | 0.11 | 0.22 | 0.51 | 0.26 |
| MgO | 4.97 | 40.30 | 0.12 | 0.12 | 0.29 | 0.29 |
| CaO | 3.22 | 56.08 | 0.06 | 0.06 | 0.13 | 0.13 |
| FeO | 11.45 | 71.85 | 0.16 | 0.16 | 0.37 | 0.37 |
| K2O | 2.77 | 94.20 | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.14 |
| Na2O | 3.91 | 61.98 | 0.06 | 0.06 | 0.15 | 0.29 |
| Cl | 2.30 | 35.45 | 0.06 | 0.06 | 0.15 | 0.15 |
| | | | | 2.60 | | 3.92 |
| | 6 | oxígenos | | | | |
| | | 2.31 | | | | |

1. spot (4)



Disabled elements: C

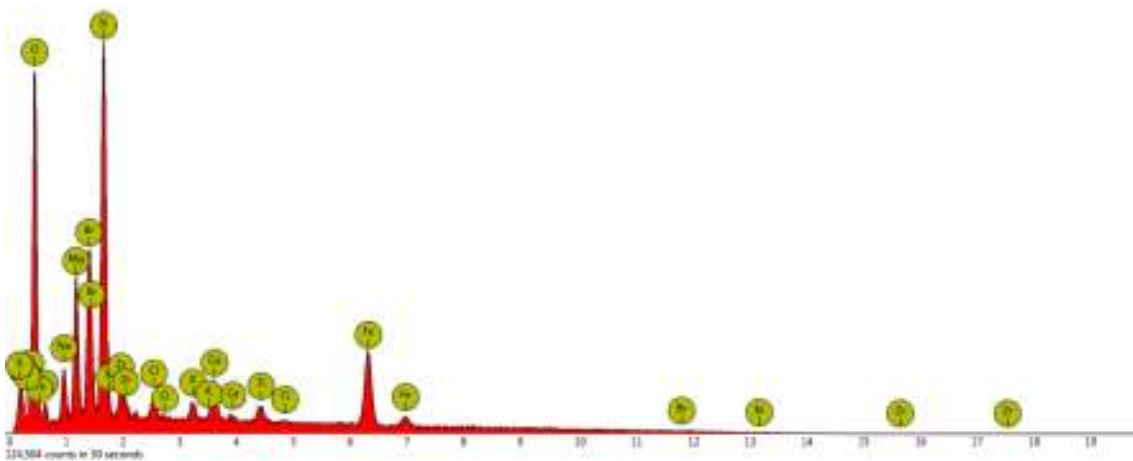
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 12.9 | 0.1 |
| 8 | O | Oxygen | 42.2 | 0.1 |
| 40 | Zr | Zirconium | 21.3 | 0.0 |
| 35 | Br | Bromine | 8.6 | 0.1 |
| 26 | Fe | Iron | 5.4 | 0.8 |
| 11 | Na | Sodium | 2.2 | 0.4 |
| 17 | Cl | Chlorine | 1.3 | 2.1 |
| 51 | Sb | Antimony | 3.7 | 3.8 |
| 65 | Tb | Terbium | 2.5 | 0.9 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 12.90 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 27.60 | SiO2 | 34.91 |
| Zr | 21.30 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 28.77 | ZrO2 | 36.39 |
| Fe | 5.40 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 6.95 | FeO | 8.79 |
| Tb | 2.50 | 365.85 | 158.92 | 2.00 | 2.88 | Tb2O3 | 3.64 |
| Na | 2.20 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 2.97 | Na2O | 3.75 |
| Cl | 1.30 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 1.30 | Cl | 1.64 |
| Br | 8.60 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 8.60 | Br | 10.88 |
| total | 54.20 | | | total | 79.06 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|----------|--------|------|------|------|------|
| SiO2 | 34.91 | 60.08 | 0.58 | 1.16 | 2.16 | 1.08 |
| ZrO2 | 36.39 | 123.22 | 0.30 | 0.59 | 1.10 | 0.55 |
| FeO | 8.79 | 71.85 | 0.12 | 0.12 | 0.23 | 0.23 |
| Tb2O3 | 3.64 | 365.85 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.04 |
| Na2O | 3.75 | 61.98 | 0.06 | 0.06 | 0.11 | 0.23 |
| Cl | 1.64 | 35.45 | 0.05 | 0.05 | 0.09 | 0.09 |
| Br | 10.88 | 79.90 | 0.14 | 0.14 | 0.25 | 0.25 |
| | | | | 2.15 | | 2.46 |
| 4 | oxígenos | | | | | |
| | | 1.86 | | | | |

2. spot (5)



