



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL

Curso 2024-2025

Evaluación de la microscopía electrónica de barrido (SEM) como herramienta de monitoreo petrológico: aplicación en vidrio volcánico de la erupción de Cumbre Vieja 2021 (La Palma, Islas Canarias)

Evaluation of scanning electron microscopy (SEM) as a petrological monitoring tool: application to volcanic glass from the Cumbre Vieja 2021 eruption (La Palma, Canary Islands)

KATHERIN ANDREA VEGA VASQUEZ

TUTOR/ES DEL TRABAJO: ÁLVARO MÁRQUEZ GONZÁLEZ

DIEGO GONZÁLEZ GARCÍA



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL
Curso 2024-2025

Evaluación de la microscopía electrónica de barrido (SEM) como herramienta de monitoreo petrológico: aplicación en vidrio volcánico de la erupción de Cumbre Vieja 2021 (La Palma, Islas Canarias)

Evaluation of scanning electron microscopy (SEM) as a petrological monitoring tool: application in volcanic glass from the Cumbre Vieja 2021 eruption (La Palma, Canary Islands)

KATHERIN ANDREA VEGA VASQUEZ

TUTOR/ES DEL TRABAJO:

ÁLVARO MÁRQUEZ GONZÁLEZ

Firmado por MARQUEZ GONZALEZ
ÁLVARO - DNI ***2993** el día
Fdo.: 28/07/2025 con un certificado
emitido por AC Sector Público

DIEGO GONZÁLEZ GARCÍA

Firmado por GONZALEZ
GARCIA DIEGO - ***5123**
Fdo.: el día 28/07/2025 con un
certificado emitido por
AC FNMT Usuarios



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

KATHERIN ANDREA VEGA VASQUEZ

con NIE Z1238692D, estudiante de Máster en Geología Ambiental en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2024 -2025, como autora del trabajo de fin de máster titulado “Evaluación de la microscopía electrónica de barrido (SEM) como herramienta de monitoreo petrológico: aplicación en vidrio volcánico de la erupción de Cumbre Vieja 2021 (La Palma, Islas Canarias)” y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyos tutores son: Álvaro Márquez González, y Diego González García.

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 28 de julio de 2025

Fdo.:

DEDICATORIA

A mis padres, mis hermanos y mis amigos, Oscar y Mafe:

Por sostenerme cuando más lo necesité y no soltarme jamás. Este camino ha estado lleno de desafíos, muchos más de los que se ven, y sin ustedes no lo habría logrado. Gracias por ser compañía, hogar, amor, apoyo y fuerza. Por celebrar conmigo cada paso, desde los más pequeños hasta los más importantes. Este logro es tan mío como de ustedes y es apenas el comienzo de todo lo que soñamos.

A mis tutores, Álvaro y Diego:

Por su generosidad, dedicación y apoyo a lo largo de todo el proceso. Su guía y acompañamiento fueron clave para avanzar y llegar hasta aquí. Gracias por la confianza, la motivación y el esfuerzo que pusieron para desarrollar con éxito este proyecto de máster.

INDICE

| | |
|--|----|
| RESUMEN | IV |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. OBJETIVOS..... | 4 |
| 2.1. Objetivo general..... | 4 |
| 2.2. Objetivos específicos | 4 |
| 3. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES..... | 5 |
| 3.1. Monitorización petrológica de erupciones volcánicas | 5 |
| 3.2. Microscopia electrónica de barrido (SEM) | 7 |
| 3.2.1. Modelos de corrección: P/B-ZAF y Phi (Rho, Z)..... | 10 |
| 4. METODOLOGÍA | 12 |
| 4.1. Obtención y preparación de las muestras | 12 |
| 4.2. Determinación de la composición elemental del vidrio volcánico mediante SEM.... | 13 |
| 4.2.1. Parámetros analíticos y condiciones de medida..... | 13 |
| 4.2.2. Análisis, interpretación y cuantificación de espectros EDS..... | 14 |
| 5. RESULTADOS..... | 17 |
| 5.1. Evaluación de parámetros analíticos mediante vidrio experimental de referencia .. | 17 |
| 5.2. Aplicación del método de cuantificación por SEM en muestras de vidrio volcánico de la erupción de Tajogaite (2021) | 21 |
| 5.2.1. Análisis de resultados de las restingolitas (Xenopómez blanca y gris) | 28 |
| 5.2.2. Evolución temporal de la composición del vidrio volcánico en la erupción de Tajogaite (2021): Comparación entre datos obtenidos por SEM y EPMA..... | 30 |
| 5.2.3. Ratios comúnmente utilizados en monitorización petrológica..... | 32 |
| 6. DISCUSIÓN | 34 |
| 6.1. Protocolo operativo para el análisis composicional de vidrio volcánico | 36 |
| 6.1.1. Recolección, transporte y preparación de las muestras | 36 |
| 6.1.2. Análisis por microscopia electrónica de barrido (SEM)..... | 37 |
| 6.1.3. Evaluación de resultados y tratamiento de datos | 38 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 39 |
| 8. BIBLIOGRAFIA | 40 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Resultados del análisis de la composición química de los vidrios de referencia por SEM, aplicando el modelo P/B-ZAF.. | 17 |
| Tabla 2. Resultados del análisis de la composición química de los vidrios de referencia por SEM, aplicando el modelo Phi (Rho, Z). | 18 |
| Tabla 3. Composición química obtenida por SEM para las muestras piroclásticas y xenopómez, aplicando los métodos P/B-ZAF y Phi (Rho, Z). | 23 |
| Tabla 4. Composición química de referencia por EPMA para las muestras piroclásticas y xenopómez de la erupción de La Palma (2021). | 24 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Mapa geológico de La Palma | 1 |
| Figura 2. Esquema general de las señales generadas por la interacción de un haz de electrones con la muestra en un microscopio electrónico de barrido. | 9 |
| Figura 3. Muestras preparadas para análisis por SEM en lámina y probeta | 13 |
| Figura 4. Microscopio electrónico de barrido TESCAN Vega 4 utilizado para este estudio | 14 |
| Figura 5. Espectro EDS obtenido con el software ESPRIT Spectrum de Bruker en una muestra de vidrio volcánico. | 15 |
| Figura 6. Desviación porcentual de la composición química obtenida por SEM respecto a los valores EPMA para los vidrios experimentales de referencia | 20 |
| Figura 7. Imágenes de electrones retro dispersados (BSE) de la muestra CV21P-B1 mostrando (a) su textura y componentes, y (b) disposición de las áreas de análisis por EPMA (haz de 10 μm) y SEM (área de 5x5 μm) en la muestra. | 22 |
| Figura 8. Correlación entre los resultados obtenidos por SEM y los valores de referencia EPMA para el total de óxidos analizados en las muestras basaníticas | 26 |
| Figura 9. Clasificación geoquímica de piroclastos de La Palma mediante diagrama TAS. | 28 |
| Figura 10. Micrografías de electrones retrodispersados (BSE) de (a) Xenopómez blanca (118677) y (b) xenopómez gris (TQ41-G) obtenidas por EPMA | 29 |
| Figura 11. Correlación entre los resultados obtenidos por SEM y los valores de referencia EPMA para el SiO_2 , Al_2O_3 , CaO y Na_2O analizados en las restingolitas | 29 |
| Figura 12. Evolución temporal de la composición del vidrio volcánico en la erupción de Tajogaite (2021) | 31 |
| Figura 13. Evolución de los ratios $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$: Comparación entre SEM y EPMA | 33 |

RESUMEN

La evolución y variabilidad composicional de los magmas canarios, desde basanitas hasta fonolitas, suponen una complejidad que no siempre se manifiesta en señales geofísicas o geoquímicas superficiales. Ante esta limitación, la caracterización petrológica de los productos volcánicos se convierte en una herramienta clave para reconstruir y entender los procesos internos del sistema magmático antes, durante y después de una erupción. En este contexto, disponer de metodologías analíticas accesibles, rápidas y confiables resulta esencial para mejorar la capacidad de respuesta frente a futuras erupciones volcánicas.

En respuesta a esta necesidad, el presente trabajo evalúa la aplicabilidad de la microscopía electrónica de barrido (SEM) como herramienta alternativa y complementaria a la microsonda electrónica (EPMA) para la caracterización composicional del vidrio volcánico, a partir del análisis de piroclastos emitidos durante la erupción de La Palma (2021). Con este propósito, se utilizaron materiales de referencia y muestras recolectadas en distintas etapas del evento eruptivo, y se evaluaron distintas condiciones de medida en el SEM para establecer una metodología analítica que permita obtener composiciones representativas del vidrio volcánico, optimizando la precisión, exactitud y reproducibilidad de los datos. Asimismo, se compararon los resultados obtenidos con valores previos de EPMA, se analizó la evolución composicional del vidrio con relación a los procesos magmáticos y se diseñó un protocolo de actuación que permita aplicar esta técnica de forma ágil y eficaz ante futuros eventos eruptivos en Canarias.

Los resultados muestran que, entre las condiciones analíticas evaluadas, el ajuste exhaustivo del parámetro de tiempo de adquisición automático presenta un mejor rendimiento, ya que permitió detectar y cuantificar elementos en bajas concentraciones como el Mn, P y Cl, que no se identificaron con las configuraciones rápida y precisa. Este modo requiere un tiempo de adquisición de 10 a 11 minutos por análisis, lo que supone un equilibrio entre precisión y rapidez, fundamental para una respuesta eficaz durante una erupción volcánica. Respecto a los modelos de corrección evaluados, P/B-ZAF mostró ser más adecuado para cuantificar MgO y Na₂O, mientras que Phi (Rho, Z) proporcionó mejores medidas para el SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, FeO, CaO y K₂O. En general, las series temporales obtenidas por SEM reprodujeron adecuadamente las variaciones composicionales registradas con microsonda electrónica. Para SiO₂, Na₂O, K₂O y P₂O₅, las tendencias composicionales a lo largo del evento eruptivo se mantienen, sin embargo, sus valores presentan desviaciones de baja magnitud respecto a los datos de referencia. Ratios de óxidos comúnmente utilizados en monitorización petrológica como K₂O/TiO₂ y CaO/Al₂O₃, también fueron reproducidos con exactitud.

Palabras clave: Monitorización petrológica, vidrio volcánico, piroclastos, microscopía electrónica de barrido, microsonda electrónica, corrección P/B-ZAF y Phi (Rho, Z).

1. INTRODUCCIÓN

Las Islas Canarias constituyen un conjunto de islas volcánicas localizadas sobre una placa oceánica de movimiento lento, en las proximidades del margen continental pasivo de África y a menos de 100 Km de la costa (distancia que separa la isla de Fuerteventura de Cabo Juby). Seis de sus siete islas, que forman una cadena alineada en dirección este-noreste, han estado activas en el último millón de años (Pérez-Torrado y Hasen 2025; Dóniz-Páez et al.,2020).

La Palma, situada en el extremo oeste del archipiélago, es la segunda isla más joven del mismo, con una edad del orden de 2 millones de años (Ma) para el vulcanismo subaéreo más antiguo (Anchochea et al., 1994). Al igual que el resto de las islas oceánicas, comenzó su formación en el fondo marino, desde profundidades cercanas a los 4.000 metros, a través del desarrollo de un edificio submarino denominado Complejo Basal (3-4 Ma, Staudigel et al., 1986). Esta unidad constituye la base geológica de la isla y actualmente solo aflora en el interior de la Caldera de Taburiente, donde los procesos erosivos han permitido su exposición. Sobre ella se superponen dos grandes unidades que representan las principales fases evolutivas de la isla. La primera es el Escudo Norte, compuesto por los edificios volcánicos de Garafía, Taburiente y Bejenado (1,7-0.4 Ma) (Anchochea et al., 1994, Caracedo et al., 2001), y la segunda, la Dorsal o Edificio de Cumbre Vieja, ubicada al sur de la isla y caracterizada por ser la unidad más reciente (< 125 ka) y activa, con ocho erupciones registradas en tiempos históricos y periodos de recurrencia entre 22 y 237 años (ver figura 1) (Romero et al., 2022).

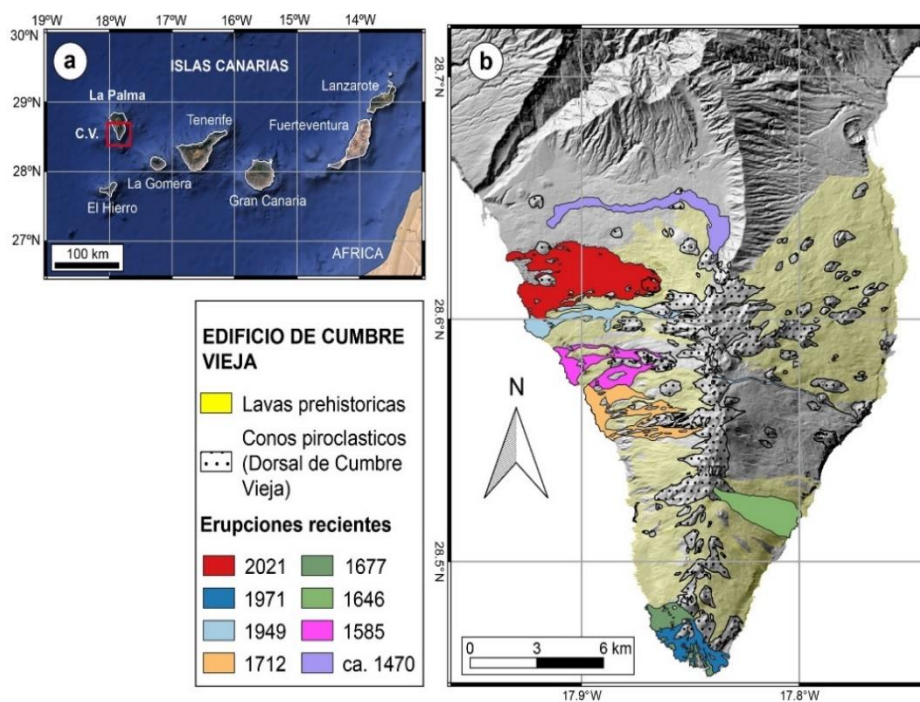


Figura 1. Mapa geológico de La Palma: (a) Situación de La Palma y la dorsal de Cumbre Vieja (C.V.) en el archipiélago. (b) Formaciones volcánicas y actividad eruptiva reciente en Cumbre Vieja

En este contexto, el 19 de septiembre de 2021 comenzó una nueva erupción en la zona de Cabeza de Vaca, en el municipio de El Paso, sobre la vertiente occidental de la dorsal de Cumbre Vieja. Este evento eruptivo conocido como Tajogaite tuvo una duración de 85 días y fue precedido, desde 2017, por una actividad sísmica relativamente profunda (25 a 25 Km), pero de baja magnitud y una semana de enjambres sísmicos y deformación del terreno (Carracedo et al., 2022). Durante el desarrollo de la erupción se abrieron varias bocas que finalmente dieron lugar a la formación de un cono de piroclastos y un extenso campo de coladas de lava; esta estructura alcanzó aproximadamente 200m de altura desde su base, con una altitud total de 1131m sobre el nivel del mar y seis cráteres principales que definen la alineación eruptiva noroeste-sureste (Bonadonna et al., 2022; Carracedo et al., 2022).

En la fase inicial de la erupción, se observó un estilo estromboliano de alta intensidad, caracterizado por cinco días de intensa actividad explosiva antes de que el flanco occidental del edificio comenzara a colapsar. El 27 de septiembre, tras una pausa de aproximadamente 10 horas, la erupción se reactivó con mayor energía, pero con una emisión menor de tefra (González-García et al., 2023; Romero et al., 2022). Durante los meses de octubre y noviembre, se desarrolló la fase con mayor volumen de emisión de lava, constituida por coladas de baja viscosidad procedentes de múltiples focos eruptivos. La última etapa del proceso eruptivo ocurrió el 13 de diciembre cuando la explosividad aumentó nuevamente, manifestándose a través de una fase de tipo vulcaniano, que produjo una columna eruptiva que alcanzó hasta 8 km de altura y que se mantuvo de forma casi continua durante más de una hora.

En términos geoquímicos, las series magmáticas en La Palma se caracterizan por su contenido altamente alcalino, que abarca desde basanitas hasta fonolitas, dominando volumétricamente las basanitas y las tefritas (Carracedo et al., 2001). En el caso de la erupción de Cumbre Vieja, la composición total de roca y el contenido mineralógico de las lavas variaron significativamente durante los 85 días del evento eruptivo. Las coladas emitidas durante los primeros días, hasta la pausa del 27 de septiembre fueron tefritas con alto contenido de fenocristales dominados por clinopiroxeno y anfíbol, con contenidos de MgO entre 5-7% en peso (González-García et al., 2023; Pankhurst et al., 2022). Posteriormente se emitió basanitas más primitivas enriquecida en olivino y clinopiroxeno con contenidos de MgO entre 8-9%. Esta secuencia tefrita-basanita es similar a la observada durante la erupción de San Juan en 1949 y Teneguía en 1971 (Barker et al., 2015; Klügel, A et al., 2000; Ibarrola, 1974).

De las propiedades físicas del magma, la viscosidad ejerce una influencia clave en su comportamiento eruptivo, afectando a procesos como el ascenso, el crecimiento de burbujas, la fragmentación, el emplazamiento y la velocidad de desplazamiento de los flujos de lava

(Castro et al., 2022). Dado que esta propiedad está directamente condicionada por la composición química del magma (incluyendo su contenido en sílice, volátiles y proporción de cristales) el estudio composicional mediante técnicas como la microscopía electrónica de barrido se vuelve esencial para comprender su evolución a corto plazo durante un evento eruptivo. En este contexto, el presente trabajo propone evaluar el potencial del SEM como herramienta de monitorización petrológica, a través del análisis composicional del vidrio volcánico emitido durante la erupción de Cumbre Vieja (2021) con el fin de identificar las variaciones químicas a lo largo del evento eruptivo y estudiar la viabilidad de esta técnica para optimizar los tiempos de respuesta ante futuras erupciones.

2. OBJETIVOS

En erupciones volcánicas, el análisis composicional del material piroclástico constituye una herramienta clave para analizar e interpretar la evolución del magma. Esta caracterización química, se realiza comúnmente por microsonda electrónica (EPMA), una técnica de alta precisión ampliamente utilizada para determinar la composición de vidrios y minerales. Sin embargo, en el caso de las islas Canarias, su disponibilidad está limitada a laboratorios ubicados fuera de las islas, lo que implica demoras significativas en la obtención de resultados analíticos e impide su consideración en la toma de decisiones durante una emergencia. Ante esta limitación, el presente trabajo evalúa la microscopía electrónica de barrido (SEM) como una alternativa viable de monitorización petrológica. Esta técnica accesible, rápida y disponible en Tenerife y Gran Canaria, podría contribuir a mejorar el tiempo de respuesta ante futuros eventos eruptivos. Mencionado lo anterior, se proponen los siguientes objetivos:

2.1. Objetivo general

Evaluar la aplicabilidad de la microscopía electrónica de barrido (SEM) como herramienta de monitorización petrológica en erupciones volcánicas, mediante el estudio de la evolución composicional del vidrio volcánico en piroclastos de la erupción de La Palma (2021).