Disabled elements: C

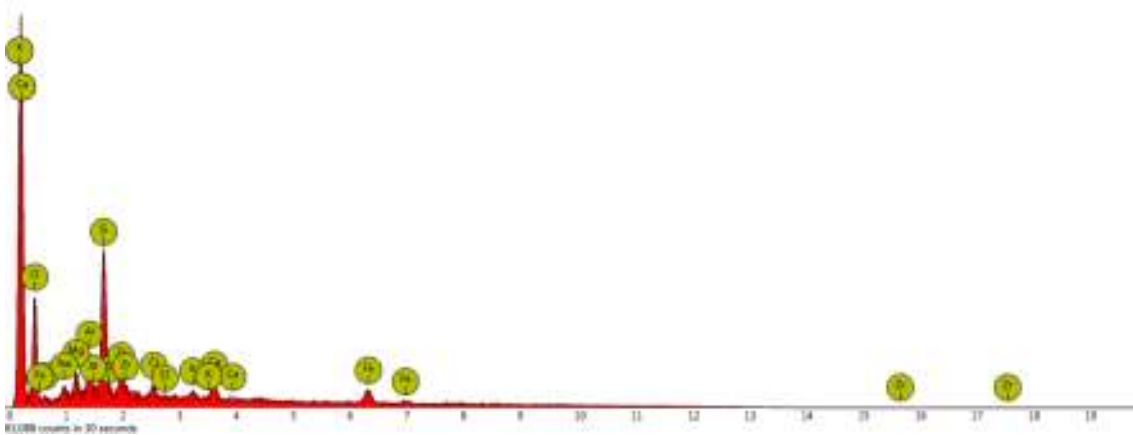
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| Element Number | Element Symbol | Element Name | Weight | Concentration | Error |
|----------------|----------------|--------------|--------|---------------|-------|
| 14 | Si | Silicon | 15.2 | | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 35.0 | | 0.1 |
| 35 | Br | Bromine | 16.3 | | 0.0 |
| 12 | Mg | Magnesium | 5.6 | | 0.0 |
| 26 | Fe | Iron | 14.1 | | 0.1 |
| 11 | Na | Sodium | 2.9 | | 0.1 |
| 20 | Ca | Calcium | 2.2 | | 0.2 |
| 40 | Zr | Zirconium | 4.8 | | 0.0 |
| 17 | Cl | Chlorine | 1.4 | | 0.6 |
| 22 | Ti | Titanium | 1.4 | | 0.8 |
| 19 | K | Potassium | 0.9 | | 0.1 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 15.20 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 32.52 | SiO2 | 33.68 |
| Br | 16.30 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 16.30 | Br | 16.88 |
| Mg | 5.60 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 9.29 | MgO | 9.62 |
| Fe | 14.10 | 159.69 | 55.85 | 2.00 | 20.16 | Fe2O3 | 20.88 |
| Na | 2.90 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 3.91 | Na2O | 4.05 |
| Ca | 2.20 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 3.08 | CaO | 3.19 |
| Zr | 4.80 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 6.48 | ZrO2 | 6.72 |
| Cl | 1.40 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 1.40 | Cl | 1.45 |
| Ti | 1.40 | 79.87 | 47.87 | 1.00 | 2.34 | TiO2 | 2.42 |
| K | 0.90 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 1.08 | K2O | 1.12 |
| total | 64.80 | | | total | 96.55 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------|-------|--------|------|------|------|-------|
| SiO2 | 33.68 | 60.08 | 0.56 | 1.12 | 7.77 | 3.89 |
| Br | 16.88 | 79.90 | 0.21 | 0.21 | 1.46 | 1.46 |
| MgO | 9.62 | 40.30 | 0.24 | 0.24 | 1.65 | 1.65 |
| Fe2O3 | 20.88 | 159.69 | 0.13 | 0.39 | 2.72 | 1.81 |
| Na2O | 4.05 | 61.98 | 0.07 | 0.07 | 0.45 | 0.91 |
| CaO | 3.19 | 56.08 | 0.06 | 0.06 | 0.39 | 0.39 |
| ZrO2 | 6.72 | 123.22 | 0.05 | 0.11 | 0.76 | 0.38 |
| Cl | 1.45 | 35.45 | 0.04 | 0.04 | 0.28 | 0.28 |
| TiO2 | 2.42 | 79.87 | 0.03 | 0.06 | 0.42 | 0.21 |
| K2O | 1.12 | 94.20 | 0.01 | 0.01 | 0.08 | 0.17 |
| | | | | 2.31 | | 11.16 |
| 16 oxígenos | | | | | | 6.93 |

3. spot (6)



Disabled elements: C

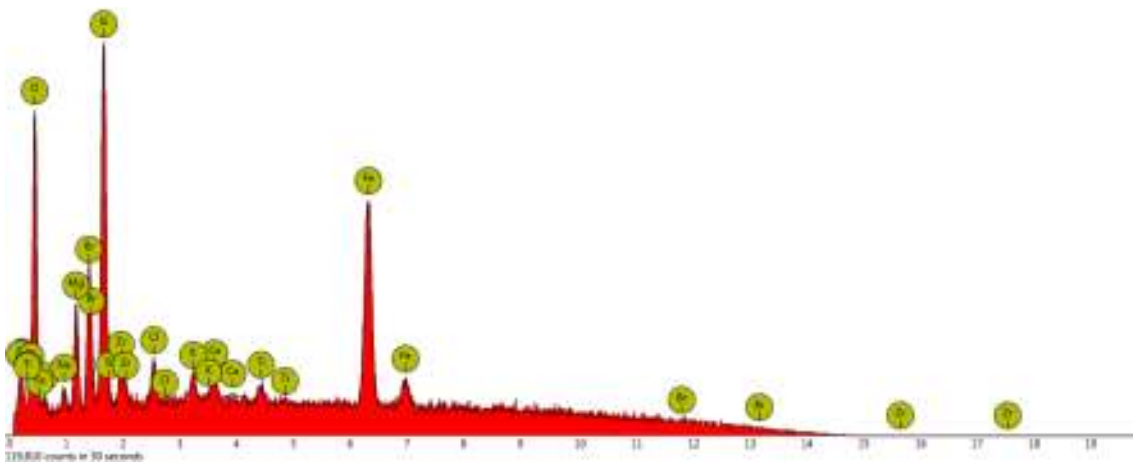
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 17.7 | 0.1 |
| 8 | O | Oxygen | 41.1 | 0.1 |
| 13 | Al | Aluminium | 6.5 | 0.3 |
| 40 | Zr | Zirconium | 10.9 | 0.0 |
| 12 | Mg | Magnesium | 4.0 | 0.4 |
| 26 | Fe | Iron | 9.6 | 0.3 |
| 20 | Ca | Calcium | 3.2 | 0.8 |
| 17 | Cl | Chlorine | 2.6 | 1.3 |
| 11 | Na | Sodium | 2.9 | 0.2 |
| 19 | K | Potassium | 1.5 | 0.2 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 17.10 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 36.58 | SiO2 | 38.36 |
| Al | 6.50 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 12.28 | Al2O3 | 12.88 |
| Zr | 10.90 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 14.72 | ZrO2 | 15.44 |
| Mg | 4.00 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 6.63 | MgO | 6.95 |
| Fe | 9.60 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 12.35 | FeO | 12.95 |
| Ca | 3.20 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 4.48 | CaO | 4.70 |
| Cl | 2.60 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 2.60 | Cl | 2.73 |
| Na | 2.90 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 3.91 | Na2O | 4.10 |
| K | 1.50 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 1.81 | K2O | 1.89 |
| total | 58.30 | | | total | 95.36 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------|-------|--------|------|------|-------|-------|
| SiO2 | 38.36 | 60.08 | 0.64 | 1.28 | 12.00 | 6.00 |
| Al2O3 | 12.88 | 101.96 | 0.13 | 0.38 | 3.56 | 2.37 |
| ZrO2 | 15.44 | 123.22 | 0.13 | 0.25 | 2.36 | 1.18 |
| MgO | 6.95 | 40.30 | 0.17 | 0.17 | 1.62 | 1.62 |
| FeO* | 6.15 | 71.85 | 0.09 | 0.09 | 0.80 | 0.80 |
| Fe2O3* | 7.56 | 159.69 | 0.05 | 0.14 | 1.34 | 0.89 |
| CaO | 4.70 | 56.08 | 0.08 | 0.08 | 0.79 | 0.79 |
| Cl | 2.73 | 35.45 | 0.08 | 0.08 | 0.72 | 0.72 |
| Na2O | 4.10 | 61.98 | 0.07 | 0.07 | 0.62 | 1.24 |
| K2O | 1.89 | 94.20 | 0.02 | 0.02 | 0.19 | 0.38 |
| | | | | 2.55 | | 16.00 |
| 24 oxígenos | | | | | | 9.40 |