2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Evaluar distintas condiciones de medida en el SEM para establecer una metodología analítica que permita obtener composiciones representativas del vidrio volcánico, optimizando la precisión, exactitud y reproducibilidad de los datos.

2.2.2. Comparar los resultados obtenidos mediante SEM en materiales de referencia con los datos previos de microsonda electrónica, para evaluar la fiabilidad y precisión del SEM en la monitorización petrológica de erupciones volcánicas en el contexto de las islas Canarias.

2.2.3. Aplicar la microscopía electrónica de barrido para determinar la composición elemental del vidrio volcánico presente en piroclastos de la erupción de La Palma (2021), con el propósito de identificar las posibles variaciones químicas a lo largo del evento eruptivo.

2.2.4. Establecer la relación entre la evolución química del vidrio volcánico y los procesos magmáticos ocurridos durante la erupción, identificando posibles correlaciones entre las variaciones composicionales y las características del evento eruptivo.

2.2.5. Evaluar las ventajas y limitaciones del SEM en el estudio petrológico de piroclastos, analizando su capacidad para reproducir información sobre la composición del vidrio volcánico.

2.2.6. Diseñar un protocolo de actuación ante futuros eventos eruptivos, que permita obtener la composición química del vidrio volcánico en piroclastos, a través de la aplicación rápida y eficaz de la microscopía electrónica de barrido.

3. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

3.1. Monitorización petrológica de erupciones volcánicas

La monitorización de erupciones volcánicas integra un conjunto de técnicas que permiten observar, analizar y comprender los procesos internos de un volcán antes, durante y después de una erupción. Los métodos instrumentales como la sismología, geodesia y la vigilancia de emisiones gaseosas, permiten detectar en tiempo real ciertos cambios en el sistema magmático. Sin embargo, no miden el magma de forma directa (Re et al., 2021), sino que registran los cambios que este provoca en su entorno, como movimientos, deformaciones del terreno o variaciones en la concentración de los gases liberados.

De manera complementaria, la petrología ofrece un enfoque directo para reconstruir la evolución del magma a partir del análisis de los productos volcánicos emitidos, como cenizas, lapilli, bombas y coladas de lava. Estos materiales conservan un registro fisicoquímico de los procesos ocurridos en el interior del volcán antes y durante la erupción, y su estudio permite caracterizar parámetros como la textura, mineralogía, composición química, geoquímica total de la roca, contenidos de volátiles, isótopos y la reología (Pankhurst et al., 2022). Para que esta información sea útil en el monitoreo volcánico, los procedimientos petrológicos deben realizarse de manera periódica durante la erupción e incluye trabajo de campo, muestreo, preparación de las muestras, análisis de laboratorio y la interpretación de datos. Aunque este proceso puede ser extenso y demandar tiempos variables, la implementación de protocolos ágiles es esencial para obtener resultados oportunos que apoyen eficazmente la vigilancia y la toma de decisiones en situaciones de emergencia (Re et al., 2021). Además, vincular los datos petrológicos de resolución temporal con los datos geofísicos y observacionales en tiempo real probablemente contribuirá a futuros avances en el monitoreo volcánico (Longpré et al., 2025).

Por ello, en los últimos años, diversos estudios han puesto en evidencia el valor de la vigilancia petrológica basada en técnicas de roca total (fluorescencia de rayos X, XRF) o microanalíticas como la microsonda electrónica (EPMA) y la microscopía electrónica de barrido (SEM) para caracterizar productos volcánicos, tanto en su composición química como en su textura. Por ejemplo, durante la erupción de 2018 del rift este del volcán Kīlauea en Hawái, Gansecki et al. (2018) implementaron un sistema de monitoreo geoquímico rutinario y acelerado de 113 muestras de lava fundida o recientemente solidificada, transportadas al laboratorio en menos de 12 horas tras su recolección, y analizadas en intervalos de 1 y 2 horas mediante fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (EDXRF). Esta técnica permitió obtener datos composicionales mayoritarios y traza de forma rápida y con mínima preparación de las muestras. Además, los análisis se complementaron con WDXRF y microsonda electrónica

para obtener composiciones de vidrio de matriz y fenocristales. Esta metodología permitió identificar variaciones en la fuente y dinámica del magma, y resalta así el valor de las técnicas ágiles en petrología como parte integral de la respuesta ante emergencias volcánicas.

De forma más reciente, Corsaro y Miraglia (2022) llevaron a cabo un monitoreo casi en tiempo real de vidrio volcánico emitido durante los episodios paroxísticos registrados entre enero de 2020 y abril de 2021 en el cráter sureste del volcán Etna (Sicilia). Utilizando SEM-EDS, analizaron sistemáticamente la concentración de elementos mayoritarios como indicador directo de la composición del magma, revelando un comportamiento progresivamente más primitivo desde diciembre de 2020 hasta finales de febrero de 2021, cuya tendencia se invierte posteriormente y el magma se vuelve gradualmente más evolucionado hasta el final de la secuencia el 1 de abril de 2021. En sus conclusiones, las autoras destacan que el monitoreo petrológico contribuye significativamente a la evaluación del riesgo volcánico al proporcionar información sobre los procesos magmáticos en curso, los posibles estilos eruptivos y la magnitud de la actividad.

Por su parte, Longpré et al. (2025) realizaron estudio petrológico para la erupción de Tajogaite (Cumbre Vieja, 2021), mediante el análisis sistemático de vidrio volcánico en muestras de ceniza recolectadas a lo largo de toda la erupción. A través del uso de microsonda electrónica, identificaron cambios sutiles en la composición del magma que podrían quedar difusos en datos de roca total. Sus resultados mostraron composiciones que varían de tefritas a fonotefritas, con 44,8–49,0 % en peso de SiO_2 , 6,3–9,1 % en peso de álcalis totales ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) y 3,2–4,7 % en peso de MgO , siendo en general más silíceos, más alcalinos y menos magnésicos que las rocas en su conjunto. Además, estos cambios geoquímicos presentaron correlación temporal con la sismicidad registrada a diferentes profundidades. Estos hallazgos destacan la capacidad del vidrio volcánico y de las técnicas analíticas para generar datos de alta resolución en tareas de vigilancia volcánica, facilitar la detección de cambios eruptivos, evaluar el comportamiento del sistema magmático y complementar eficazmente los registros geofísicos.

Así mismo, Pankhurst et al. (2022) reportaron una respuesta petrológica durante la fase eruptiva inicial de Cumbre Vieja (2021), enfocándose en la caracterización mineralógica, geoquímica y textural de los primeros materiales emitidos, tanto coladas de lava como tefras, para lo cual emplearon microsonda electrónica, difracción de rayos X y QEMSCAN (un sistema basado en SEM). Sus resultados evidenciaron un sistema magmático multiminerale complejo, con presencia dominante de clinopiroxeno, olivino y anfíbol, además de evidenciar fraccionamiento composicional. De manera complementaria, Day et al. (2022) describieron la composición química y mineralógica a lo largo de toda la erupción, señalando una transición

desde magmas tefríticos fraccionados con bajo MgO, elevado contenido en TiO₂ y presencia de cristales anfíbol y microxenolitos, hacía magmas basaníticos hasta la terminación de la erupción. Estos estudios, no solo permitieron comprender la dinámica eruptiva y establecer un marco petrográfico, sino que también facilitaron la evaluación de los riesgos volcánicos asociados y aportaron información para la toma de decisiones durante la emergencia.

Este enfoque analítico también está siendo implementado actualmente en otros contextos geodinámicos como la zona de rifting activa en la península de Reykjanes (Islandia) en la que han sucedido hasta 12 erupciones entre marzo de 2021 y julio de 2025. En este caso, el estudio de Marshall et al. (2024) mostró como la combinación de distintas áreas de monitoreo durante la erupción de Fagradalsfjall (Islandia 2021) permitió construir una visión completa del sistema volcánico al integrar la sismicidad, el infrasonido, la deformación del terreno, la geoquímica de gases, el comportamiento eruptivo la tasa de efusión de las bocas, la petrología de las lavas y la geoquímica del material fundido. Aunque cada uno de estos datos refleja aspectos particulares del sistema magmático, su análisis en conjunto permitió comprender la evolución de la erupción. Esto refuerza el planteamiento desarrollado a lo largo de este apartado, en el que diversos autores han demostrado la importancia de integrar datos petrológicos a través del uso de técnicas rápidas, eficaces y accesibles, como parte integral de vigilancia volcánica. Respecto a Reykjanes, esta integración se está realizando ya de forma rutinaria para cada nueva erupción.

3.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés de Scanning Electron Microscopy) es una técnica analítica ampliamente utilizada para estudiar la topografía, morfología y composición de materiales, tanto orgánicos como inorgánicos. Su funcionamiento se basa en la interacción entre un haz focalizado de electrones primarios y la superficie de la muestra para obtener imágenes de alta resolución e información sobre sus características físicas y químicas. Este haz se genera por el calentamiento de un filamento, comúnmente de wolframio o hexafluoruro de lantano, y es acelerado a través de una columna con energías de excitación desde 0,1 kV hasta 50 kV (Arroyo, 2024). Para evitar la dispersión de los electrones, todo el recorrido del haz, así como la cámara donde se coloca la muestra, se mantienen al vacío. De este modo, los electrones penetran en la muestra a una distancia de pocas micras, produciendo múltiples rebotes y deflexiones por debajo de la superficie de la muestra. Este proceso genera un volumen excitado con forma de pera como se observa en la figura 2.a, y origina señales electrónicas a distintas profundidades, que son captadas por los detectores del equipo para obtener información específica. Las señales más comunes son:

- I. Electrones secundarios (SE): Son electrones de baja energía (~ 10 a 50 eV) que se generan cuando el haz de electrones primarios impacta los átomos de la superficie de la muestra como se ilustra en la figura 2.b. Su detección permite obtener imágenes detalladas de la morfología y topografía del material analizado.
- II. Electrones retrodispersados (BSE): Son electrones primarios que penetran en la muestra y luego son desviados y emitidos desde zonas más internas con alta energía (ver figura 2.c). Sin embargo, la cantidad y magnitud de la misma, depende del número atómico de los elementos que constituyen la muestra, de manera que se obtienen imágenes con diferentes tonos de grises que reflejan variaciones en la composición química del material (los elementos con mayor número atómico aparecen más brillantes en las imágenes de BSE, mientras que una apariencia más oscura representa un elemento con un número atómico más bajo) (Ali et al., 2023).

Las imágenes obtenidas por SE y BSE se forman a medida que el haz de electrones se desplaza sobre una porción de la superficie. Este barrido, también llamado scanning, se realiza línea por línea sobre una pequeña zona de forma rectangular (ráster), y es la zona que se visualiza amplificada en la imagen final. Un ordenador, a través del software correspondiente, interpreta la intensidad de los electrones detectados (ya sean secundarios o retrodispersados) y asigna una intensidad de color en la escala de grises.

- III. Rayos X característicos: Cuando el haz de electrones interactúa con los átomos de la muestra, se producen transiciones electrónicas (cambios en los niveles de energía) que generan la emisión de rayos X, cuya energía es característica para cada elemento. Este proceso, representado en la figura 2.d, permite identificar y cuantificar la composición elemental del material (Clavijo, 2013).

En detalle, cada elemento químico tiene un pico característico asociado a sus transiciones cuánticas que puede ser identificado tanto por su energía (ν) como por su longitud de onda (λ). La intensidad de cada uno de estos picos, generados por la emisión de rayos X característicos, es proporcional a la concentración relativa del elemento en la muestra analizada. Para medir estos picos y realizar un análisis cuantitativo, se utilizan dos técnicas: la espectrometría por dispersión de energía (EDS: energy-dispersive spectrometry), y la espectrometría por dispersión de longitudes de onda (WDS: wavelength-dispersive spectrometry). Ambas técnicas usan distintos detectores y procedimientos analíticos, y aunque presentan ventajas y limitaciones específicas, pueden emplearse de manera complementaria en estudios realizados por SEM (Castro, 2015).

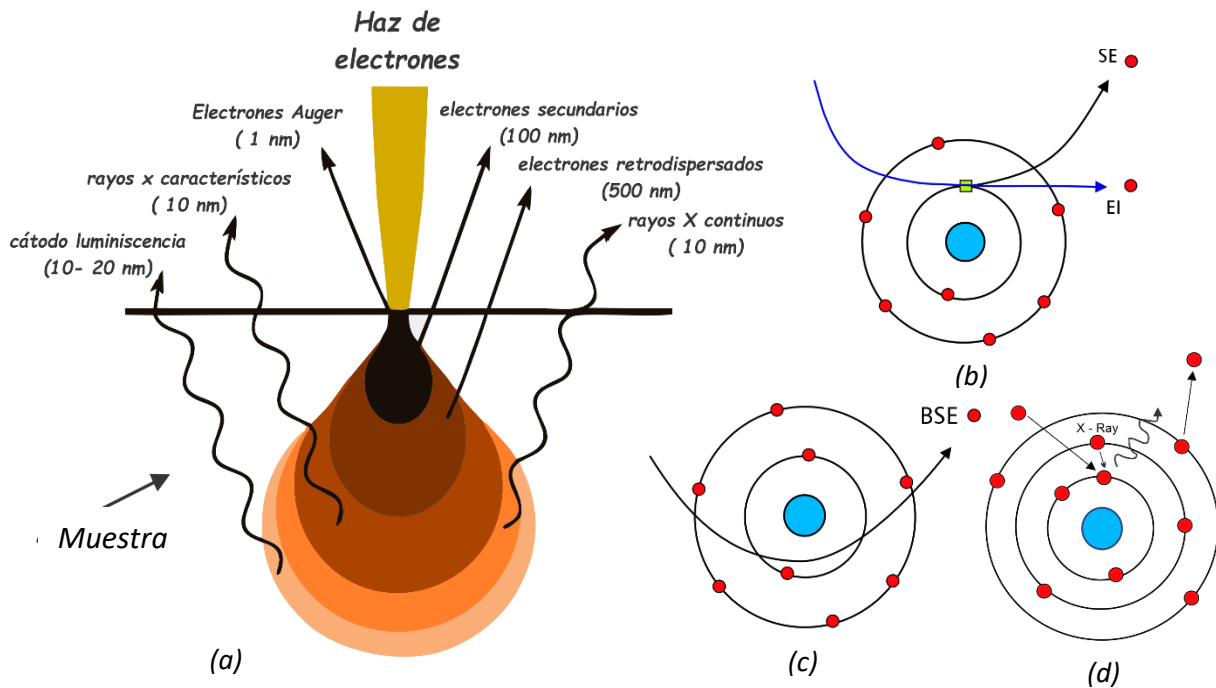


Figura 2. Esquema general de las señales generadas por la interacción de un haz de electrones con la muestra en un microscopio electrónico de barrido.

(a) Interacción del haz de electrones con el material y zonas de origen de las distintas señales; (b) Generación de electrones secundarios desde los niveles más superficiales del material (c) Emisión de electrones retrodispersados (BSE) procedentes de las capas más internas (d) Liberación de rayos X característicos como respuesta a transiciones electrónicas.

La espectrometría por dispersión de energía (EDS) mide la energía de los rayos X emitidos por los elementos presentes en la matriz en estudio cuando son excitados por el haz de electrones. Es una técnica rápida ya que los espectros se adquieren en tiempos cortos y permite identificar varios elementos de manera simultánea. Sin embargo, tiene una resolución menor, lo que significa que algunos picos pueden superponerse y dificultar su identificación y cuantificación. Por su parte, la espectrometría por dispersión de longitudes de onda (WDS) mide la longitud de onda de los rayos X utilizando un cristal analizador que separa las señales con mayor precisión, lo que permite detectar elementos en concentraciones muy bajas y de manera más efectiva (en comparación con EDS) elementos más ligeros como el Na. No obstante, es un método que requiere mayor tiempo de análisis, pues analiza los elementos uno por uno y suele necesitar equipos más especializados (Castro, 2015).

De esta manera, cuando se acopla un espectrómetro de rayos X al SEM, como es el caso del EDS, es posible realizar análisis tanto cualitativos como cuantitativos. Esta técnica no solo permite efectuar análisis puntuales (en un sitio específico de la muestra), sino también un mapeo elemental y escaneos por líneas o áreas determinadas, con el fin de conocer, por ejemplo, la distribución espacial de los minerales que conforman la muestra (Ural, 2021).

3.2.1. Modelos de corrección: P/B-ZAF y Phi (Rho, Z)

En técnicas como la microscopía electrónica de barrido, los modelos de corrección desempeñan un rol fundamental en el desarrollo de análisis cuantitativos, ya que compensan los efectos físicos que distorsionan la intensidad de los rayos X detectados durante una prueba. Los modelos que se utilizan en este caso son el ZAF, específicamente P/B-ZAF, y el $\phi(\rho z)$, también mencionado en este trabajo como Phi (Rho, Z). Ambos permiten calcular con mayor precisión las concentraciones elementales a partir de los espectros obtenidos.

El modelo clásico ZAF corrige la señal de rayos X considerando el número atómico (Z), absorción de rayos X (A) y la fluorescencia (F) de acuerdo con la ecuación 1:

$$C_i / C_{(i)} = [Z A F]_i \cdot I_i / I_{(i)} = [Z A F]_i \cdot k_i \quad (1)$$

Donde C_i es la fracción en peso del elemento i en la muestra (lo que se quiere calcular); $C_{(i)}$ es la fracción en peso del elemento i en el estándar de referencia; I_i es la intensidad de rayos X del elemento i medidos en la muestra; $I_{(i)}$ es la intensidad del mismo elemento medida por el estándar; k_i es el cociente de intensidades ($I_i / I_{(i)}$) también llamado intensidad relativa; y $[Z A F]_i$ es el factor de corrección total que integra los efectos del número atómico (Z), la absorción (A) y la fluorescencia secundaria (F) (Goldstein et al., 2003).

El factor Z ajusta la intensidad medida, compensando las diferencias que se producen por el número atómico. Esta característica del elemento influye en aspectos como la cantidad de electrones que se retrodispersan, la distribución de la energía del haz incidente y la pérdida de energía por frenado. Por ejemplo, en materiales con un número atómico elevado (Z alto), una mayor cantidad de electrones del haz se retrodispersan antes de penetrar en la muestra, lo que reduce la generación efectiva de rayos X característicos. Como consecuencia, dos elementos con igual concentración pueden producir intensidades diferentes de rayos X debido a la variación en sus números atómicos. De manera que, al aplicar el factor Z, se igualan las condiciones para todos los elementos y la señal registrada se relaciona directamente la concentración real.