4. spot (7)



Disabled elements: Ag, C

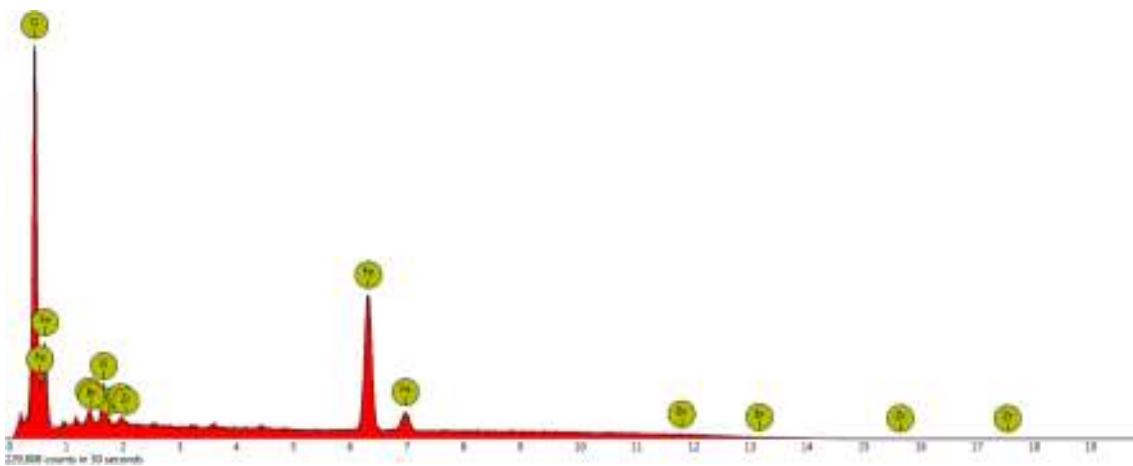
| Element Number | Element Symbol | Element Name | Weight | Concentration | Error |
|----------------|----------------|--------------|--------|---------------|-------|
| 14 | Si | Silicon | 12.8 | | 0.0 |
| 26 | Fe | Iron | 34.0 | | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 24.1 | | 0.1 |
| 35 | Br | Bromine | 12.7 | | 0.0 |
| 12 | Mg | Magnesium | 4.3 | | 0.1 |
| 17 | Cl | Chlorine | 1.9 | | 0.6 |
| 40 | Zr | Zirconium | 5.2 | | 0.0 |
| 20 | Ca | Calcium | 1.2 | | 0.8 |
| 19 | K | Potassium | 1.1 | | 0.3 |
| 22 | Ti | Titanium | 1.3 | | 0.9 |
| 11 | Na | Sodium | 1.5 | | 0.5 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 12.80 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 27.38 | SiO2 | 32.14 |
| Fe | 34.00 | 71.84 | 55.85 | 2.00 | 21.87 | FeO | 25.67 |
| Br | 12.70 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 12.70 | Br | 14.91 |
| Mg | 4.30 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 7.13 | MgO | 8.37 |
| Cl | 1.90 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 1.90 | Cl | 2.23 |
| Zr | 5.20 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 7.02 | ZrO2 | 8.24 |
| Ca | 1.20 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 1.68 | CaO | 1.97 |
| K | 1.10 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 1.33 | K2O | 1.56 |
| Ti | 1.30 | 79.87 | 47.87 | 1.00 | 2.17 | TiO2 | 2.55 |
| Na | 1.50 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 2.02 | Na2O | 2.37 |
| total | 76.00 | | | total | 85.20 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|-------|--------|------|------|------|-------|
| SiO2 | 32.14 | 60.08 | 0.53 | 1.07 | 6.67 | 3.34 |
| FeO | 25.67 | 71.84 | 0.36 | 1.07 | 6.68 | 4.46 |
| Br | 14.91 | 79.90 | 0.19 | 0.19 | 1.16 | 1.16 |
| MgO | 8.37 | 40.30 | 0.21 | 0.21 | 1.29 | 1.29 |
| Cl | 2.23 | 35.45 | 0.06 | 0.06 | 0.39 | 0.39 |
| ZrO2 | 8.24 | 123.22 | 0.07 | 0.13 | 0.83 | 0.42 |
| CaO | 1.97 | 56.08 | 0.04 | 0.04 | 0.22 | 0.22 |
| K2O | 1.56 | 94.20 | 0.02 | 0.02 | 0.10 | 0.21 |
| TiO2 | 2.55 | 79.87 | 0.03 | 0.06 | 0.40 | 0.20 |
| Na2O | 2.37 | 61.98 | 0.04 | 0.04 | 0.24 | 0.48 |
| | | | | 2.89 | | 12.16 |

18 oxígenos
6.24

5. spot (8)