Cuando el haz de electrones impacta la muestra, se generan rayos X característicos en distintas profundidades dentro del material; al atravesar la muestra, parte de estos rayos se absorbe, por lo que no todos logran salir para ser detectados. Como resultado, la intensidad medida en el detector no corresponde a la intensidad real generada en el interior. Por lo tanto, corregir la absorción (A), permite estimar cuánta radiación se pierde dentro de la muestra para evitar subestimar la concentración del elemento analizado. Por otro lado, está el factor F, cuya corrección compensa el aumento en la intensidad de rayos X causado por la fluorescencia

secundaria. Este fenómeno ocurre cuando los rayos X generados por un elemento poseen suficiente energía para excitar a otros cercanos, provocando que estos también emitan radiación, incluso sin haber sido impactados directamente por el haz de electrones. Por ende, se registra una señal adicional que no corresponde directamente a la concentración real.

Ahora bien, P/B-ZAF es una variante del modelo clásico ZAF e introduce un enfoque adicional para estimar la intensidad de los rayos X detectados. Corresponde a la razón entre la altura del pico y el nivel de fondo para estimar cuanto del espectro medido corresponde al elemento de interés frente a lo que constituye ruido de fondo; ambos se generan aproximadamente a la misma profundidad de la muestra y por tanto, se ven afectados de manera similar por efectos físicos como la absorción (Goldstein et al., 2003). Aunque este modelo es ampliamente utilizado, tiende a ser menos preciso en materiales como silicatos y óxidos. Según Armstrong (1988), este método puede subestimar o sobreestimar la concentración real de un elemento al no considerar la distribución espacial no uniforme de los rayos X que se generan dentro de la muestra. En este sentido, el modelo $\phi(\rho z)$ representa una mejora sobre el ZAF, al introducir una función basada en el producto de la densidad (ρ) por la profundidad (z) expresada en unidades de masa por área (g/cm^2). Esta expresión describe la generación de rayos X a distintas profundidades dentro de la muestra y permite calcular la intensidad total que llega al detector.

Las funciones $\phi(\rho z)$ pueden obtenerse de manera empírica, a partir de datos experimentales, o mediante simulaciones de Monte Carlo; estas últimas reproducen con gran detalle las trayectorias de los electrones dentro del material, así como la distribución espacial de los rayos X, lo que permite mejorar la precisión de los análisis cuantitativos. En su investigación, Armstrong (1988) concluyó que las correcciones basadas en $\phi(\rho z)$ proporcionan mayor exactitud especialmente en el estudio de materiales no metálicos como óxidos y silicatos, para aquellos con alta absorción de rayos X y muestras delgadas, estratificadas y con geometrías irregulares.

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan los procedimientos y técnicas empleadas para evaluar la aplicabilidad del SEM como herramienta de monitorización petrológica en erupciones volcánicas en las islas Canarias, a través de la caracterización composicional del vidrio volcánico contenido en piroclastos.

4.1. Obtención y preparación de las muestras

Las muestras usadas en este estudio fueron obtenidas durante y después de finalizar la erupción de La Palma del 2021. Se analizaron tres muestras de piroclastos que corresponden a fragmentos tipo Lapilli emitidas en distintas etapas del evento eruptivo (PAR 2309, CV21P-A1 y CV21P-B1) y recolectadas por D. González García y T. Boulesteix (González-García et al., 2023). También, se analizaron dos muestras de “xenopómez” (comúnmente conocidas como “Restingolitas”), muestreadas por miembros del Grupo de Vulcanismo UCM-URJC (118677 y TQ41-G). PAR 2309 fue tomada el 23 de septiembre en El Paraíso, en los primeros días de actividad volcánica; CV21P-B1 fue obtenida en una capa de lapilli (unidad LU 2.3 de Romero et al., 2022), emplazada entre el 26 de septiembre y el 10 de octubre, y CV21P-A1 fue registrada al oeste del cono principal y corresponde a los últimos pulsos explosivos entre el 1 y el 2 de diciembre. Por su parte, 118677 y TQ41-G se recogieron el 29 de septiembre y 26 de octubre, respectivamente, y fueron emitidas el día de su muestreo o como máximo, el día anterior. Adicionalmente, como material de referencia se utilizaron tres vidrios experimentales homogéneos de composición tefrítica y fonolítica (PF21 y ABP-F; González-García et al., 2024) y shoshonítica (PVRG-25; González-García et al., 2017).

Una vez obtenidas y con el fin de llevar a cabo el análisis por SEM, las muestras fueron preparadas en dos formatos, lámina y probeta. Para la primera opción, se realizó un corte inicial de la roca en forma de paralelepípedo hasta obtener un taco de tamaño manejable. En ambos casos, se lijó la superficie usando carburo de silicio de distintas granulometrías hasta obtenerla exenta de relieves, seguido de una limpieza con agua y aire, y un secado posterior en una placa de calentamiento entre 60 y 70°C para evaporar residuos de agua.

Para la preparación de las láminas, una vez secas las muestras, se aplicó una resina termoplástica para fijar el taco sobre el portalamina, cuidando que no se formaran burbujas de aire, y se llevó a una prensa mecánica a la misma temperatura de secado durante 1h. Tras el fraguado, se realizó un corte del taco para reducir su tamaño y, finalmente, se lijó hasta alcanzar un grosor de 30µm ideal para el análisis por SEM. En el caso de las probetas, se encapsuló un pequeño fragmento del taco usando resina de poliéster y se dejó fraguar durante 24h a 50°C, dando lugar a las muestras que se observan en la figura 3.

La comparación entre ambos métodos mostró que la preparación en lámina requiere un tiempo adicional de una a dos horas por muestra, debido principalmente al proceso de reducción y lijado hasta alcanzar los 30µm. No obstante, la elaboración en probetas implica un coste económico más alto, asociado al uso de mayor cantidad de resina. En términos prácticos ambos formatos resultan adecuados para el análisis de SEM y la elección del uno u otro dependerá de la disponibilidad de recursos y del contexto operativo durante una futura erupción volcánica.

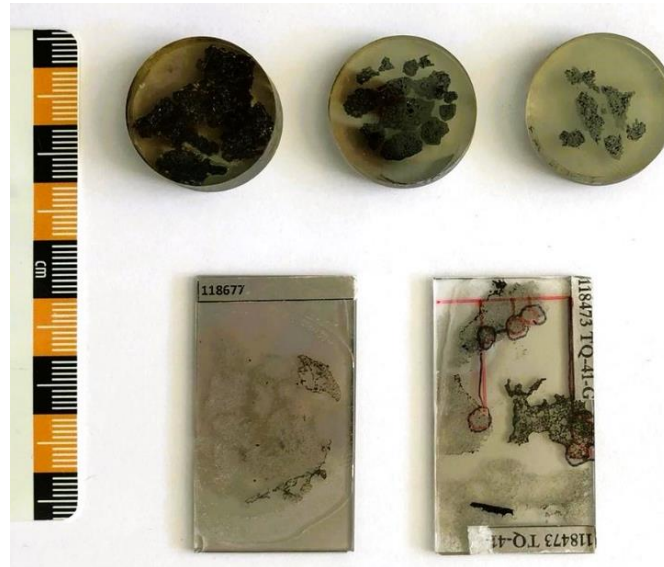


Figura 3. Muestras preparadas para análisis por SEM en lámina y probeta

Por último, las muestras fueron recubiertas con una fina capa de carbono para asegurar su conductividad. Este paso es imprescindible para analizar materiales no conductores, ya que permite disipar la carga eléctrica acumulada por el haz de electrones durante el análisis y optimizar la calidad de imagen durante la observación por SEM.

4.2. Determinación de la composición elemental del vidrio volcánico mediante SEM

4.2.1. Parámetros analíticos y condiciones de medida

La caracterización química de las muestras se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), utilizando un equipo TESCAN Vega 4 (ver figura 4), operado en modo de alto vacío. Los análisis se llevaron a cabo acoplando dos detectores de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS) marca Bruker de 30mm² y 60mm². Los análisis se realizaron con un voltaje de 20 kV, seleccionado para asegurar una adecuada excitación de los átomos presentes en las muestras y facilitar la detección de elementos con distintos números atómicos, desde los más ligeros hasta los más pesados (Corsaro & Miraglia, 2022). A esta condición se sumaron una corriente de haz de 30µA y un barrido cuadrado de 5 x 5 µm, en lugar de un análisis puntual, con el fin de minimizar la pérdida de elementos volátiles como el

sodio o potasio por efecto del haz. Para cada medición, se utilizó un aumento de 2000x, seleccionado para ofrecer un equilibrio entre la resolución y la representatividad de la fase vítrea dentro del campo analizado.

En la primera etapa de la investigación, se evaluaron tres configuraciones del parámetro de tiempo de adquisición automático, que controla la cantidad de señal (conteo) recogidas en cada análisis. Estos ajustes fueron: rápido (50.000 conteos), preciso (250.000 conteos) y exhaustivo (1.000.000 conteos) (Bruker Nano GmbH, 2022). Tras comparar los resultados obtenidos con cada uno, se seleccionó el modo exhaustivo como parte de la metodología para el análisis definitivo de todas las muestras, ya que permitió identificar y cuantificar elementos presentes en bajas concentraciones como el Mn, P y Cl, lo que no fue posible con los otros modos. Además, se contabilizó el tiempo requerido de respuesta para el modo exhaustivo, el cual osciló entre 10 y 11 minutos por análisis, considerándose adecuado para los objetivos del estudio.

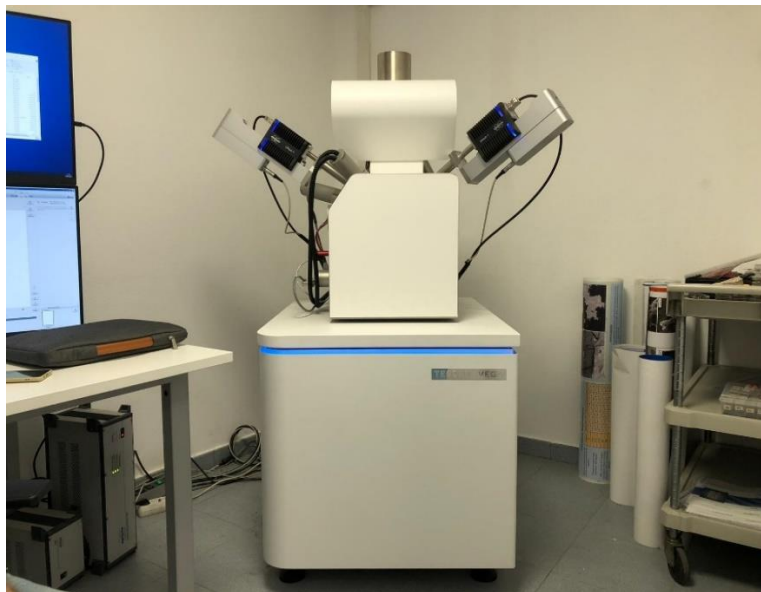


Figura 4. Microscopio electrónico de barrido TESCAN Vega 4 utilizado para este estudio

4.2.2. Análisis, interpretación y cuantificación de espectros EDS

La visualización y tratamiento de los espectros EDS se realizó mediante el software ESPRIT para sistemas QUANTAX, desarrollado por Bruker. Dentro de este entorno, se usó la interfaz ESPRIT Spectrum para la manipulación e identificación de los picos característicos de cada elemento y Quant ESPRIT, que permitió la cuantificación elemental del vidrio volcánico mediante distintos modelos y correcciones, como ZAF y Phi (Rho), además de facilitar la conversión de los datos a composiciones en porcentaje en masa. La integración de ambos módulos en un mismo entorno de trabajo facilitó el análisis secuencial de los espectros, desde su evaluación cualitativa hasta la obtención de los resultados cuantitativos de los elementos

que componen las muestras, expresados en forma de óxidos para su posterior interpretación geoquímica.

En la figura 5 se muestra un ejemplo de espectro EDS correspondiente a una de las muestras analizadas, donde pueden observarse los picos característicos de elementos mayoritarios como el Si y Al, además de otros minoritarios.

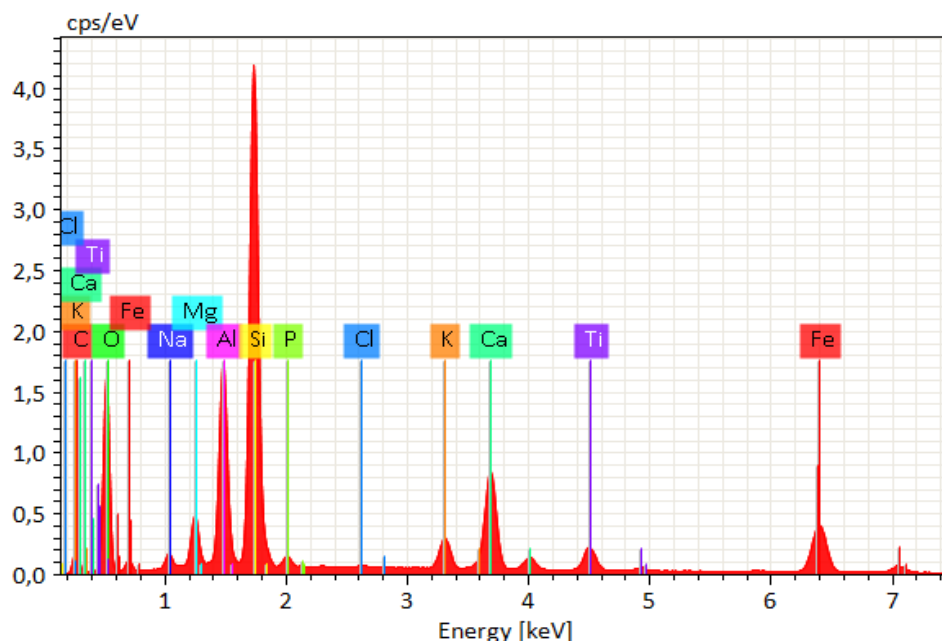


Figura 5. Espectro EDS obtenido con el software ESPRIT Spectrum de Bruker en una muestra de vidrio volcánico.

Para comenzar el análisis, se cargó el archivo espectral (.rtx) y se determinó la composición elemental de cada muestra mediante la identificación de sus picos característicos en el espectro. Se detectaron y cuantificaron Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P y Cl. Se excluyeron del análisis cuantitativo final, aquellas concentraciones que estuvieran por debajo del límite de detección o que presentaron un margen de error superior a los umbrales aceptables. Posteriormente, se seleccionó el archivo de configuración *oxides.mtdx* incluido en el entorno Quant ESPRIT, con el objetivo de expresar las concentraciones en forma de óxidos (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5); este paso es independiente del método de cuantificación aplicado, P/B-ZAF y Phi (Rho, Z), y define únicamente el formato de salida de los datos.

Con relación a los métodos de corrección P/B-ZAF y Phi (Rho, Z), ambos fueron aplicados a todas las muestras con el propósito de evaluar y comparar sus resultados en etapas posteriores del estudio. La selección de estos modelos se realiza en el software y determina el tipo de corrección matemática aplicada a los datos espectrales, sin modificar las condiciones experimentales bajo las cuales fueron obtenidos. La aplicación de estos modelos

es fundamental para convertir los espectros en composiciones elementales confiables, ya que la intensidad de los picos que los componen no refleja directamente la concentración real de los elementos. Aunque existe una relación general entre la altura del pico y la concentración, su cuantificación se ve afectada por factores físicos como la absorción de los rayos X, la fluorescencia secundaria y el número atómico de los elementos presentes en la muestra.

Como resultado del procedimiento descrito, se obtuvieron composiciones en distintos formatos, en función del modelo de corrección aplicado. El modelo P/B-ZAF proporciona valores de masa (%) y masa normalizada (%) para cada elemento, así como sus correspondientes proporciones estequiométricas en forma de óxidos (sto (%) y sto normalizada (%)). En el caso del modelo Phi (Rho, Z), los resultados se expresan únicamente como proporciones estequiométricas, en términos de sto (%) y sto normalizada (%). Para este estudio, se optó por trabajar con los valores estequiométricos normalizados, por ser los más apropiados para comparar los resultados con estudios previos de microsonda electrónica y facilitar su interpretación geoquímica.

5. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al evaluar la aplicabilidad del SEM como herramienta de monitorización petrológica en contextos eruptivos de las Islas Canarias, siguiendo los procedimientos metodológicos descritos previamente.

5.1. Evaluación de parámetros analíticos mediante vidrio experimental de referencia

Para optimizar los parámetros de medida del espectro EDS en el SEM, se analizaron los materiales de referencia PF21 y ABP-F. La comparación entre los modos del parámetro de tiempo de adquisición automático rápido, preciso y exhaustivo, evidenció que este último proporcionó mayor precisión para detectar y cuantificar Mn, P y Cl, elementos presentes en bajas concentraciones. Aunque este ajuste requiere entre 10 y 11 minutos por muestra, un tiempo superior al de las otras opciones, se considera adecuado para una respuesta operativa durante una emergencia volcánica. A partir de este primer resultado, se definió la configuración exhaustiva como la más adecuada para el resto de los análisis.

Con los parámetros optimizados, se obtuvo la composición química de los materiales de referencia PF21, ABP-F y PVRG-25, aplicando los modelos de corrección P/B- ZAF y Phi (Rho, Z). Los valores expresados como porcentaje en peso normalizado, corresponden al promedio de tres puntos medidos por muestra, cuyos resultados se presentan en las tablas 1 y 2, donde también se incluyen los datos de referencia reportados con microsonda electrónica (Valor EPMA) y sus respectivas desviaciones.