Disabled elements: C

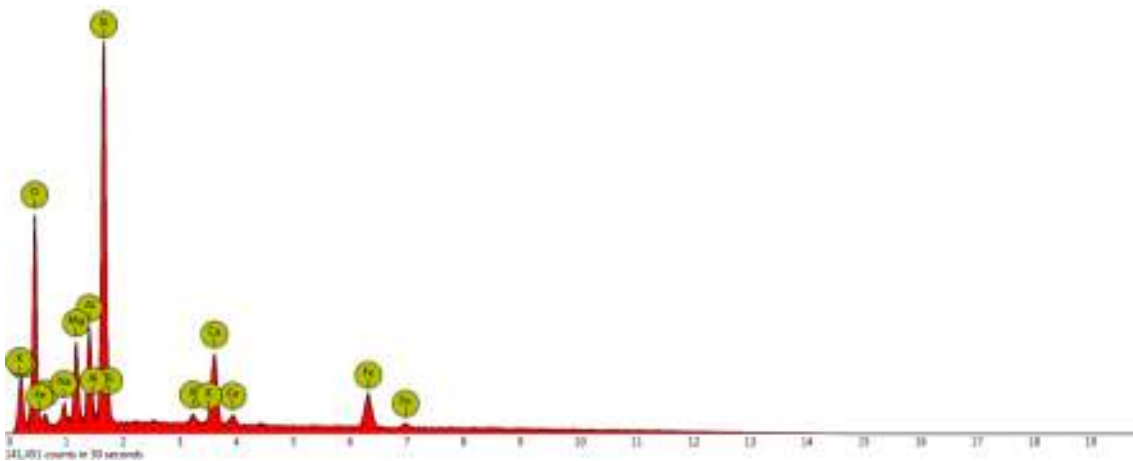
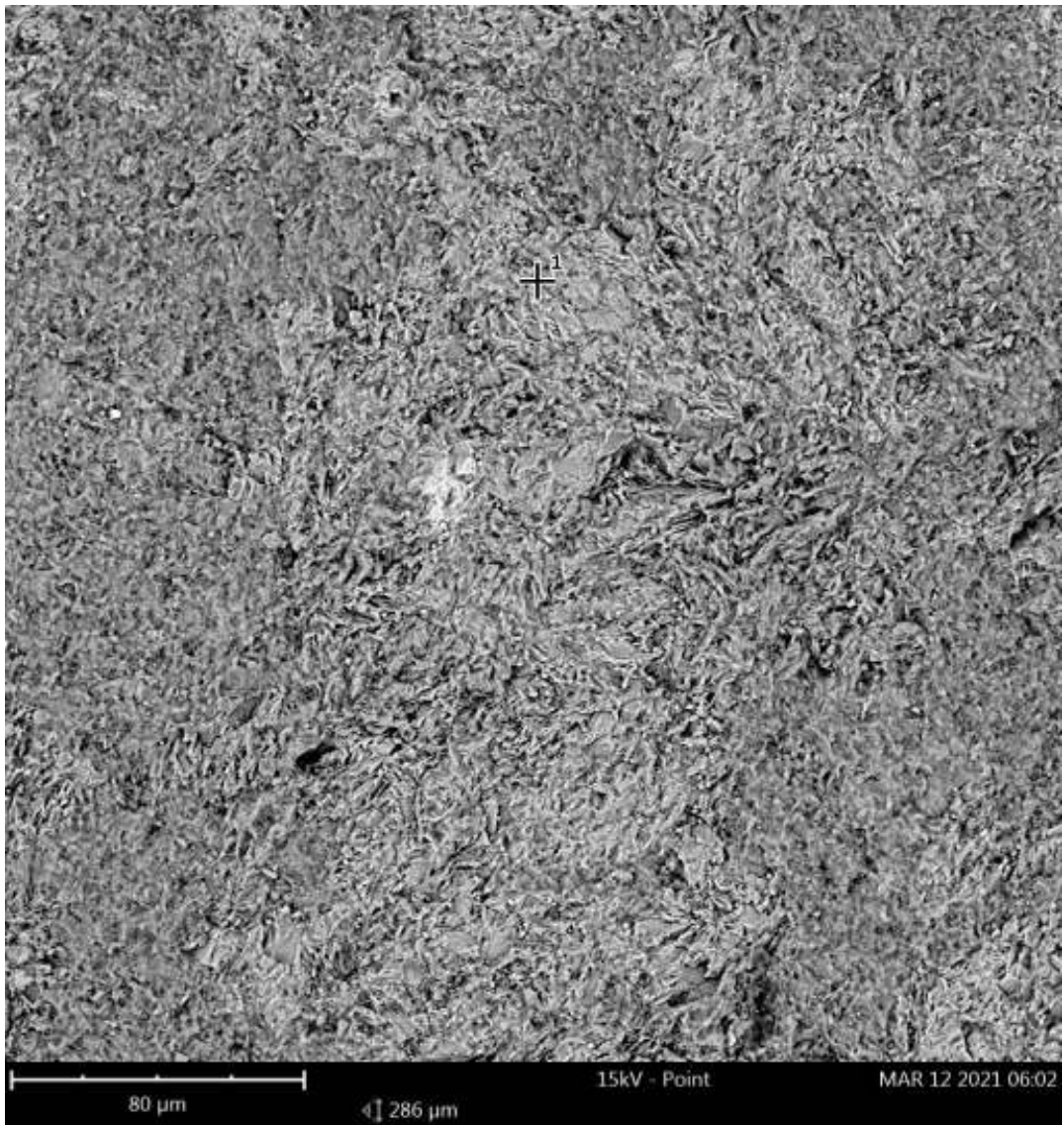
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 8 | O | Oxygen | 38.2 | 0.0 |
| 26 | Fe | Iron | 53.7 | 0.0 |
| 14 | Si | Silicon | 3.0 | 0.1 |
| 35 | Br | Bromine | 3.1 | 0.1 |
| 40 | Zr | Zirconium | 2.0 | 0.0 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Fe | 53.70 | 159.69 | 55.85 | 1.00 | 153.55 | Fe2O3 | 92.63 |
| Si | 3.00 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 6.42 | SiO2 | 3.87 |
| Br | 3.10 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 3.10 | Br | 1.87 |
| Zr | 2.00 | 123.22 | 91.23 | 1.00 | 2.70 | ZrO2 | 1.63 |
| total | 61.80 | | | total | 165.77 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|----------|------|------|------|------|
| Fe2O3 | 92.63 | 159.69 | 0.58 | 1.16 | 2.76 | 1.38 |
| SiO2 | 3.87 | 60.08 | 0.06 | 0.06 | 0.15 | 0.15 |
| Br | 1.87 | 79.90 | 0.02 | 0.02 | 0.06 | 0.06 |
| ZrO2 | 1.63 | 123.22 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.03 |
| | | | | 1.26 | | 1.62 |
| | 3 | oxígenos | | | | |
| | | 2.38 | | | | |

P-15(5) 1. spot (1)