Tabla 1. Resultados del análisis de la composición química de los vidrios de referencia por SEM, aplicando el modelo P/B-ZAF. Valores de referencia de EPMA obtenidos de González García et al. (2017, 2024).

| Muestra | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Cl |
|-------------------|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|
| PF21- 1 | 42.60 | 3.95 | 17.62 | 11.33 | 0.19 | 4.94 | 10.88 | 5.35 | 2.47 | 0.63 | 0.04 |
| PF21- 2 | 42.36 | 3.88 | 17.38 | 11.43 | 0.19 | 4.90 | 11.38 | 5.23 | 2.61 | 0.61 | 0.04 |
| PF21- 3 | 43.00 | 4.03 | 17.88 | 11.01 | 0.15 | 5.04 | 10.30 | 5.47 | 2.39 | 0.68 | 0.05 |
| Media | 42.65 | 3.95 | 17.63 | 11.26 | 0.18 | 4.96 | 10.85 | 5.35 | 2.49 | 0.64 | 0.04 |
| σ | 0.32 | 0.08 | 0.25 | 0.22 | 0.02 | 0.07 | 0.54 | 0.12 | 0.11 | 0,04 | 0.01 |
| Valor EPMA | 47.51 | 3.39 | 15.83 | 10.62 | 0.20 | 4.96 | 9.22 | 5.23 | 2.31 | 0.74 | - |
| σ | 0.27 | 0.04 | 0.10 | 0.11 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | - |
| ABP-F - 1 | 57.03 | 1.04 | 20.78 | 3.83 | 0.23 | 0.47 | 1.96 | 8.25 | 6.24 | 0.07 | 0.11 |
| ABP-F - 2 | 56.32 | 1.00 | 20.84 | 3.77 | 0.28 | 0.51 | 2.14 | 8.48 | 6.52 | - | 0.14 |
| ABP-F - 3 | 56.87 | 0.95 | 20.96 | 3.75 | 0.23 | 0.48 | 1.96 | 8.52 | 6.14 | 0.07 | 0.08 |
| Media | 56.74 | 1.00 | 20.86 | 3.78 | 0,25 | 0.49 | 2.02 | 8.42 | 6.30 | 0.07 | 0.11 |
| σ | 0.37 | 0.05 | 0.09 | 0.04 | 0,03 | 0.02 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.00 | 0.03 |
| Valor EPMA | 61.38 | 0.77 | 18.29 | 3.23 | 0.21 | 0.60 | 1.63 | 8.32 | 5.50 | 0.08 | - |
| σ | 0.26 | 0.02 | 0.16 | 0.06 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.07 | 0.05 | 0,03 | - |

| Muestra | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Cl |
|-------------------|------------------|------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|
| PVRG-25 - 1 | 50.74 | 0.91 | 17.54 | 8.67 | 0.18 | 4.36 | 8.90 | 5.14 | 3.34 | - | 0.15 |
| PVRG-25 - 2 | 50.76 | 0.82 | 17.29 | 8.57 | 0.15 | 4.29 | 9.12 | 5.03 | 3.36 | - | 0.16 |
| PVRG-25 - 3 | 50.39 | 0.83 | 17.11 | 9.29 | 0.13 | 4.21 | 9.67 | 4.84 | 3.35 | - | 0.17 |
| Media | 50.63 | 0.85 | 17.31 | 8.84 | 0.15 | 4.29 | 9.23 | 5.00 | 3.35 | - | 0.16 |
| σ | 0.21 | 0.05 | 0.22 | 0.39 | 0.03 | 0.08 | 0.40 | 0.15 | 0.01 | - | 0.01 |
| Valor EPMA | 52.66 | 0.68 | 16.20 | 8.04 | 0.21 | 4.58 | 7.94 | 5.39 | 3.01 | 1.29 | - |
| σ | 0.77 | 0.04 | 0.15 | 0.28 | 0.10 | 0.13 | 0.18 | 0.21 | 0.07 | 0.95 | - |

Los resultados obtenidos con el modelo P/B-ZAF para las tres muestras de referencia de vidrio volcánico muestran una tendencia general a subestimar el contenido de SiO₂ en comparación con los valores de referencia EPMA. Un comportamiento similar se observa para el MgO, aunque, en la muestra PF21, la media de su concentración coincide exactamente con el valor de referencia. En contraste, los óxidos TiO₂, Al₂O₃, FeO, CaO y K₂O tienden a estar ligeramente sobreestimados con una desviación que varía según el analito. Por su parte el Na₂O no muestra una tendencia clara, ya que en PF21 y ABP-F las cantidades determinadas son mayores, mientras que en PVRG-25 se encuentran por debajo.

En cuanto al MnO sus concentraciones evidencian poca variabilidad entre los tres puntos analizados, lo que refleja precisión en la medición. El P₂O₅, aunque fue detectado en todas las pruebas, mostró discrepancias notorias en PVRG-25, donde no se reporta cuantificación por SEM debido a errores relativos superiores al 60%. Esta variabilidad puede atribuirse a las limitaciones del modelo para estimar elementos en baja concentración, particularmente cuando su señal es débil o se encuentra cerca del límite de detección. En el caso del Cl, aunque fue considerado en el análisis total, no se dispone de un valor de referencia para ser comparado, pues no representa un componente significativo para la interpretación geoquímica en este contexto; no obstante, se incluyó para fines de normalización.

En lo que respecta al modelo Phi (Rho, Z), los resultados obtenidos para los mismos materiales de referencia se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados del análisis de la composición química de los vidrios de referencia por SEM, aplicando el modelo Phi (Rho, Z).

| Muestra | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Cl |
|-------------------|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|
| PF21- 1 | 46.98 | 3.53 | 16.84 | 11.07 | 0.19 | 4.52 | 9.02 | 4.79 | 2.41 | 0.61 | 0.04 |
| PF21- 2 | 47.05 | 3.55 | 16.90 | 10.99 | 0.19 | 4.60 | 8.86 | 4.84 | 2.40 | 0.58 | 0.04 |
| PF21- 3 | 47.01 | 3.55 | 16.93 | 10.98 | 0.15 | 4.56 | 8.89 | 4.83 | 2.40 | 0.64 | 0.05 |
| Media | 47.01 | 3.54 | 16.89 | 11.01 | 0.18 | 4.56 | 8.92 | 4.82 | 2.40 | 0.61 | 0.04 |
| σ | 0.04 | 0.01 | 0.05 | 0.05 | 0.02 | 0.04 | 0.09 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.01 |
| Valor EPMA | 47.51 | 3.39 | 15.83 | 10.62 | 0.20 | 4.96 | 9.22 | 5.23 | 2.31 | 0.74 | - |

| Muestra | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Cl |
|-------------------|------------------|------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|
| σ | 0.27 | 0,04 | 0.10 | 0.11 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | - |
| ABP-F - 1 | 60.83 | 0.82 | 19.46 | 3.35 | 0.21 | 0.43 | 1.55 | 7.40 | 5.79 | 0.07 | 0.09 |
| ABP-F - 2 | 60.86 | 0.82 | 19.42 | 3.40 | 0.26 | 0.45 | 1.59 | 7,35 | 5.73 | - | 0.12 |
| ABP-F - 3 | 61.02 | 0.79 | 19.42 | 3.43 | 0.21 | 0.42 | 1.53 | 7.36 | 5.68 | 0.07 | 0.08 |
| Media | 60.90 | 0.81 | 19.43 | 3.39 | 0.23 | 0.43 | 1.56 | 7.37 | 5.73 | 0.07 | 0.10 |
| σ | 0.10 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.06 | 0.00 | 0.02 |
| Valor EPMA | 61.38 | 0.77 | 18.29 | 3.23 | 0.21 | 0.60 | 1.63 | 8.32 | 5.50 | 0.08 | - |
| σ | 0.26 | 0.02 | 0.16 | 0.06 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.07 | 0.05 | 0.03 | - |
| PVRG-25 - 1 | 54.70 | 0.76 | 16.56 | 8.16 | 0.18 | 3.99 | 7.50 | 4.64 | 3.20 | 0.18 | 0.13 |
| PVRG-25 - 2 | 54.74 | 0.73 | 16.56 | 8.23 | 0.14 | 4.01 | 7.50 | 4.66 | 3.20 | 0.09 | 0.14 |
| PVRG-25 - 3 | 54.88 | 0.71 | 16.55 | 8.27 | 0.13 | 3.99 | 7.48 | 4.57 | 3.16 | 0.11 | 0.14 |
| Media | 54.77 | 0.73 | 16.56 | 8.22 | 0.15 | 4.00 | 7.49 | 4.62 | 3.19 | 0.13 | 0.14 |
| σ | 0.09 | 0.03 | 0.01 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 0.05 | 0.01 |
| Valor EPMA | 52.66 | 0.68 | 16.20 | 8.04 | 0.21 | 4.58 | 7,94 | 5.39 | 3.01 | 1.29 | - |
| σ | 0.77 | 0.04 | 0.15 | 0.28 | 0.10 | 0.13 | 0.18 | 0.21 | 0.07 | 0.95 | - |

Aunque se observan ligeras desviaciones que varían según el elemento y la muestra, el modelo Phi (Rho, Z) proporciona resultados más próximos a los valores EPMA para la mayoría de los elementos, excepto para MgO y Na₂O, en cuyo caso el modelo P/B-ZAF evidencia mayor exactitud. Es importante destacar que, en este caso se logró cuantificar P₂O₅ en la muestra PVRG-25, pero con una diferencia considerable respecto al valor de referencia. Por otra parte, se aprecia que los óxidos mayoritarios presentan un mejor ajuste en comparación con los minoritarios, lo que sugiere que las diferencias en desempeño podrían estar relacionadas con las concentraciones y la naturaleza química de cada componente.

Dado lo anterior y considerando la complejidad de las variaciones observadas, se presentan una serie de diagramas mostrando la desviación para cada óxido en la medida del SEM respecto a la microsonda, que facilitan la comparación visual del desempeño de ambos modelos de corrección. Estas representaciones se construyeron calculando el cociente entre los valores obtenidos por microscopía SEM y sus correspondientes datos de referencia por microsonda electrónica; esta razón se expresó como porcentaje mediante la fórmula $desviación (\%) = 100 \cdot (C_{SEM} - C_{EPMA}) / C_{EPMA}$ (siendo C_{SEM} y C_{EPMA} las concentraciones medidas en cada técnica), donde un valor cercano a cero indica una alta concordancia. La línea base en cero sirve como referencia para evaluar la desviación de cada dato relativa al valor EPMA, facilitando así la identificación de tendencias y discrepancias específicas en la cuantificación de los distintos óxidos.

De esta manera, en la figura 6 se muestran las desviaciones porcentuales mencionadas anteriormente para las composiciones químicas obtenidas para cada uno de los vidrios

experimentales de referencia. Las curvas rojas y azules representan los modelos de corrección P/B-ZAF y Phi (Rho, Z), respectivamente, y la línea negra en cero la perfecta concordancia con los valores de EPMA.

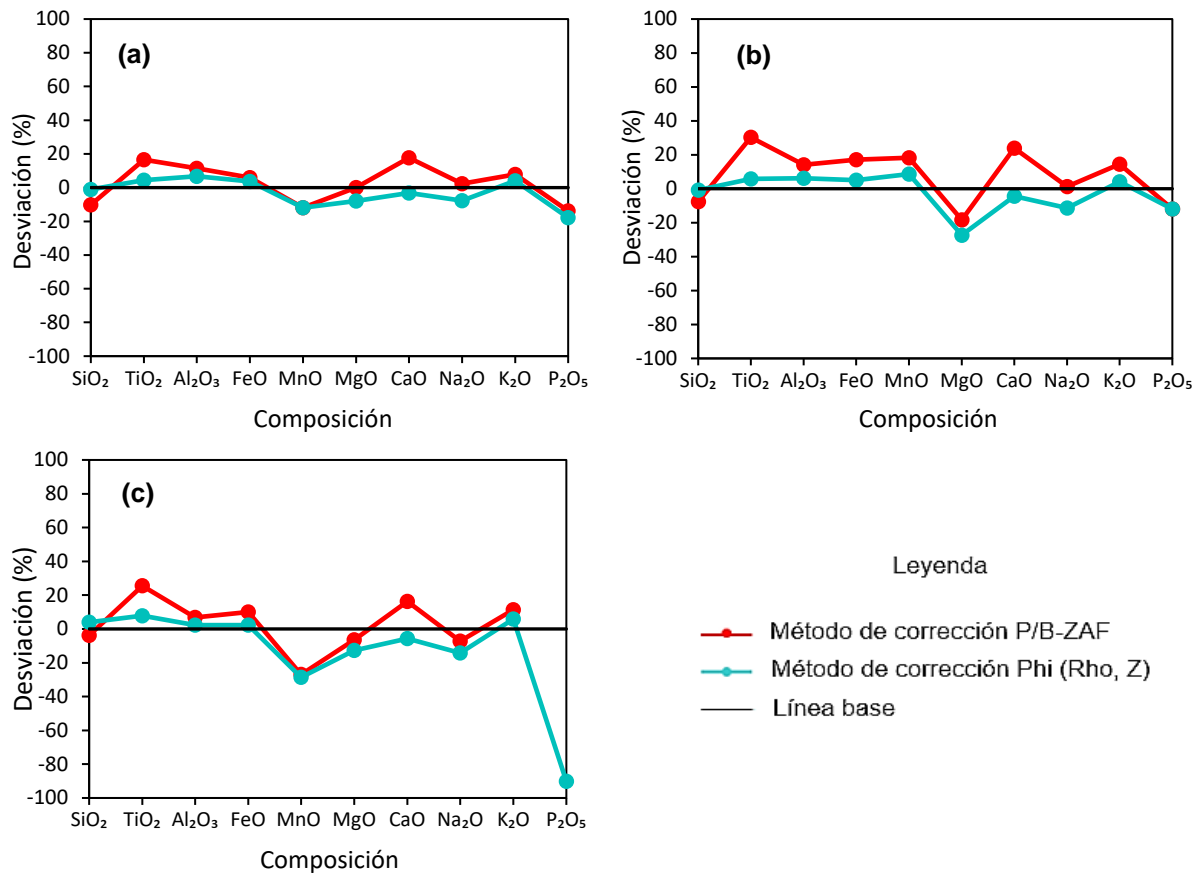


Figura 6. Desviación porcentual de la composición química obtenida por SEM respecto a los valores EPMA para los vidrios experimentales de referencia (a) PF21, (b) ABP-F y (c) PVRG-25

Para el vidrio experimental PF21 ambos modelos de corrección evidencian desviaciones relativamente bajas para todos los óxidos analizados, lo que sugiere buena concordancia con los valores EPMA. No obstante, el modelo Phi (Rho, Z) muestra un mejor ajuste general, con errores inferiores al 7% en elementos mayoritarios como el SiO₂ (-1.04%), Al₂O₃ (+6.73%), FeO (+3.73%) y CaO (-3.24%), mientras que P/B-ZAF subestima significativamente el contenido de silicio (-10.22%) y sobreestima el titanio (+16.55%) y calcio (+17.69%), pero ofrece un mejor desempeño en la cuantificación de MgO y Na₂O, con errores bajos del +0.05% y +2.33%, respectivamente, lo que indica un ajuste más preciso para estos óxidos en particular.

En la muestra ABP-F el modelo Phi (Rho, Z) nuevamente muestra un desempeño más estable en la cuantificación de los elementos mayoritarios con errores del -0.78% para SiO₂, +6.24% para Al₂O₃, +5.09% para FeO y -4.46% para CaO, todos dentro de márgenes aceptables. En contraste, P/B-ZAF tiende a sobreestimar varios elementos, particularmente TiO₂ (+30.28%)

y CaO (+23.97%). En cuanto al MgO, ambos modelos presentan errores relativamente altos, con -27.31 % para Phi (Rho, Z) y -18.36 % para P/B-ZAF; sin embargo, este último ofrece un mejor ajuste. Esta discrepancia podría estar asociada a la baja concentración de MgO en esta muestra, lo que dificulta su cuantificación precisa mediante EDS y hace que los modelos de corrección respondan de forma más sensible a pequeñas variaciones en la señal medida.

El vidrio experimental PVRG-25 refleja un comportamiento consistente con lo observado en los demás materiales de referencia, mostrando desviaciones similares para la mayoría de óxidos. No obstante, destaca el caso particular del P_2O_5 , que únicamente fue cuantificado mediante Phi (Rho, Z), pero con un error del -90.18%. Este resultado refuerza la necesidad de interpretar con cautela los datos de elementos presentes en concentraciones bajas, ya que las señales generadas por estos pueden ser débiles o poco definidas en los sistemas EDS, lo que limita su análisis.

En síntesis, el modelo Phi (Rho, Z) proporciona errores sistemáticamente más bajos para los óxidos SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO, MnO, CaO y K_2O con desviaciones menores al 10%, lo que se traduce en menor dispersión respecto al valor de referencia obtenidos por microsonda electrónica. No ocurre lo mismo para el MgO y Na_2O , ya que el modelo P/B-ZAF presenta un mejor ajuste. Ahora, bajo estas condiciones y considerando los niveles de error obtenidos, se considera que la metodología empleada, resulta lo suficientemente adecuada para ser aplicada en el análisis de las muestras de la erupción de Tajogaite (2021).

5.2. Aplicación del método de cuantificación por SEM en muestras de vidrio volcánico de la erupción de Tajogaite (2021)

A partir de los resultados obtenidos con los materiales experimentales de referencia, se procedió a aplicar el método de cuantificación por SEM en piroclastos emitidos durante distintas etapas de la erupción, siguiendo las mismas condiciones analíticas previamente establecidas. En esta etapa se analizaron entre 4 y 8 áreas de $5 \times 5 \mu m$ por muestra con el propósito adicional de evaluar si un número reducido de mediciones resulta suficiente para obtener resultados representativos, o si es necesario aumentar la cantidad de análisis para mejorar la fiabilidad de la caracterización. Estos análisis se situaron a la menor distancia posible de puntos ya analizados por microsonda, pero sin superponerse directamente, de manera que en la mayoría de los casos es posible establecer una correspondencia entre los resultados por EDS y el de EPMA. La figura 7, ilustra la disposición del área de análisis en imágenes BSE obtenidas por SEM. En detalle, la figura 7.a muestra una vista general de la muestra CV21P-B1, donde se identifican los componentes petrográficos y se destaca la zona

de vidrio de interés. La figura 7.b corresponde a un acercamiento de esa área, mostrando el sitio de análisis por EDS y su comparación con el punto analizado por EPMA.

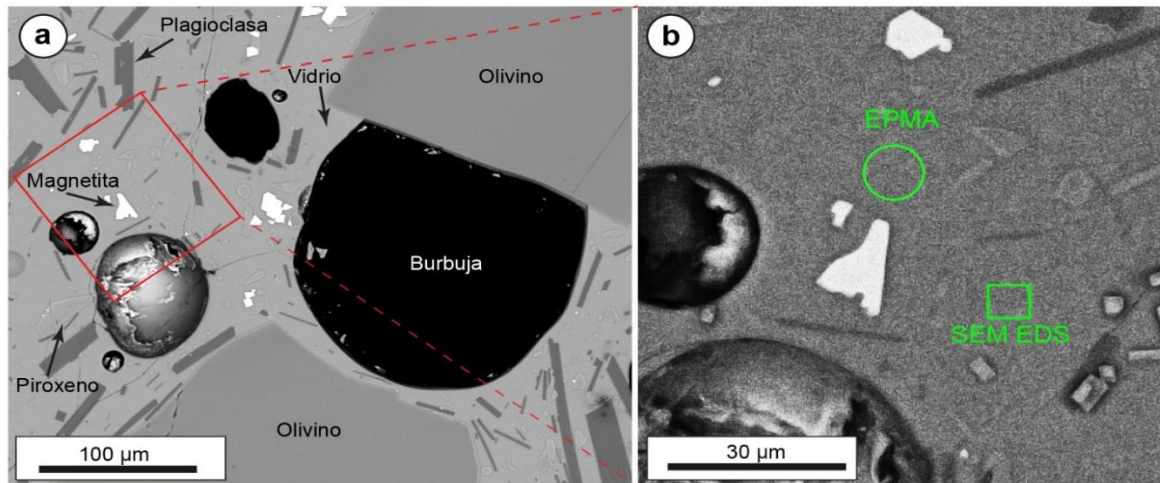


Figura 7. Imágenes de electrones retro dispersados (BSE) de la muestra CV21P-B1 mostrando (a) su textura y componentes, y (b) disposición de las áreas de análisis por EPMA (haz de 10 μm) y SEM (área de 5x5 μm) en la muestra.