Disabled elements: Br, C, Ti

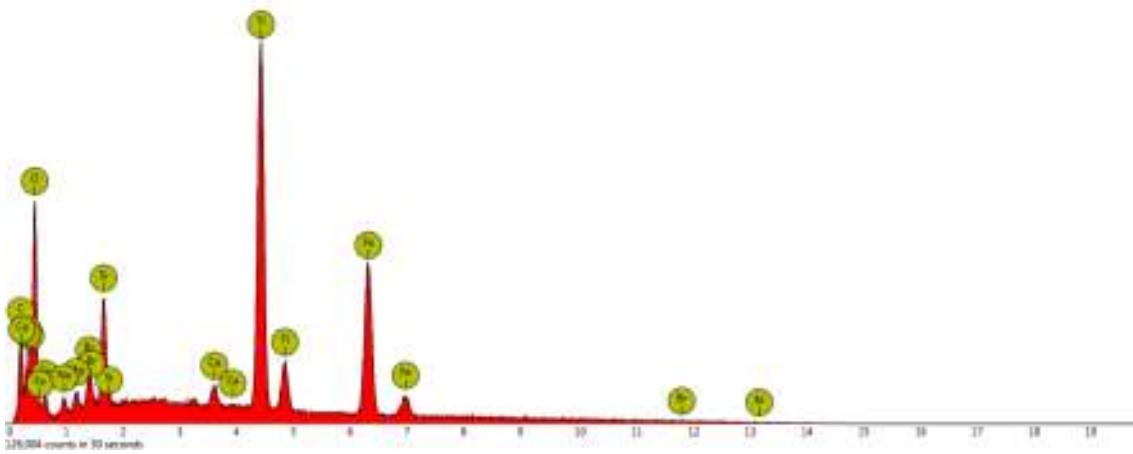
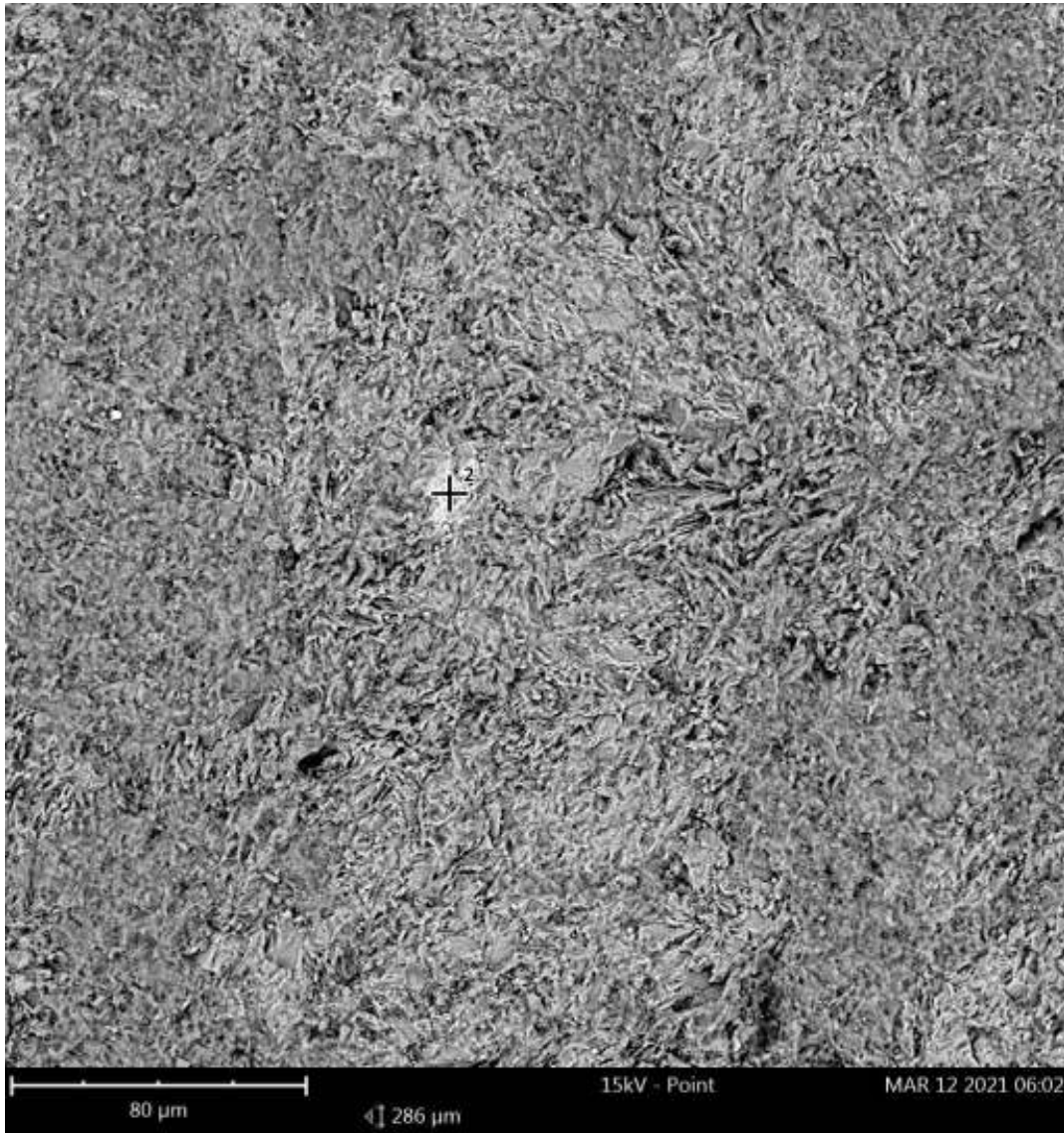
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| Element Number | Element Symbol | Element Name | Weight | Concentration | Error |
|----------------|----------------|--------------|--------|---------------|-------|
| 14 | Si | Silicon | 24.1 | | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 39.5 | | 0.1 |
| 13 | Al | Aluminium | 7.2 | | 0.0 |
| 20 | Ca | Calcium | 7.7 | | 0.1 |
| 12 | Mg | Magnesium | 6.2 | | 0.0 |
| 26 | Fe | Iron | 12.4 | | 0.1 |
| 11 | Na | Sodium | 2.0 | | 0.2 |
| 19 | K | Potassium | 0.9 | | 0.0 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 24.10 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 51.55 | SiO2 | 48.66 |
| Al | 7.20 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 13.60 | Al2O3 | 12.84 |
| Ca | 7.70 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 10.77 | CaO | 10.17 |
| Mg | 6.20 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 10.28 | MgO | 9.70 |
| Fe | 12.40 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 15.95 | FeO | 15.06 |
| Na | 2.00 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 2.70 | Na2O | 2.54 |
| K | 0.90 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 1.08 | K2O | 1.02 |
| total | 60.50 | | | total | 105.95 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|-------|----------|------|------|------|------|
| SiO2 | 48.66 | 60.08 | 0.81 | 1.62 | 3.62 | 1.81 |
| Al2O3 | 12.84 | 101.96 | 0.13 | 0.38 | 0.85 | 0.56 |
| CaO | 10.17 | 56.08 | 0.18 | 0.18 | 0.41 | 0.41 |
| MgO | 9.70 | 40.30 | 0.24 | 0.24 | 0.54 | 0.54 |
| FeO* | 12.94 | 71.85 | 0.18 | 0.18 | 0.40 | 0.40 |
| Fe2O3* | 2.35 | 159.69 | 0.01 | 0.04 | 0.39 | 0.26 |
| Na2O | 2.54 | 61.98 | 0.04 | 0.04 | 0.09 | 0.18 |
| K2O | 1.02 | 94.20 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.05 |
| | | | | 2.70 | | 4.22 |
| | 6 | oxígenos | | | | |
| | | 2.23 | | | | |