Por lo tanto, en la tabla 3 se presenta la composición química media con sus respectivas desviaciones estándar de tres muestras piroclásticas de composición basanítica a tefrita (PAR 2309, CV21P-B1, TQ41-G y CV21P-B1) y de los dominios basaníticos de dos muestras xenopómez (118677 y TQ41-G), aplicando tanto el modelo de corrección P/B-ZAF como el Phi (Rho, Z). Además, se incluye la cuantificación de las dos muestras diferenciadas como Xenopómez; en particular la muestra 118677 contiene tanto matriz basanítica como xenopómez blanca (de composición riolítica), mientras que TQ41-G incluye una zona de xenopómez gris (de composición fonolítica) y el material basanítico. Por este motivo, en la tabla 3 las composiciones diferenciadas se distinguen mediante etiquetas entre paréntesis que indican su naturaleza (118677 blanca y TQ41-G gris).

De acuerdo con los resultados de la tabla 3, ambos modelos de corrección permiten obtener composiciones químicas coherentes con la naturaleza basanítica de las muestras PAR 2309, 118677, CV21P-B1, TQ41-G y CV21P-A1, mostrando contenidos mayoritarios de SiO_2 , Al_2O_3 , FeO y CaO , así como concentraciones menores de TiO_2 , MgO , Na_2O y K_2O . Elementos presentes en proporciones aún más bajas, como MnO , P_2O_5 y Cl , también fueron cuantificados con éxito, lo que demuestra la capacidad del procedimiento para detectar componentes en niveles traza. En general, las desviaciones estándar asociadas a los análisis son pequeñas con valores que oscilan entre ± 0.01 y ± 0.74 , evidenciando una buena precisión analítica para todos los elementos. Cabe señalar que las composiciones diferenciadas de las muestras 118677 (blanca) y TQ41-G (gris), relacionadas a fragmentos de restingolitas, no se abordan en este momento y serán analizadas por separado más adelante.

Tabla 3. Composición química obtenida por SEM para las muestras piroclásticas y xenopómez, aplicando los métodos P/B-ZAF y Phi (Rho, Z).

| Método: P/B - ZAF | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------|
| Muestra | SiO₂ | TiO₂ | Al₂O₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na₂O | K₂O | P₂O₅ | Cl |
| PAR 2309 | 44.36 ±0.74 | 3.81 ±0.12 | 18.40 ±0.24 | 10.66 ±0.59 | 0.23 ±0.02 | 3.63 ±0.16 | 9.43 ±0.39 | 5.06 ±0.66 | 3.24 ±0.26 | 1.07 ±0.07 | 0.11 ±0.02 |
| 118677 | 41.78 ±0.31 | 4.76 ±0.23 | 17.15 ±0.19 | 12.16 ±0.36 | 0.19 ±0.02 | 4.19 ±0.14 | 11.24 ±0.55 | 5.08 ±0.34 | 2.34 ±0.09 | 1.04 ±0.05 | 0.10 ±0.02 |
| 118677 (Blanca) | 72.56 ±0.90 | 0.25 ±0.12 | 16.21 ±0.55 | 1.05 ±0.32 | - | 0.10 ±0.07 | 0.45 ±0.08 | 5.00 ±0.62 | 4.16 ±0.47 | - | 0.03 ±0.01 |
| CV21P-B1 | 42.03 ±0.47 | 4.61 ±0.06 | 17.21 ±0.20 | 12.13 ±0.26 | 0.21 ±0.03 | 3.89 ±0.09 | 10.70 ±0.21 | 5.47 ±0.11 | 2.73 ±0.03 | 0.94 ±0.01 | 0.11 ±0.01 |
| TQ41-G | 41.45 ±0.60 | 4.69 ±0.24 | 16.72 ±0.21 | 13.00 ±0.34 | 0.19 ±0.01 | 4.03 ±0.03 | 11.54 ±0.39 | 4.94 ±0.29 | 2.51 ±0.06 | 0.87 ±0.04 | 0.08 ±0.02 |
| TQ41-G (Gris) | 53.80 ±4.76 | 1.21 ±1.50 | 23.27 ±2.37 | 4.20 ±3.67 | 0.20 ±0.16 | 1.21 ±1.12 | 3.47 ±1.44 | 6.75 ±0.95 | 5.72 ±0.59 | 0.33 ±0.25 | 0.05 ±0.01 |
| CV21P-A1 | 41.85 ±1.46 | 4.75 ±0.31 | 17.31 ±0.61 | 12.91 ±0.40 | 0.18 ±0.02 | 4,17 ±0,23 | 11,71 ±0,57 | 4.84 ±0.23 | 2.74 ±0.23 | 1.04 ±0.05 | 0.09 ±0.02 |
| Método: Phi (Rho, Z) | | | | | | | | | | | |
| PAR 2309 | 49.53 ±0.43 | 3.30 ±0.05 | 17.74 ±0.18 | 9.70 ±0.54 | 0.21 ±0.02 | 3.34 ±0.09 | 7.47 ±0.23 | 4.58 ±0.51 | 3.03 ±0.14 | 1.02 ±0.05 | 0.10 ±0.01 |
| 118677 | 46.95 ±0.23 | 4.04 ±0.02 | 16.61 ±0.15 | 11.38 ±0.29 | 0.18 ±0.02 | 3.87 ±0.13 | 9.13 ±0.35 | 4.51 ±0.30 | 2.23 ±0.08 | 1.03 ±0.05 | 0.09 ±0.01 |
| 118677 (Blanca) | 74.99 ±0.84 | 0.22 ±0.08 | 14.98 ±0.66 | 0.98 ±0.32 | - | 0.12 ±0.07 | 0.35 ±0.06 | 4.35 ±0.54 | 4.01 ±0.09 | - | 0.03 ±0.01 |
| CV21P-B1 | 47.00 ±0.09 | 3.88 ±0.05 | 16.71 ±0.08 | 11.36 ±0.19 | 0.20 ±0.02 | 3.63 ±0.04 | 8.69 ±0.08 | 4.98 ±0.05 | 2.57 ±0.02 | 0.91 ±0.01 | 0.10 ±0.01 |
| TQ41-G | 46.55 ±0.20 | 4.10 ±0.05 | 16.26 ±0,11 | 12.17 ±0.08 | 0.19 ±0.01 | 3.75 ±0.03 | 9.21 ±0.15 | 4.49 ±0.22 | 2.28 ±0.16 | 0.85 ±0.02 | 0.07 ±0.01 |
| TQ41-G (Gris) | 57.76 ±3.86 | 0.98 ±1.20 | 21.91 ±1.87 | 3.84 ±3.20 | 0.19 ±0.13 | 1.11 ±1.04 | 2.70 ±0.99 | 6.07 ±0.76 | 5.26 ±0.73 | 0.31 ±0.24 | 0.04 ±0.01 |
| CV21P-A1 | 46.91 ±1.12 | 4.11 ±0.10 | 16.65 ±0.36 | 12.33 ±0.50 | 0.18 ±0.02 | 3,80 ±0,11 | 9.40 ±0.34 | 4.35 ±0.03 | 2.59 ±0.16 | 1.02 ±0.04 | 0.08 ±0.01 |

Para evaluar la exactitud de los resultados obtenidos, en la tabla 4 se presentan los valores de referencia por microsonda electrónica reportados por González- García et al. (2023) para cada una de las muestras. Esta comparación permite identificar cuál de los dos métodos de cuantificación se ajusta en mejor medida a dichas composiciones de referencia.

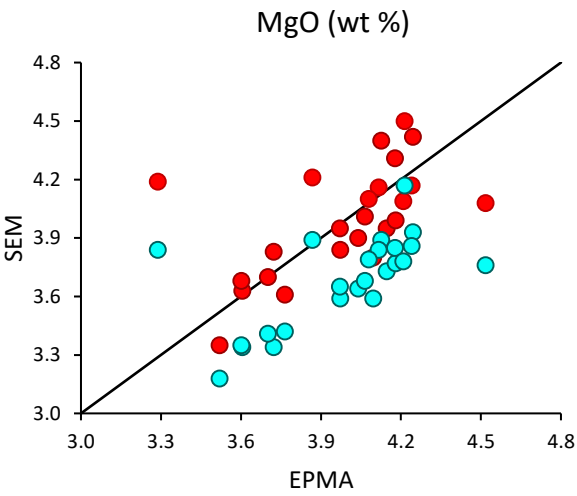
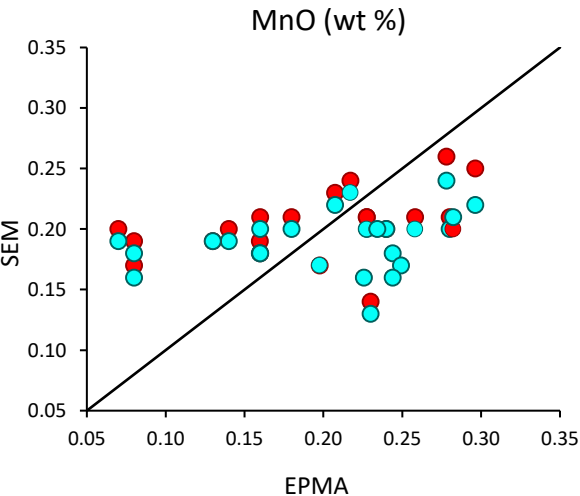
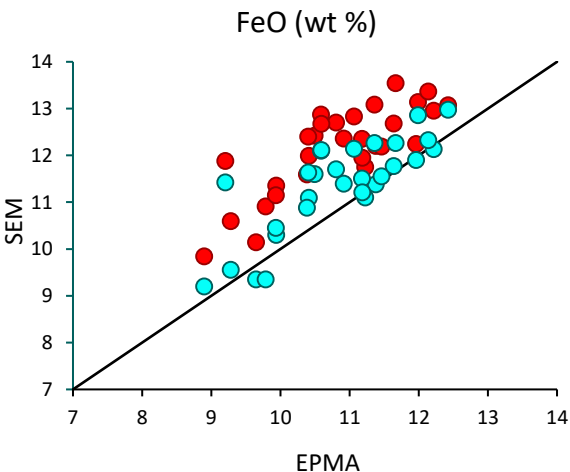
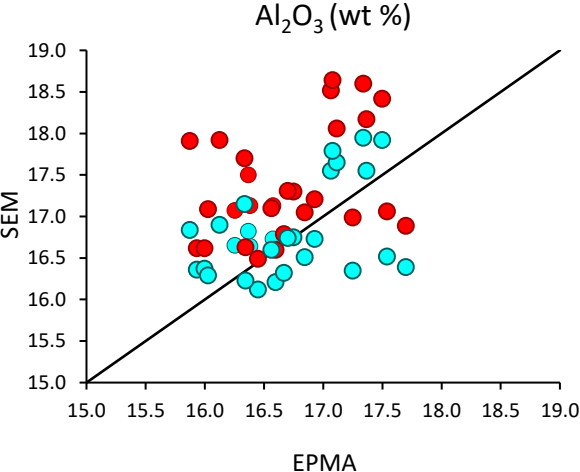
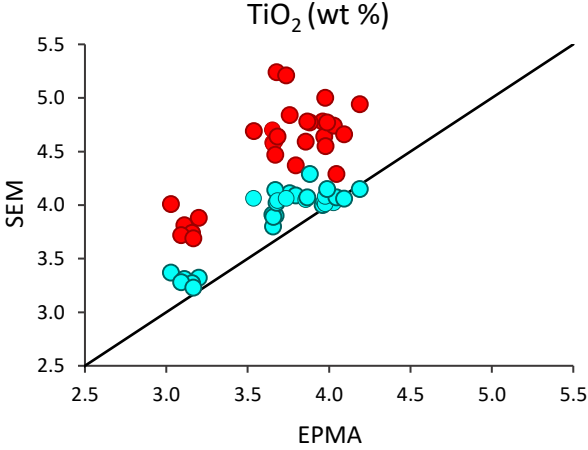
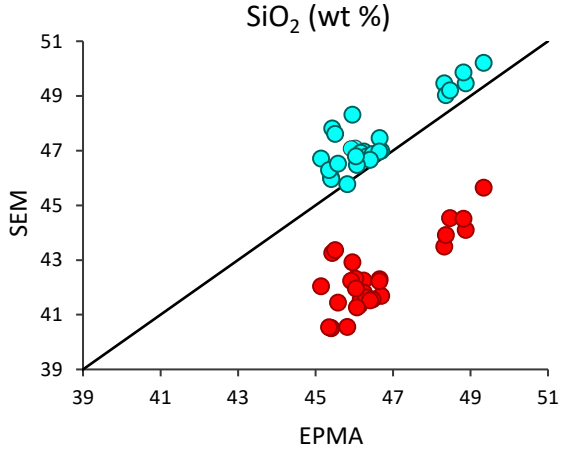
Tabla 4. Composición química de referencia por EPMA para las muestras piroclásticas y xenopómez de la erupción de La Palma (2021).

| Muestra | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Cl |
|----------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|------------------|-------------------------------|---------------|
| PAR 2309 | 48.70 ±0.39 | 3.13 ±0.06 | 17.24 ±0.18 | 9.58 ±0.41 | 0.25 ±0.03 | 3.65 ±0.16 | 7.73 ±0.31 | 5.31 ±0.14 | 2.96 ±0.17 | 1.38 ±0.05 | 0.07 ±0.00 |
| 118677 | 46.45 ±0.20 | 3.85 ±0.18 | 17.13 ±0.84 | 10.51 ±0.63 | 0.15 ±0.05 | 4.07 ±0.36 | 9.98 ±0.38 | 4.62 ±0.30 | 2.14 ±0.17 | 1.08 ±0.12 | 0.06 ±0.04 |
| 118677 (Blanca) | 72.32 ±2.97 | 0.23 ±0.12 | 17.20 ±3.14 | 0.78 ±0.35 | 0.03 ±0.02 | 0.09 ±0.03 | 0.59 ±0.38 | 5.11 ±1.21 | 3.67 ±0.55 | 0.04 ±0.06 | 2.47 ±5.44 |
| CV21P- B1 | 46.08 ±0.14 | 3.66 ±0.01 | 16.40 ±0.13 | 11.25 ±0.24 | 0.23 ±0.03 | 4.04 ±0.05 | 9.22 ±0.09 | 5.32 ±0.08 | 2.54 ±0.04 | 1.23 ±0.03 | 0.04 ±0.00 |
| TQ41-G | 45.64 ±0.41 | 4.04 ±0.12 | 16.87 ±0.58 | 11.06 ±0.47 | 0.09 ±0.07 | 4.05 ±0.14 | 9.90 ±0.28 | 5.00 ±0.23 | 2.16 ±0.07 | 1.13 ±0.09 | 0.07 ±0.07 |
| TQ41-G (Gris) | 53.19 ±1.28 | 1.99 ±0.37 | 20.40 ±1.11 | 6.32 ±1.75 | 0.05 ±0.08 | 2.28 ±0.57 | 5.52 ±1.29 | 5.99 ±0.28 | 3.86 ±0.36 | 0.51 ±0.18 | 0.09 ±0.02 |
| CV21P- A1 | 45.59 ±0.24 | 3.79 ±0.11 | 16.05 ±0.16 | 12.06 ±0.27 | 0.25 ±0.02 | 4,14 ±0,09 | 9,38 ±0,28 | 4.72 ±0.30 | 2.57 ±0.12 | 1.40 ±0.08 | 0.05 ±0.01 |

Ahora bien, con el propósito de comparar el desempeño de P/B-ZAF y Phi (Rho, Z) en la cuantificación de los elementos considerados en este estudio, y aplicados a muestras procedentes de un contexto eruptivo activo como el de las Islas Canarias, se elaboraron los diagramas de dispersión que se incluyen en la figura 8. En ellos se contrastan directamente las concentraciones obtenidas mediante los dos modelos de corrección en el SEM con los valores de microsonda electrónica (EPMA), donde cada símbolo representa una medición individual realizada sobre las muestras basaníticas. La línea diagonal negra indica la relación 1:1, es decir, el punto donde ambos métodos coinciden exactamente con los datos de referencia; la proximidad de los puntos a esta línea permite evaluar visualmente el grado de concordancia entre estos.

En los gráficos que se exponen en la figura 8 se observa una concordancia notable entre las concentraciones obtenidas mediante los métodos SEM (P/B-ZAF y Phi (Rho, Z)) y los valores de referencia proporcionados por microsonda electrónica (EPMA). En general, los datos muestran una marcada tendencia a alinearse con la línea 1:1, lo cual indica un buen nivel de precisión y exactitud en la cuantificación de los óxidos. Este comportamiento es consistente en los óxidos de SiO₂, TiO₂, FeO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O y en menor medida en Al₂O₃. En el caso específico del Na₂O, se identifican tres valores atípicos de la muestra CV21P-A1 que se desvían significativamente del patrón general observado. Dado que el sodio es un elemento de bajo número atómico y alta sensibilidad a las condiciones analíticas, es posible que esta

discrepancia se deba a efectos puntuales asociados a la naturaleza del sodio y no un problema general del método o una anomalía en toda la muestra. Por este motivo, los puntos fueron excluidos del cálculo de la media, ya que no representan el comportamiento observado en el resto de las mediciones. Se recomienda repetir la cuantificación de Na_2O en esta muestra para confirmar la consistencia de los datos y descartar efectos locales.