2. spot (2)



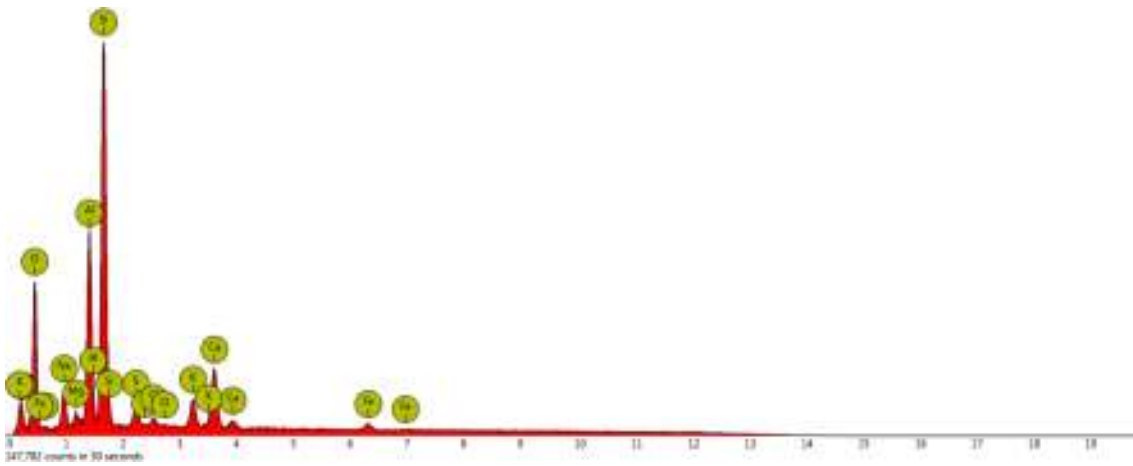
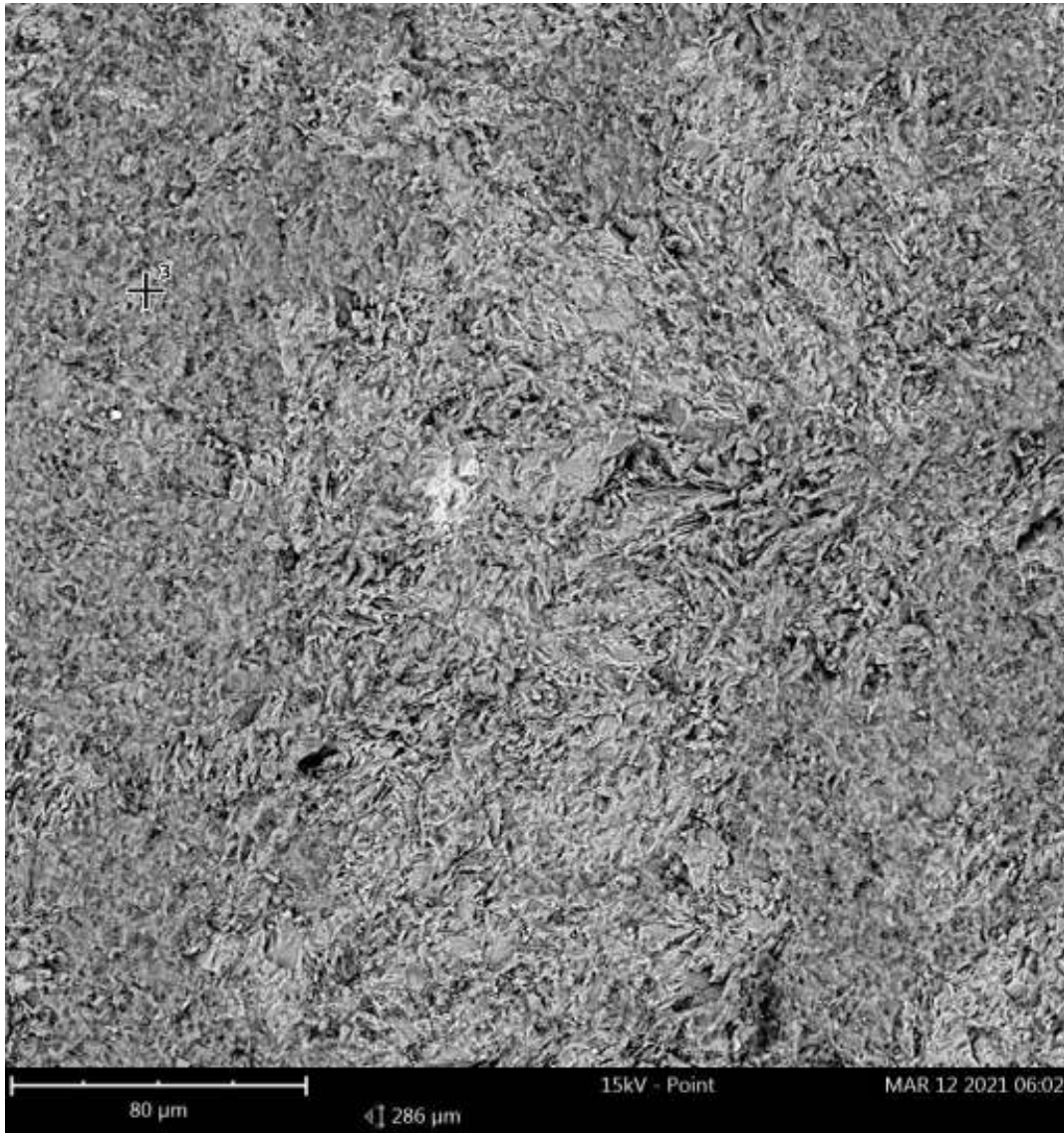
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 22 | Ti | Titanium | 24.3 | 0.0 |
| 26 | Fe | Iron | 23.9 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 28.5 | 0.1 |
| 14 | Si | Silicon | 3.0 | 0.1 |
| 6 | C | Carbon | 14.9 | 0.4 |
| 35 | Br | Bromine | 3.1 | 0.0 |
| 20 | Ca | Calcium | 0.8 | 0.3 |
| 12 | Mg | Magnesium | 0.7 | 0.3 |
| 11 | Na | Sodium | 0.9 | 0.3 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Ti | 28.52 | 79.87 | 47.86 | 1.00 | 47.60 | TiO2 | 48.10 |
| Fe | 28.05 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 36.09 | FeO | 36.47 |
| Si | 3.52 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 7.53 | SiO2 | 7.61 |
| Br | 3.64 | 79.90 | 79.90 | 1.00 | 3.64 | Br | 3.68 |
| Ca | 0.94 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 1.31 | CaO | 1.33 |
| Mg | 0.82 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 1.36 | MgO | 1.38 |
| Na | 1.06 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 1.42 | Na2O | 1.44 |
| total | 66.55 | | | total | 98.96 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|-------|----------|------|------|------|------|
| TiO2 | 48.10 | 79.87 | 0.60 | 1.20 | 1.73 | 0.86 |
| FeO | 36.47 | 71.85 | 0.51 | 0.51 | 0.73 | 0.73 |
| SiO2 | 7.61 | 60.08 | 0.13 | 0.25 | 0.36 | 0.18 |
| Br | 3.68 | 79.90 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.07 |
| CaO | 1.33 | 56.08 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 |
| MgO | 1.38 | 40.30 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.05 |
| Na2O | 1.44 | 61.98 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.07 |
| | | | | 2.09 | | 1.99 |
| | 3 | oxígenos | | | | |
| | | 1.43 | | | | |