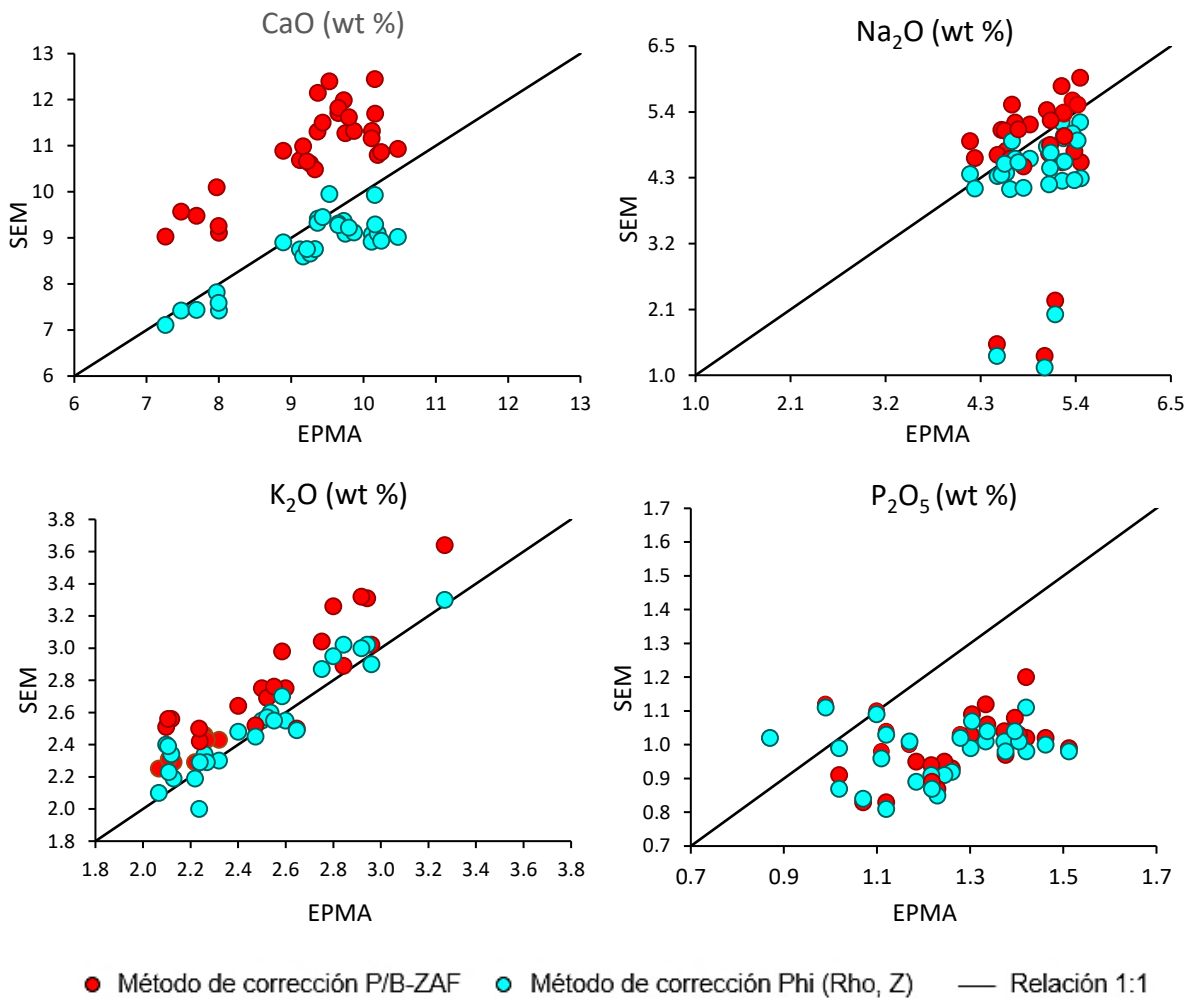


Figura 8. Correlación entre los resultados obtenidos por SEM y los valores de referencia EPMA para el total de óxidos analizados en las muestras basaníticas

Los óxidos MnO y P₂O₅ reflejan una dispersión más elevada respecto a la línea 1:1 en comparación con el resto de los elementos analizados. Este comportamiento puede atribuirse, en buena medida, a sus bajas concentraciones en las muestras, lo cual incrementa la incertidumbre asociada a su cuantificación por SEM. En ambos modelos de corrección, la dispersión no se asocia a un comportamiento evidente de sobreestimación o subestimación, sino que parece mostrar limitaciones asociadas al análisis de elementos en concentraciones bajas, próximas al límite de detección del método EDS. Cabe señalar que, en algunos casos, los resultados de P/B-ZAF y Phi (Rho, Z) coinciden numéricamente, lo que genera una superposición visual de puntos en los gráficos que pueden alterar la percepción sobre la dispersión de los mismos.

Ahora bien, al comparar el comportamiento de los dos modelos de corrección, se aprecia que Phi (Rho, Z) presenta mayor capacidad para cuantificar con exactitud los óxidos de SiO₂, TiO₂, FeO, CaO y K₂O, con mediciones que se agrupan estrechamente a la línea 1:1. En contraste,

el modelo P/B-ZAF muestra un mejor desempeño en la cuantificación de MgO, con valores más cercanos a los obtenidos por EPMA. Para Al_2O_3 y Na_2O , ambos métodos ofrecen resultados similares, sin que se evidencien diferencias sistemáticas en la dispersión de los datos, ni una tendencia definida. Estas observaciones permiten identificar patrones diferenciales en el comportamiento de cada elemento en función del modelo aplicado y, por tanto, ponen de manifiesto la importancia de considerar las limitaciones y fortalezas de estos al realizar e interpretar resultados analíticos por SEM.

Para complementar la caracterización geoquímica de las muestras piroclásticas, se construyó un diagrama TAS (Total Alkali vs. Silica) (Le Maitre et al., (2002) en el cual se representa el contenido de SiO_2 frente a la suma de álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), calculados para los 37 análisis de piroclastos de La Palma considerados en esta investigación, y los datos por microsonda electrónica obtenidos por González-García et al. (2023) y Longpré et al. (2025). Esta representación gráfica permite ubicar las concentraciones dentro del sistema de clasificación IUGS para rocas volcánicas como se observa en la figura 9.

Entre los campos de traquibasalto y basalto se observan tres puntos azules que corresponden a los análisis de Na_2O de la muestra CV21P-A1 previamente identificados como valores atípicos. Como se detalló anteriormente, estos valores fueron excluidos del cálculo de las medias por su desviación significativa respecto al resto de mediciones y probablemente responden a efectos de volatilización del sodio. Por otra parte, las señales localizadas en el área de las riolitas corresponden a la xenopómez blanca, cuya alta concentración en SiO_2 y baja en otros elementos, la posicionan como un material altamente diferenciado y exógeno. Esta interpretación concuerda con Pérez-Torrado et al. (2012), quienes concluyeron que el borde externo negro estaría formado a partir de un magma basanítico, mientras que el interior blanco correspondería a una riolita alcalina, con evidencias texturales de mezcla entre ambos. Los puntos ubicados entre fonolita y fonotefrita se asocian a la xenopómez gris y presentan alta dispersión, lo que resulta coherente con la elevada heterogeneidad composicional característica de este tipo de fragmentos, descrita con mayor detalle en la sección 5.2.1. La mayoría de muestras restantes se ubican en el campo correspondiente a las basanitas, confirmando su clasificación petrográfica previa.

El cálculo mediante Phi (Rho, Z) muestra mayor concordancia con los valores de referencia por EPMA, ajustándose mejor a las concentraciones reales de SiO_2 , Na_2O y K_2O de las muestras estudiadas de vidrio volcánico en piroclastos de la erupción de La Palma (2021). En contraste, el método P/B-ZAF tiende a subestimar las concentraciones de SiO_2 y sobreestimar la suma de álcalis lo que desplaza los puntos hacia campos más alcalinos como el de las foiditas dentro del diagrama TAS.

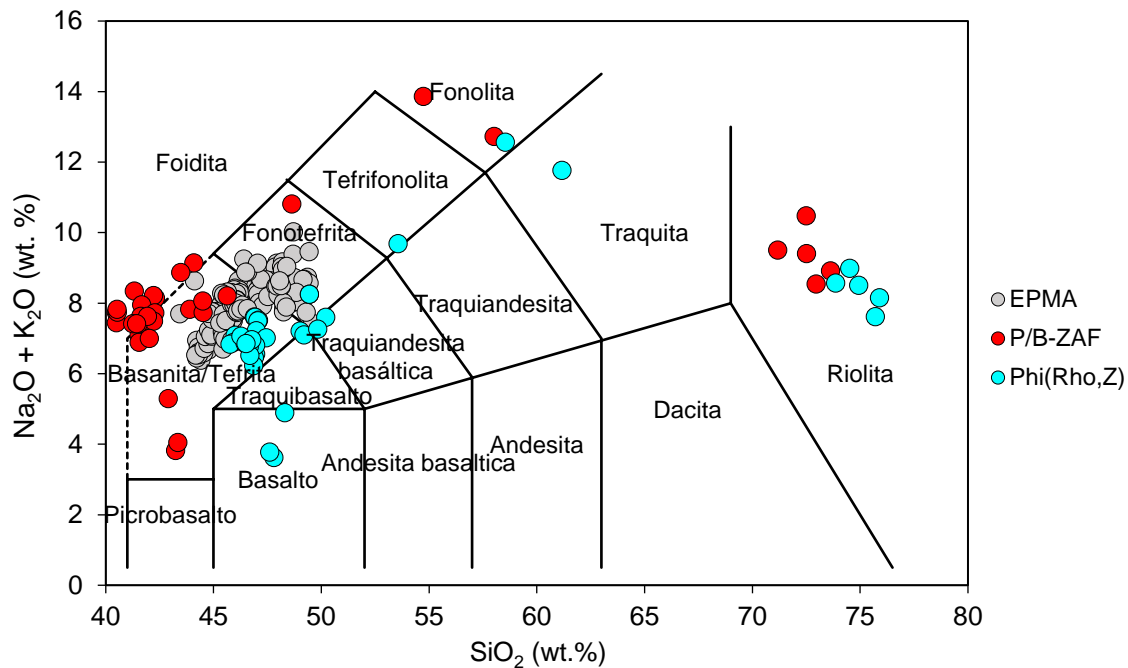


Figura 9. Clasificación geoquímica de piroclastos de La Palma mediante diagrama TAS (Le Maitre et al., 2002). Los datos de EPMA provienen de González-García et al. (2023) y Longpré et al. (2025).

5.2.1. Análisis de resultados de las restingolitas (*Xenopómez blanca y gris*)

Dada la naturaleza compleja y heterogénea de las xenopómez (conocidas informalmente como “restingolitas”), estas se analizaron por separado de las basaníticas, considerándolas como el tipo de muestra que representa, hasta ahora, las composiciones límite o más extremas que pueden presentarse durante una erupción volcánica en las Canarias (p.ej. Meletlidis et al., 2012; Troll et al., 2012). Esta complejidad se traduce en desviaciones más altas en las concentraciones elementales cuantificadas, mayor inexactitud respecto a los valores de referencia y menor precisión entre medidas de una misma muestra con σ que varían entre ± 0.01 y ± 4.76 . Aunque se procuró replicar el mismo punto de análisis de la EPMA, las variaciones composicionales y la dificultad de posicionarse exactamente sobre la misma zona generaron diferencias significativas en los resultados obtenidos por SEM, especialmente en la xenopómez gris. En la figura 10 se muestran imágenes de las muestras 118677 (blanca) y TQ41-G (gris) capturadas por microsonda electrónica y SEM, en las que se evidencian marcados contrastes en escalas de grises que reflejan su complejidad composicional y ayudan a visualizar su heterogeneidad a microescala.

Al comparar la composición química de las restingolitas con las basanitas (tabla 3), se aprecia un enriquecimiento notable en SiO_2 , especialmente en la xenopómez blanca, donde las concentraciones alcanzan hasta un 74.9%. El TiO_2 disminuye en ambas restingolitas, mientras que el Al_2O_3 se incrementa únicamente en la muestra gris. Los contenidos de FeO y MgO presentan una reducción generalizada, cuya tendencia también se observa en el CaO , con una caída más notoria en la xenopómez blanca. En el caso de Na_2O , los valores se mantienen

relativamente estables, con ligeros aumentos que no superan el margen de variación típica. Por su parte, el K_2O experimenta un aumento en ambas restingolitas, siendo más evidente en la muestra gris. Por último, el MnO no se cuantificó en la muestra blanca y P_2O_5 se mantiene en bajas proporciones, comparables con las muestras basáníticas.

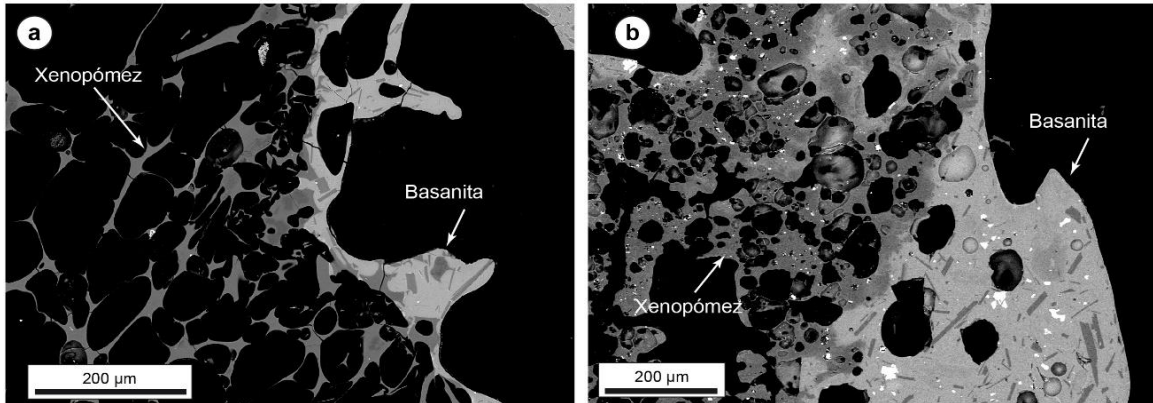


Figura 10. Micrografías de electrones retrodispersados (BSE) de (a) Xenopomez blanca (118677) y (b) xenopomez gris (TQ41-G) obtenidas por EPMA

Ahora bien, para ilustrar las discrepancias entre los valores obtenidos por SEM y los de referencia obtenidos mediante EPMA para las restingolitas, se construyeron gráficas de correlación (ver figura 11) para las concentraciones de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO y Na_2O . En ellas se incluyen los datos generados con ambos modelos de correlación y se construyeron de forma análoga a los resultados mostrados en la figura 8.

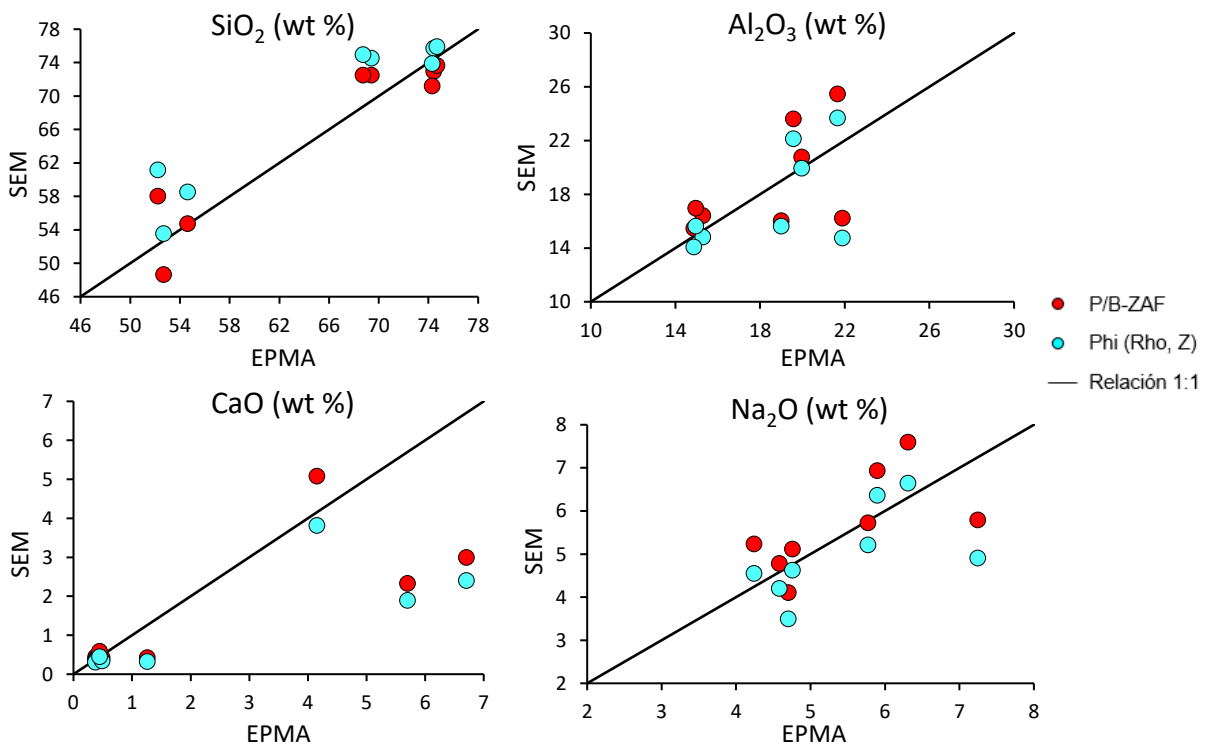
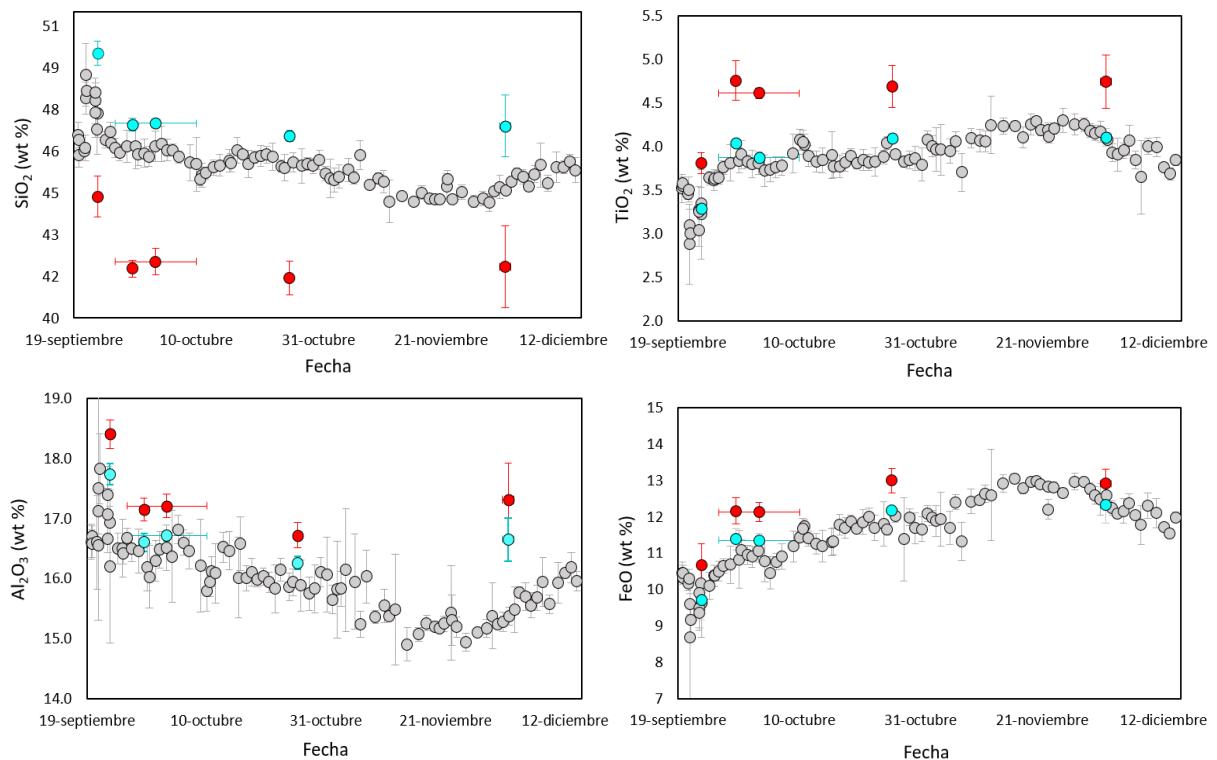


Figura 11. Correlación entre los resultados obtenidos por SEM y los valores de referencia EPMA para el SiO_2 , Al_2O_3 , CaO y Na_2O analizados en las restingolitas

Como se observa en la figura 11 los datos presentan una dispersión significativa en todos los óxidos analizados, principalmente en la muestra más heterogénea (TQ41-G) reflejando las dificultades para obtener resultados consistentes entre SEM y EPMA. Este comportamiento como se describió anteriormente, es esperable en materiales con alta heterogeneidad composicional, donde pequeñas desviaciones en el posicionamiento del punto de análisis puede generar diferencias notables respecto al valor correspondiente por microsonda (EPMA), acentuadas además por los efectos de matriz y la sensibilidad de cada modelo de corrección.