3. spot (3)



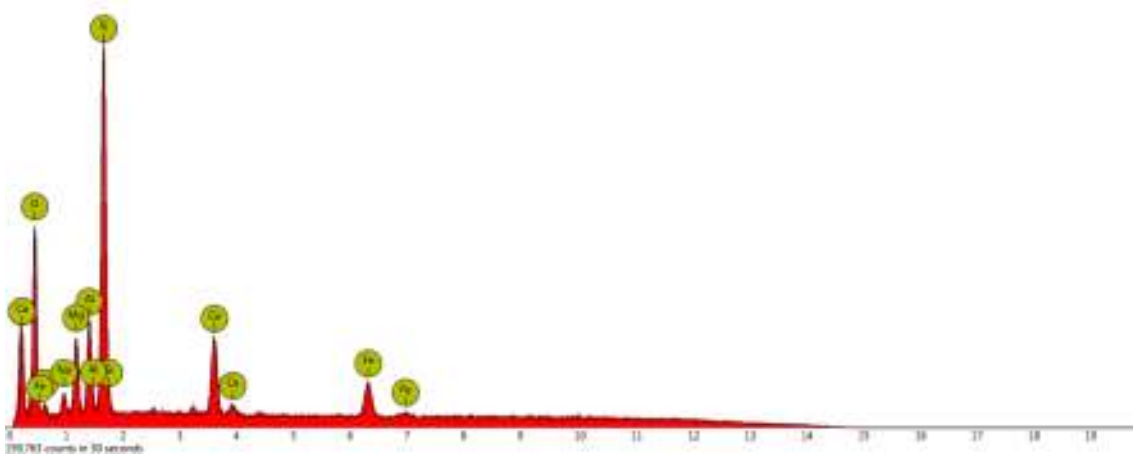
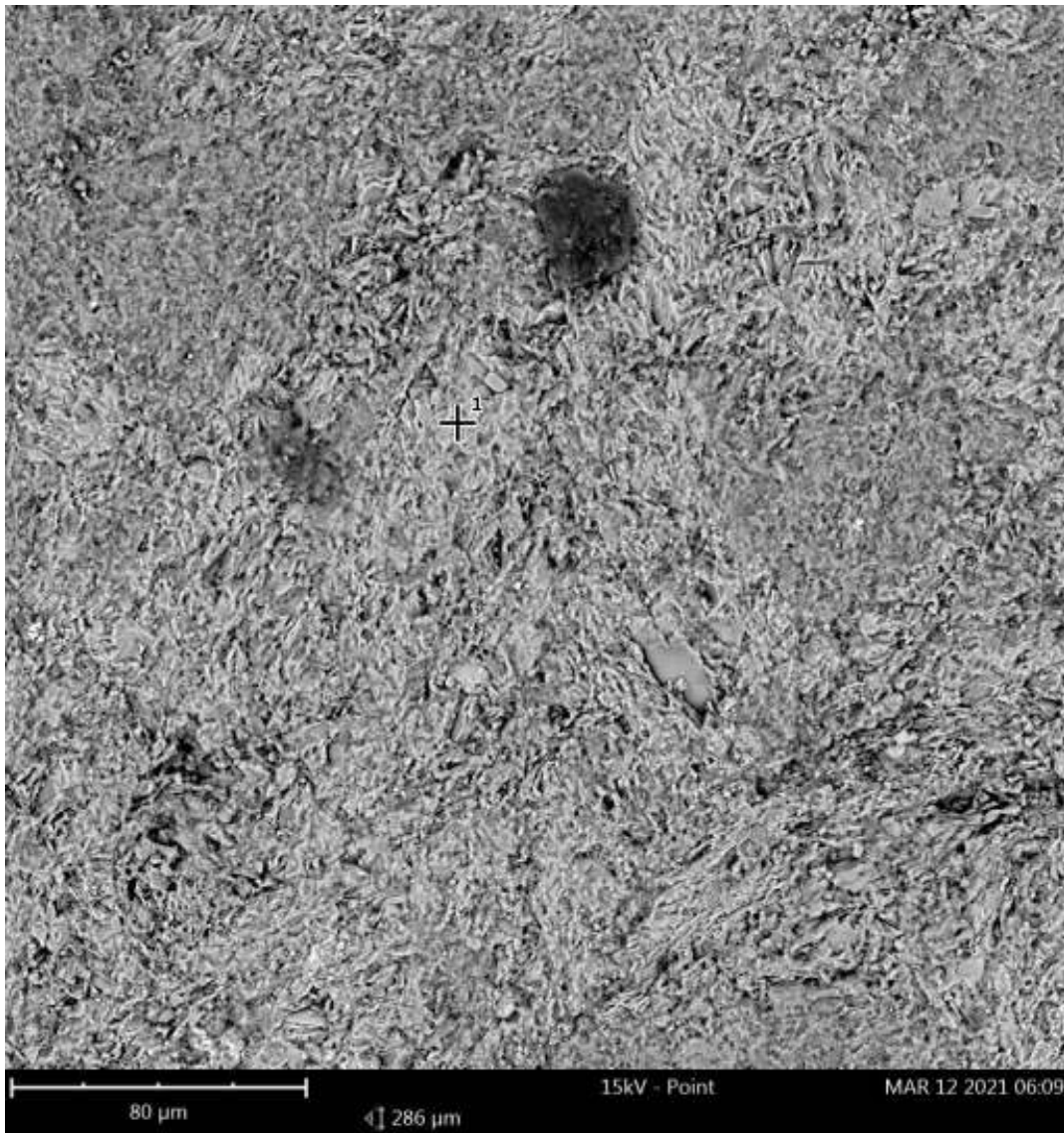
Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 26.7 | 0.0 |
| 13 | Al | Aluminium | 13.9 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 38.2 | 0.1 |
| 20 | Ca | Calcium | 7.5 | 0.1 |
| 11 | Na | Sodium | 3.9 | 0.0 |
| 19 | K | Potassium | 3.2 | 0.0 |
| 16 | S | Sulfur | 2.2 | 0.2 |
| 12 | Mg | Magnesium | 1.0 | 0.5 |
| 26 | Fe | Iron | 2.6 | 0.5 |
| 17 | Cl | Chlorine | 0.8 | 0.5 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 26.70 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 57.12 | SiO2 | 51.46 |
| Al | 13.90 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 26.26 | Al2O3 | 23.66 |
| Ca | 7.50 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 10.49 | CaO | 9.46 |
| Na | 3.90 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 5.26 | Na2O | 4.74 |
| K | 3.20 | 94.20 | 39.10 | 2.00 | 3.85 | K2O | 3.47 |
| S | 2.20 | 32.00 | 32.00 | 1.00 | 2.20 | S | 1.98 |
| Mg | 1.00 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 1.66 | MgO | 1.49 |
| Fe | 2.60 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 3.35 | FeO | 3.01 |
| Cl | 0.80 | 35.45 | 35.45 | 1.00 | 0.80 | Cl | 0.72 |
| total | 61.80 | | | total | 110.99 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------|-------|--------|------|------|------|------|
| SiO2 | 51.46 | 60.08 | 0.86 | 1.71 | 6.61 | 3.30 |
| Al2O3 | 23.66 | 101.96 | 0.23 | 0.70 | 2.68 | 1.79 |
| CaO | 9.46 | 56.08 | 0.17 | 0.17 | 0.65 | 0.65 |
| Na2O | 4.74 | 61.98 | 0.08 | 0.08 | 0.29 | 0.59 |
| K2O | 3.47 | 94.20 | 0.04 | 0.04 | 0.14 | 0.28 |
| S | 1.98 | 32.00 | 0.06 | 0.06 | 0.24 | 0.24 |
| MgO | 1.49 | 40.30 | 0.04 | 0.04 | 0.14 | 0.14 |
| FeO | 3.01 | 71.85 | 0.04 | 0.04 | 0.16 | 0.16 |
| Cl | 0.72 | 35.45 | 0.02 | 0.02 | 0.08 | 0.08 |
| | | | | 2.85 | | 7.24 |
| 11 oxígenos | | | | | | 3.86 |

1. spot (4)



Disabled elements: Br, C

Element Number Element Symbol Element Name Weight Concentration Error

| | | | | |
|----|----|-----------|------|-----|
| 14 | Si | Silicon | 24.3 | 0.0 |
| 8 | O | Oxygen | 37.6 | 0.1 |
| 20 | Ca | Calcium | 8.7 | 0.1 |
| 13 | Al | Aluminium | 7.3 | 0.0 |
| 12 | Mg | Magnesium | 6.3 | 0.1 |
| 26 | Fe | Iron | 13.4 | 0.2 |
| 11 | Na | Sodium | 2.4 | 0.2 |

| elemento | valor SEM | Peso molecular | peso catión | cationes en óxido | valor óxido | óxido | ajuste |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| Si | 24.30 | 60.08 | 28.09 | 1.00 | 51.98 | SiO2 | 47.75 |
| Ca | 8.70 | 56.08 | 40.08 | 1.00 | 12.17 | CaO | 11.18 |
| Al | 7.30 | 101.96 | 26.98 | 2.00 | 13.79 | Al2O3 | 12.67 |
| Mg | 6.30 | 40.30 | 24.31 | 1.00 | 10.45 | MgO | 9.59 |
| Fe | 13.40 | 71.85 | 55.85 | 1.00 | 17.24 | FeO | 15.84 |
| Na | 2.40 | 61.98 | 22.99 | 2.00 | 3.24 | Na2O | 2.97 |
| total | 62.40 | | | total | 108.87 | | 100.00 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|-------|----------|------|------|------|------|
| SiO2 | 47.75 | 60.08 | 0.79 | 1.59 | 3.54 | 1.77 |
| CaO | 11.18 | 56.08 | 0.20 | 0.20 | 0.44 | 0.44 |
| Al2O3 | 12.67 | 101.96 | 0.12 | 0.37 | 0.83 | 0.55 |
| MgO | 9.59 | 40.30 | 0.24 | 0.24 | 0.53 | 0.53 |
| FeO* | 11.89 | 71.85 | 0.17 | 0.17 | 0.37 | 0.37 |
| Fe2O3* | 4.39 | 159.69 | 0.03 | 0.08 | 0.18 | 0.12 |
| Na2O | 2.97 | 61.98 | 0.05 | 0.05 | 0.11 | 0.21 |
| | | | | 2.70 | | 4.00 |
| | 6 | oxígenos | | | | |
| | | 2.23 | | | | |