5.2.2. Evolución temporal de la composición del vidrio volcánico en la erupción de Tajogaite (2021): Comparación entre datos obtenidos por SEM y EPMA

La caracterización temporal del vidrio volcánico ofrece una herramienta importante para interpretar la evolución del sistema magmático durante una erupción. Por ello, en este apartado se comparan las composiciones de los óxidos analizados en este estudio mediante SEM, aplicando ambos métodos de corrección (P/B-ZAF y Phi (Rho, Z)) con la serie temporal obtenida por Longpré et al. (2025) usando EPMA, como se ilustra en la figura 12. Cada óxido fue examinado individualmente con el propósito de evaluar la calidad de los datos obtenidos por SEM, valorar la capacidad de cada modelo de cuantificación para reflejar con exactitud los cambios composicionales a lo largo del tiempo y detectar similitudes o discrepancias en las tendencias observadas.



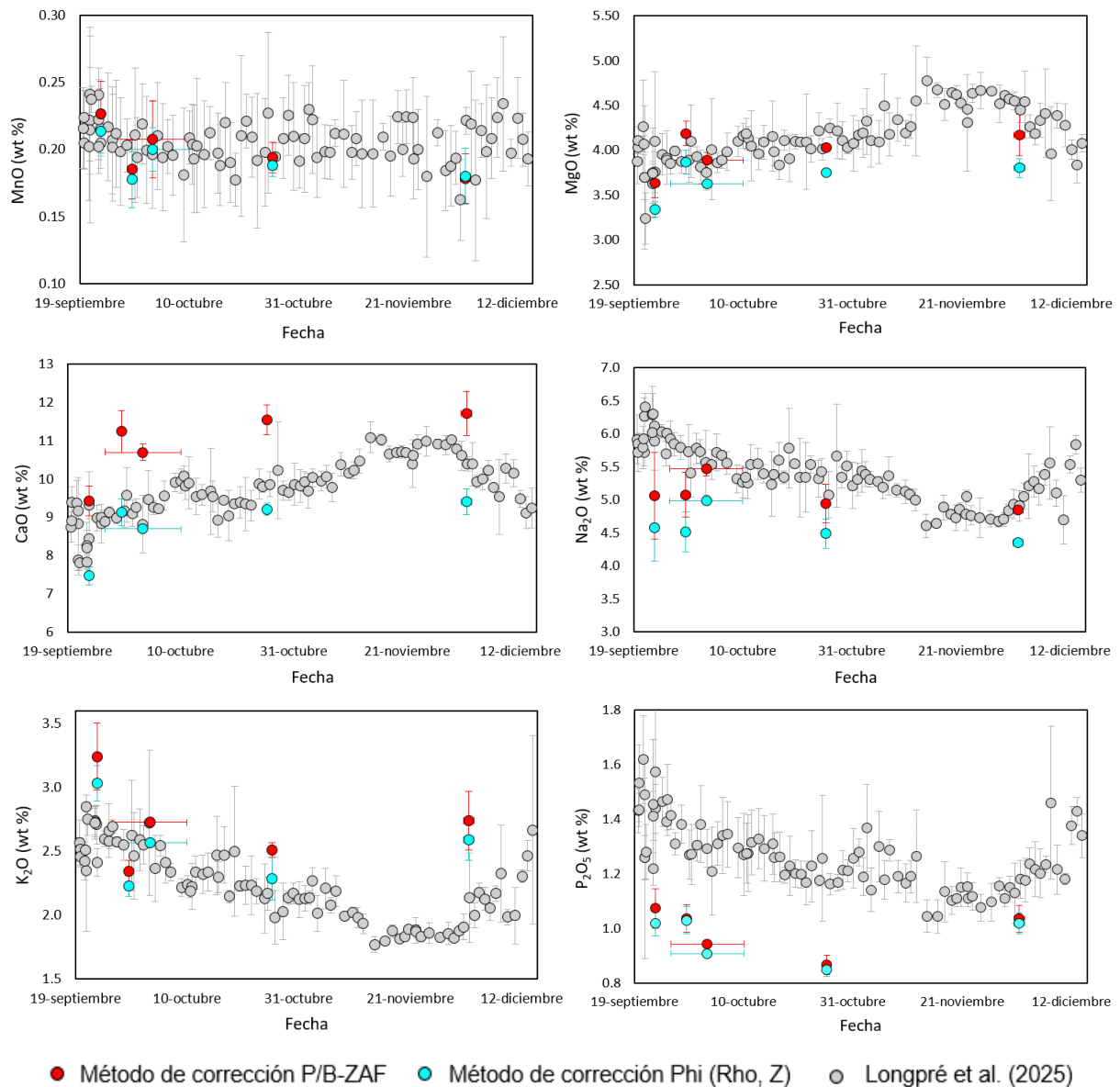


Figura 12. Evolución temporal de la composición del vidrio volcánico en la erupción de Tajogaite (2021)

Las concentraciones de sílice determinadas mediante SEM muestran valores ligeramente más altos con Phi (Rho, Z) y más bajos con P/B-ZAF en comparación con los datos obtenidos por Longpré et al. (2025). A pesar de esta diferencia, ambos modelos reproducen las principales transiciones composicionales descritas por dichos autores: un incremento abrupto en la concentración de SiO_2 el 21 de septiembre, una disminución progresiva desde esa fecha hasta el 29 de noviembre y un punto de inflexión el 30 de noviembre, sucedida de un nuevo aumento hasta el final de la erupción. Los óxidos máficos TiO_2 , CaO , FeO y MgO presentan una evolución temporal coherente entre sí y opuesta a la observada en la sílice. Todos ellos muestran una caída inicial hasta el 21 de septiembre, seguida por un aumento sostenido hasta el 29 de noviembre y un descenso a partir del 30 de noviembre. Este comportamiento ha sido interpretado por Longpré et al. (2025) como una transición desde un magma inicialmente más

evolucionado hacia composiciones más primitivas durante la fase intermedia de la erupción, y finalmente hacia magmas nuevamente evolucionados en su etapa final. Esta secuencia también se refleja en los resultados obtenidos por SEM, donde ambos métodos de cuantificación logran captar las tendencias generales. No obstante, el modelo Phi (Rho, Z) presenta una mayor concordancia con los datos de EPMA, especialmente para el TiO_2 , mientras que P/B-ZAF se ajusta mejor para el MgO .

Tanto el Na_2O como el K_2O presentan una tendencia general decreciente hasta finales de noviembre, seguida de un ligero aumento. Este comportamiento inverso al de los óxidos máficos ya mencionados, también fue reportado por Longpré et al. (2025) y puede estar relacionado con la evolución hacia magmas más básicos durante la fase intermedia de la erupción. Los resultados obtenidos por SEM reproducen esta tendencia de forma razonable, sin embargo, sus concentraciones presentan desviaciones de baja magnitud respecto a los datos de referencia. Esta dispersión es esperable debido a la menor precisión del SEM para elementos ligeros, como el sodio, y su susceptibilidad a la migración durante el análisis. De manera similar, el P_2O_5 sigue una tendencia decreciente con una mayor dispersión debido a sus bajas concentraciones. Esta variación es capturada por ambos modelos SEM, con mínimas diferencias entre ellos y señales que se solapan.

Las concentraciones de Al_2O_3 presentan variaciones más sutiles a lo largo del tiempo, tanto en los datos obtenidos por SEM como en los reportados por Longpré et al. (2025). Se identifica un leve incremento hacia el 21 de septiembre, seguido por una disminución progresiva hasta finales de noviembre y un ligero aumento después del 30 de noviembre. Ambos modelos de cuantificación logran reproducir adecuadamente esta evolución, aunque el modelo Phi (Rho, Z) muestra una mayor exactitud con los valores de EPMA. En cuanto al MnO , sus concentraciones permanecen prácticamente constantes durante toda la erupción, sin mostrar una tendencia definida de aumento o descenso.

5.2.3. Ratios comúnmente utilizados en monitorización petrológica: $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$

El uso de razones composicionales como $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ es común en estudios de monitorización petrológica, ya que permiten identificar cambios en los procesos magmáticos, incluyendo la evolución del magma, el fraccionamiento o la cristalización de fases específicas (Corsaro y Miraglia, 2022; Marshall et al., 2024). Al estar formados por óxidos con comportamientos geoquímicos contrastantes, estos ratios actúan como indicadores sensibles de la evolución composicional del sistema. Por lo tanto, en esta sección (ver figura 13) se comparan las variaciones temporales de estos cocientes obtenidos a partir de los análisis SEM aplicando los modelos de cuantificación P/B-ZAF y Phi (Rho, Z), frente a los resultados

publicados por Longpré et al. (2025) mediante EPMA, con el fin de evaluar el grado de correspondencia y la capacidad del SEM para capturar correctamente estas señales petrológicas clave.

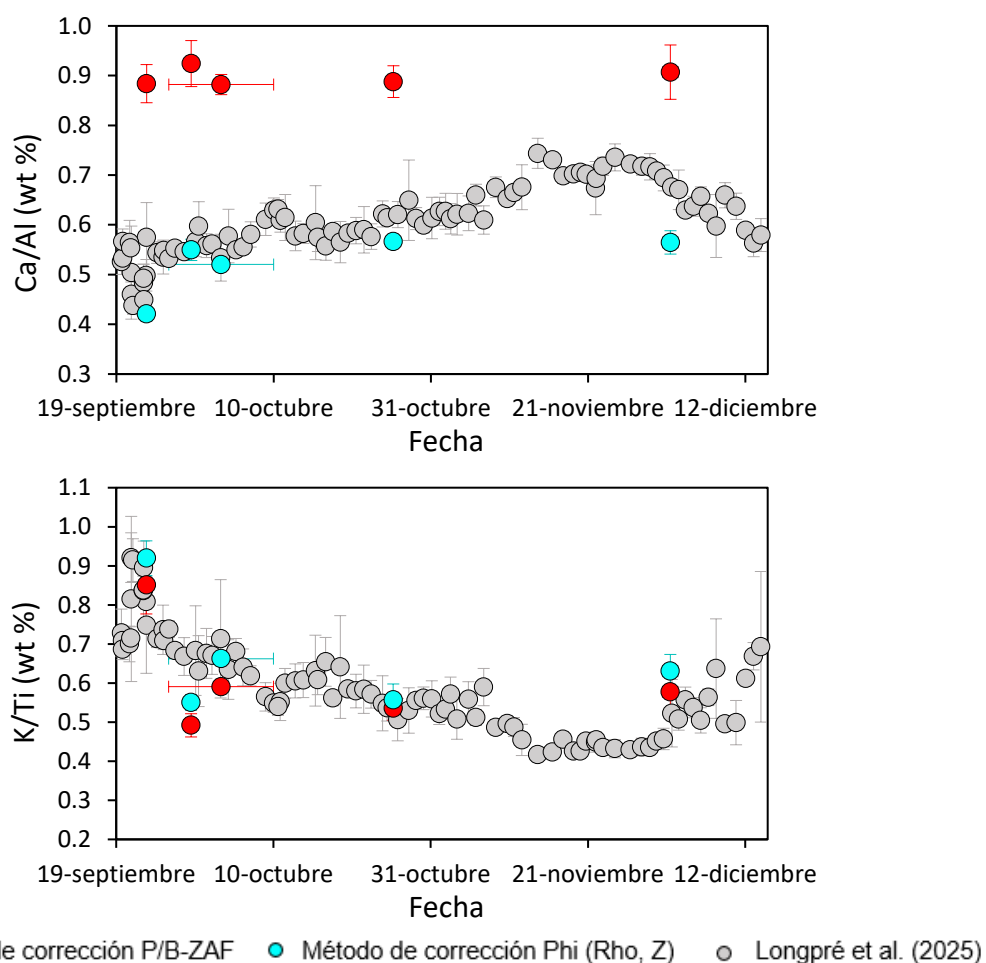


Figura 13. Evolución de los ratios $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$: Comparación entre SEM y EPMA

Los ratios $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ obtenidos mediante SEM reproducen con claridad las principales variaciones temporales descritas por Longpré et al. (2025), mostrando diferencias mínimas en su magnitud. En el caso de $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, se observa una tendencia creciente desde finales de septiembre y alcanza un máximo a mediados de noviembre, seguida de un descenso hacia el final de la erupción. Esta evolución es representada con mayor exactitud por el modelo Phi (Rho, Z), cuyos resultados se aproximan más estrechamente a los valores determinados por EPMA, especialmente durante la fase inicial. Por el contrario, P/B-ZAF tiende a sobreestimar sistemáticamente este cociente a lo largo de todo el período analizado. Por su parte, $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ muestra un descenso marcado entre finales de septiembre y octubre, seguido de una etapa de relativa estabilidad en noviembre y un nuevo aumento en diciembre. Esta evolución se refleja en los datos de SEM, en los cuales Phi (Rho, Z) vuelve a ser el modelo que mejor reproduce la trayectoria general, mientras que P/B-ZAF presenta desviaciones más notables, particularmente entre el 29 de septiembre y el 3 de octubre.

6. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio respaldan el uso del SEM como una herramienta viable para caracterizar la composición química de vidrio volcánico en contextos de emergencia en las Islas Canarias. Aunque no se utilizó una calibración directa con estándares, los análisis realizados bajo condiciones cuidadosamente seleccionadas (voltaje, corriente, tiempo de adquisición y modelos de corrección) permitieron alcanzar valores de exactitud y precisión adecuados, coherentes con los datos de referencia por microsonda electrónica (EPMA). Esta información es especialmente relevante considerando que varios laboratorios del propio archipiélago disponen de equipos SEM-EDX, específicamente en Tenerife y Gran Canaria, lo que ofrece una ventaja logística importante al reducir significativamente los tiempos de transporte durante una erupción. Otra de las principales fortalezas demostradas por esta técnica es su capacidad para generar datos confiables en tiempos operativamente cortos (10 a 11 minutos por análisis en modo automático exhaustivo), sin requerir de procedimientos extensos. Esta característica, sumada a la posibilidad de obtener resultados representativos a partir de pocos puntos de análisis por muestra, refuerzan el valor del SEM como una técnica apropiada para identificar cambios en la composición del magma de forma rápida y eficaz.

En este sentido, el método permitió reproducir la evolución composicional del vidrio volcánico durante el desarrollo temporal de la erupción de Tajogaite (2021). Las variaciones observadas en las concentraciones de los principales óxidos y las relaciones $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{TiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ permitieron identificar los cambios en la dinámica interna del sistema descrita por autores como Longpré et al. (2025) y Carracedo et al. (2022). Según estos estudios, dichas transiciones pueden estar asociadas tanto a procesos de diferenciación magmática relacionados con la cristalización fraccionada y la evolución química del magma en profundidad, como a la incorporación de materiales procedentes del manto o la corteza. Por lo tanto, identificar estos patrones a través de la cuantificación de vidrio volcánico, permite no solo comprender mejor la evolución del sistema, sino también, realizar un monitoreo casi en tiempo real, clave para anticipar cambios eruptivos y apoyar la toma de decisiones en escenarios de emergencia.

Las diferencias observadas en exactitud entre los modelos de cuantificación pueden explicarse por la forma en que cada uno corrige los efectos de absorción y fluorescencia en la muestra. Phi (ρ , Z) mostró un desempeño más consistente para un rango amplio de elementos, tanto en altas como en bajas concentraciones, abarcando diferentes números atómicos. Mientras que P/B-ZAF resultó más adecuado para elementos específicos como Mg y Na. Este comportamiento destaca la importancia de seleccionar el modelo de corrección en

función del elemento y la composición de la muestra. En concordancia con estudios previos (Armstrong, 1988), este hallazgo reafirma que no existe un modelo global óptimo, sino que cada uno tiene fortalezas específicas que deben ser consideradas para optimizar la calidad de los resultados.

El procedimiento establecido, sin uso de estándares de calibración, ha demostrado una precisión y exactitud suficientes para realizar una monitorización petrológica de calidad en un contexto de emergencia volcánica en las Islas Canarias. Sin embargo, una calibración previa con estándares de composición conocida y de uso extendido, puede potencialmente refinar la medida, optimizando el rendimiento del método Phi (Rho, Z) para cuantificar la totalidad de los elementos (Miraglia, 2012; Corsaro y Miraglia, 2022; Fedele et al., 2025), además de reducir los tiempos de cuantificación de los espectros EDS. De esta manera, una calibración previa del SEM con vidrios estándar probablemente contribuiría a mejorar la robustez final de la información suministrada a los organismos encargados de la gestión del riesgo volcánico.

Aunque el método propuesto evidencia ventajas relevantes, también presenta limitaciones relacionadas con la cuantificación de elementos en bajas concentraciones como el Mn y P, cuya detección fue posible gracias al modo automático exhaustivo, pero con valores que muestran mayor dispersión e incertidumbre. Otro aspecto relevante a considerar es la respuesta del método en muestras como las xenopómez. En estas se identificaron cambios esperados en la composición de elementos principales como el silicio, pero se registraron desviaciones relativamente altas. Este comportamiento no deriva de una limitación del equipo, sino de la naturaleza compleja y heterogénea de las mismas, lo cual condiciona su comparación con los valores de referencia obtenidos por microsonda.

Por último, cabe destacar que durante la erupción de Cumbre Vieja (2021), el monitoreo petrológico casi en tiempo real y la caracterización geoquímica de los productos volcánicos se vieron limitados por la necesidad de transportar las muestras a laboratorios fuera del archipiélago, debido a la ausencia de técnicas como la microsonda electrónica en alguna de las islas. En este contexto, implementar un protocolo analítico específico con SEM como el desarrollado en este estudio (sección 6.1), permite aprovechar los recursos disponibles localmente para obtener resultados precisos en tiempos significativamente más cortos. Aunque el uso del SEM ha sido aplicado en otros contextos volcánicos, su validación y optimización local para el caso específico de La Palma y su posible extensión para otros sistemas insulares del archipiélago con características eruptivas similares, representa un avance concreto en términos de preparación y respuesta ante futuras emergencias. Además, el enfoque en vidrio volcánico, en lugar de roca total, mejora la sensibilidad del análisis, ya

que permite obtener una cuantificación más representativa de la composición del magma al evitar interferencias de otras fases o procesos de alteración después de su emisión.

6.1. Protocolo operativo para el análisis composicional de vidrio volcánico

Basándose en los resultados alcanzados y en respuesta a uno de los objetivos de este estudio, se propone un protocolo de actuación para la obtención reproducible de datos composicionales de vidrio volcánico en piroclastos, aplicable a contextos eruptivos en las Islas Canarias, mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (SEM), técnica disponible localmente en Tenerife y Gran Canaria. El propósito es disponer de una herramienta ágil y fiable que permita realizar una monitorización petrológica precisa y caracterizar la evolución composicional del magma en tiempo casi real, como apoyo a la gestión de emergencias volcánicas. Para ello, se propone los siguientes pasos a seguir:

6.1.1. *Recolección, transporte y preparación de las muestras*

El proceso de recolección, transporte y preparación de las muestras constituye una etapa importante para garantizar la calidad y fiabilidad de los análisis cuantitativos. Una metodología adecuada en esta fase permite preservar las características originales del material volcánico, minimizando alteraciones físicas o químicas que puedan afectar los resultados. A continuación, se detallan las recomendaciones para el manejo de piroclastos tipo lapilli, desde su obtención en campo hasta su acondicionamiento para el análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Recolección de material piroclástico

La recolección de piroclastos tipo lapilli y cenizas debe realizarse en zonas proximales y medias que aseguren su representatividad y mínima alteración. Se recomienda priorizar depósitos recientes, recolectando el material sobre superficies planas limpias como lonas o cubetas. Si es posible, realizar el primer muestreo dentro de las 24h siguientes al inicio de la erupción y posteriormente mantener una frecuencia regular, preferiblemente cada pocos días, especialmente si se detectan cambios en el estilo eruptivo como se recomienda en Re et al. (2021).

Registro de información de campo

Para cada muestra recolectada es conveniente registrar información clave como fecha y hora de la recolección, coordenadas geográficas (GPS), condiciones ambientales, fase o estilo eruptivo observado y observaciones de campo.

Transporte y almacenamiento

Las muestras deben almacenarse en bolsas limpias, secas y etiquetadas correctamente. Durante el transporte, se debe evitar variaciones térmicas o de humedad que puedan comprometer su integridad. En caso de recolectar material aún caliente, permitir su enfriamiento al aire antes de ser empaquetado.

Preparación de las muestras

Las muestras pueden prepararse en formato lámina delgada o probeta según disponibilidad y requerimientos. En ambos casos se trabaja con un corte de fragmento manejable, se lija con carburo de silicio de distintas granulometrías hasta obtener una superficie plana y se seca de ser necesario a 60-70°C para eliminar humedad. Luego, se fija sobre un portamuestras con resina termoplástica para el caso de las láminas, o se encapsulan en resina de poliéster para las probetas. Finalmente, se recubren con una fina capa de carbono para asegurar la conductividad durante el análisis por SEM.

6.1.2. Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM)

En esta sección se enlistan las condiciones analíticas recomendadas para la caracterización química de vidrio volcánico por SEM:

- Voltaje: 20kV
- Corriente de haz: 30 μ A
- Área de análisis: Barrido cuadrado de 5 x 5 μ m
- Tiempo de adquisición: Automático modo exhaustivo, o bien el modo de adquisición que permita una cuantificación completa del vidrio volcánico en el SEM utilizado
- Condiciones de análisis en alto vacío
- Analizar al menos cuatro áreas (puntos de medición) por muestra

Para garantizar la exactitud en la cuantificación, es fundamental realizar un tratamiento previo de los espectros, identificando y seleccionando todos los elementos con picos presentes, en particular aquellos que están en bajas concentraciones. En cuanto al modelo de corrección, se sugieren las siguientes opciones:

- Utilizar el modelo P/B-ZAF para la cuantificación de MgO y Na₂O
- Aplicar Phi (Rho, Z) para SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, FeO, CaO y K₂O

Como últimas observaciones para esta sección, tener en cuenta:

- Utilizar el archivo de configuración oxides.mtdx para expresar las concentraciones en forma de óxidos (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, FeO, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅).

- Expresar las concentraciones en valores normalizados estequiométricamente (Sto norm) para facilitar la comparación e interpretación geoquímica.

6.1.3. Evaluación de resultados y tratamiento de datos

Una vez finalizado el análisis composicional, es recomendable calcular los valores promedio y la desviación estándar para cada óxido en el conjunto de áreas medidas. Esta estadística básica permite evaluar la homogeneidad de los datos, detectar patrones de variación e identificar tendencias químicas o temporales que puedan relacionarse con cambios en el comportamiento del magma. Con fines interpretativos conviene determinar ciertas razones elementales como K_2O/TiO_2 y CaO/Al_2O_3 que funcionan como indicadores geoquímicos clave.

La información generada debe organizarse en informes de lectura rápida y fácil interpretación, idealmente elaborados en un plazo de 24 a 48h tras la obtención de los datos. Estos informes deben incluir la composición media, la evolución temporal, las relaciones geoquímicas relevantes y una interpretación general de los resultados. Se sugiere compartirlos a través de los canales de vigilancia científica autorizados como el comité del PEVOLCA. Por último, es conveniente mantener los archivos de forma digital para cada análisis con sus respectivos espectros, imágenes y datos de composición exportables.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los objetivos y resultados obtenidos, se destacan las siguientes conclusiones:

- La microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplada a detectores de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS) constituye una alternativa viable y localmente accesible para caracterizar vidrio volcánico en contextos de emergencias en las Islas Canarias. Su aplicabilidad está justificada por la posibilidad de obtener datos confiables siempre que se apliquen condiciones analíticas cuidadosamente seleccionadas como las propuestas en este estudio (voltaje 20 kV, corriente 30 μ A, barrido cuadrado de 5 x 5 μ m tiempo de adquisición modo exhaustivo y el modelo de cuantificación según el óxido) y se realice una preparación adecuada de las muestras.
- La metodología desarrollada condujo a obtener una cuantificación elemental con valores de exactitud y precisión adecuados, incluso en ausencia de una calibración con estándares. También permitió detectar variaciones composicionales del magma durante diferentes etapas de la erupción de Tajogaite (2021), reproduciendo patrones geoquímicos coherentes con estudios previos y arrojando resultados comparables a los obtenidos por microsonda electrónica (EPMA), con desviaciones aceptables para la mayoría de los óxidos analizados.
- En cuanto a los modelos de corrección aplicados, se determinó que Phi (Rho, Z) ofrece mejores resultados para los óxidos SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, FeO, CaO y K₂O, mientras que P/B-ZAF resultó más adecuado para la estimación de MgO y Na₂O. Esta diferencia se relaciona con la manera en que cada modelo corrige los efectos físicos entre la interacción del haz de electrones y el material, lo que refuerza la necesidad de seleccionar el método en función del elemento y la composición de la muestra.
- El protocolo y metodología propuesta permite obtener resultados de composición en un tiempo operativo menor, con análisis que pueden completarse en \approx 48h tras la recolección de las muestras. Esta rapidez analítica, sumada a la disponibilidad local de la técnica en el mismo archipiélago, representa una mejora importante frente a otras técnicas más precisas, pero logísticamente limitadas por su disponibilidad.
- Se recomienda evaluar la metodología propuesta con el uso de estándares de calibración y establecer si este procedimiento contribuye a mejorar significativamente la calidad de los resultados y cómo su aplicación influye en términos de tiempo y recursos requeridos para su implementación. Así mismo, se considera apropiado, analizar y repetir la cuantificación del Na₂O en la muestra CV21P-A1 para confirmar la consistencia de los datos y descartar efectos locales.

8. BIBLIOGRAFIA

- Ali, A., Zhang, N., & Santos, R. (2023). Mineral characterization using scanning electron microscopy (SEM): A review of the fundamentals, advancements, and research directions. *Applied Sciences*, 13(23) doi: <https://doi.org/10.3390/app132312600>
- Armstrong, J. T. (1988). Quantitative analysis of silicates and oxide minerals: Comparison of monte-carlo, ZAF and phi-rho-Z procedures., 239–246.
- Arroyo, X. (2024). *Microscopía electrónica de barrido (SEM)*. CAI Ciencias de la Tierra y Arqueometría: Universidad Complutense de Madrid.
- Barker, A. K., Troll, V. R., Carracedo, J. C., Nicholls, P. A. (2015). The magma plumbing system for the 1971 Teneguía eruption on La Palma, Canary Islands. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(5-6) doi: <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1207-7>
- Bonadonna, C., Pistolesi, M., Biass, S., Voloschina, M., Romero, J., Coppola, D., Folch, A., D'Auria, L., Martín-Lorenzo, A., Domínguez, L., Pastore, C., Reyes, M., Rodríguez, F. (2022). *Physical characterization of Long-Lasting hybrid eruptions: The 2021 Tajogaite eruption of Cumbre Vieja (La Palma, Canary Islands)* American Geophysical Union (AGU). doi:10.1029/2022jb025302
- Bruker Nano GmbH. (2022). *QUANTAX EDS energy-dispersive X-ray spectrometer for electron microscopy*. Alemania.
- Carracedo, J. C., Rodríguez Badiola, E., Guillou, H., Nuez, J., Pérez Torrado, F. J. (2001). Geology and volcanology of La Palma and el Hierro, western canaries. *Estudios Geológicos*, 57(5–6), 175–273.
- Carracedo, J., Troll, V., Day, J., Geiger, H., Aulinas, M., Soler, V., Deegan, F., Francisco, F., Pérez-Torrado, F., Gisbert, G., Gazel, E., González, A., Albert, H. (2022). The 2021 eruption of the Cumbre Vieja volcanic ridge on La Palma, Canary Islands.38(3) doi: <https://doi.org/10.1111/gto.12388>
- Castro, A. (2015). *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. Madrid, España: Paraninfo S.A.
- Castro, J., Feisel, Y. (2022). *Eruption of ultralow-viscosity basanite magma at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands* Springer Science and Business Media LLC. doi:10.1038/s41467-022-30905-4
- Clavijo, J. (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Revista Elementos*, (3)
- Corsaro, R., & Miraglia, L. (2022). Near real-time petrologic monitoring on volcanic glass to infer magmatic processes during the February–April 2021 paroxysms of the south-east crater, etna. *Frontiers in Earth Science*, 10 doi:10.3389/feart.2022.828026
- Day, J., Troll, V., Aulinas, M., Deegan, F., Geiger, H., Carracedo, J., Pinto, G., Pérez-Torrado, F. (2022). Mantle source characteristics and magmatic processes during the 2021 La Palma eruption. *Earth and Planetary Science Letters*, 597 doi:10.1016/j.epsl.2022.117793
- Dóniz-Páez, J., Beltrán-Yanes, E., Becerra-Ramírez, R., Pérez, N., Hernández, P., Hernández, W. (2020). Diversity of volcanic geoheritage in the Canary Islands, Spain. *Geosciences*, 10(10) doi:10.3390/geosciences10100390
- Fedele, L., Scarpati, C., Chiominto, G., Santangelo, I., Perrotta, A. (2025). The assembly and discharge of the vesuvius eruption magma chamber: New insights from petrological and

chemostratigraphic evidence. *Journal of Petrology*, 66(4)
doi:<https://doi.org/10.1093/petrology/egaf023>

- Gansecki, C., Lee, R. L., Shea, T., Lundblad, S. P., Hon, K., & Parcheta, C. (2019). The tangled tale of Kīlauea's 2018 eruption as told by geochemical monitoring. *Science*, 366(6470) doi:10.1126/ciencia.aaz014
- Goldstein, J., Newbury, D., Joy, D., Lyman, C., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., Michael, J. (2003). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis* (THIRD ed.) Springer Science+Business Media, LLC.
- González-García, D., Boulesteix, T., Klügel, A., Holtz, F. (2023). Bubble-enhanced basanite–tephrite mixing in the early stages of the Cumbre Vieja 2021 eruption, La Palma, Canary Islands. *Scientific Reports*, 13(1) doi:10.1038/s41598-023-41595-3
- González-García, D., Behrens, H., Petrelli, M., Vetere, F., Morgavi, D., Zhang, C., Perugini, D. (2017). Water-enhanced interdiffusion of major elements between natural shoshonite and high-K rhyolite melts. *Chemical Geology*, 466, 86–101. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.05.023>
- González-García, D., Pohl, F., Marxer, F., Krasheninnikov, S., Almeev, R., Holtz, F. (2024). Chemical interdiffusion between na-series tephritic and phonolitic melts with different H₂O content, temperature, and oxygen fugacity values. *European Journal of Mineralogy*, 36(4), 623–640. doi: <https://doi.org/10.5194/ejm-36-623-2024>
- Ibarrola, &. & E. (1974). Temporal modification of the basaltic materials from 1971 eruption of the Teneguía volcano. *Estudios Geológicos*, , 49–58.
- Klügel, A., Hoernle, K. A., Schmincke, H.-U., White, J. D. L. (2000). The chemically zoned 1949 eruption on La Palma (Canary Islands): Petrologic evolution and magma supply dynamics of a rift zone eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B3), 5997–6016. doi: <https://doi.org/10.1029/1999JB900334>
- Longpré, M., Tramontano, S., Pankhurst, M., Roman, D., Reiss, M., Cortese, F., James, F., Spina, L., Rodríguez, F., Coldwell, B., Martín-Lorenzo, A., Barbee, O., D'auria, L., Chamberlain, K., Scarrow, J. (2025). *Shifting melt composition linked to volcanic tremor at Cumbre Vieja volcano* Springer Science and Business Media LLC. doi:10.1038/s41561-024-01623-x
- Marshall, E. W., Caracciolo, A., Bali, E., Halldórsson, S. A., Matthews, S., Ranta, E., Rasmussen, M., Robin, J., Guðfinnson, G., Maclennan, J., Bosq, C., Auclair, D., Sigmarsson, O., Merril, H., Gísladóttir, B., Johnson, S., Low, N., Stracke, A., Genske, F. (2024). *The petrology and geochemistry of the 2021 fagradalsfjall eruption, Iceland: An eruption sourced from multiple, compositionally diverse, Near-Moho sills* American Geophysical Union (AGU). doi:10.1029/2024av001310
- Meletlidis, &. S., Di Roberto, A., Pompilio, M., Bertagnini, A., Iribarren, I., Felpeto, A., Torres, P. A., D'Oriano, C. (2012). Xenopumices from the 2011-2012 submarine eruption of el hierro (Canary Islands, Spain): Constraints on the plumbing system and magma ascent. *Geophysical Research Letters*, 39(17) doi:<https://doi.org/10.1029/2012GL052675>
- Miraglia, L. (2012). Caratteristiche del sistema analitico SEM-EDS: Valutazione dell'accuratezza e della precisione delle analisi eseguite su standards internazionali di minerali e vetri. *Rapporti Tecnici INGV*, 233, 22. doi: <https://doi.org/10.13127/RPT/233>
- Pankhurst, M., S., γ, J., Barbee, O., Hickey, J., Coldwell, B., Rollinson, G., Rodríguez-Losada, J., Lorenzo, A., Rodríguez, F., Hernández, W., Fernández, D., Hernández, P., Pérez, N. (2022). Rapid response petrology for the opening eruptive phase of the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma, Canary Islands.5(1), 1–10. doi:10.30909/vol.05.01.0110

- Pérez Torrado, F., Hansen, A. (2005). The island and its territory: Volcanism in Lanzarote. *Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*, 1–3.
- Pérez-Torrado, F., Carracedo, J., Rodríguez-González, A., Soler, V., Troll, V., & Wiesmaier, S. (2012). La erupción submarina de la restinga en la isla de el Hierro, Canarias: Octubre 2011-marzo 2012. *Estudios Geológicos*, 68(1), 5–27. doi:10.3989/egeol.40918.179.
- R. W. Le Maitre, A. Streckeisen, B. Zanettin, M. J. Le Bas, B. Bonin, P. Bateman, G. Bellieni, A. Dudek, S. Efremova, J. Keller, J. Lamere, P. A. Sabine, R. Schmid, H. Sorensen, and A. R. Woolle. (2002). *Igneous rocks: A classification and glossary of terms, recommendations of the international union of geological sciences, subcommission of the systematics of igneous rocks* Cambridge University Press.
- Re, G., Corsaro, R., D' Oriano, C., Pompilio, M. (2021). Petrological monitoring of active volcanoes: A review of existing procedures to achieve best practices and operative protocols during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 419 doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107365
- Romero, J. E., Burton, M., Cáceres, F., Taddeucci, J., Civico, R., Ricci, T., Pankhurst, M. J., Hernández, P. A., Bonadonna, C., Llewellyn, E. W., Pistolesi, M., Polacci, M., Solana, C., D'Auria, L., Arzilli, F., Andronico, D., & Rodríguez, F., Asensio-Ramos, M., Martín-Lorenzo, A., Pérez, N. M. (2022). The initial phase of the 2021 Cumbre Vieja ridge eruption (Canary Islands): Products and dynamics controlling edifice growth and collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 431(107642) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107642>
- Troll, V. R., Klügel, A., Longpré, M.-A., Burchardt, S., Deegan, F. M., Carracedo, J. & C., Wiesmaier, S., Kueppers, U., Dahren, B., Blythe, L. S., Hansteen, T. H., & Freda, C., Budd, D. A., Jolis, E. M., Jonsson, E., Meade, F. C., Harris, C., Berg, S. E., Mancini, L., Pedroza, K. (2012). Floating stones off el hierro, Canary Islands: Xenoliths of pre-island sedimentary origin in the early products of the october 2011 eruption. *Solid Earth*, 3(1), 97–110.
- Ural, N. (2021). The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview. *Open Geosciences*, 13(1), 197–218. doi:10.1515/geo-2020-0145
- Villegas, R. (2012). *La microscopía electrónica de barrido para el estudio del patrimonio histórico*. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico: doi: <https://doi.org/10.33349/2002.40.1417>