



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL
Curso 2023-2024

Caracterización geoquímica de materiales volcánicos mediante equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X. Análisis de su aplicabilidad en emergencias volcánicas

Geochemical Characterization of Volcanic Materials Using Portable X-Ray Fluorescence Equipment: Analysis of Its Applicability in Volcanic Emergencies

JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ HURTADO

TUTORES DEL TRABAJO: ALVARO MARQUEZ GONZALEZ
JOSÉ F. MEDIATO ARRIBAS



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGIA AMBIENTAL

Curso 2023-2024

Caracterización geoquímica de materiales volcánicos mediante equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X. Análisis de su aplicabilidad en emergencias volcánicas

Geochemical Characterization of Volcanic Materials Using Portable X-Ray Fluorescence Equipment: Analysis of Its Applicability in Volcanic Emergencies

JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ HURTADO

TUTORES DEL TRABAJO:

ALVARO MARQUEZ GONZALEZ

Firmado por MARQUEZ GONZALEZ ALVARO - DNI ***2993** el día 23/07/2024 con un certificado emitido por AC Sector Público

Fdo.:

JOSÉ FRANCISCO MEDIATO ARRIBAS

Firmado digitalmente por MEDIATO ARRIBAS JOSE FRANCISCO - DNI 52991534V

Nombre de reconocimiento (DN): c=ES, o=CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS, ou=CERTIFICADO ELECTRONICO DE EMPLEADO PUBLICO, ou=INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA, ou=52991534V, serialNumber=IDCES-52991534V, sn=MEDIATO ARRIBAS, givenName=JOSE FRANCISCO, cn=MEDIATO ARRIBAS JOSE FRANCISCO - DNI 52991534V

Fdo.:

Fecha: 2024.07.24 12:37:42 +02'00'



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ HURTADO con NIE Z1081398N, estudiante de Máster universitario en Geología Ambiental en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2023-2024, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado “Caracterización geoquímica de materiales volcánicos mediante equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X”. Análisis de su aplicabilidad en emergencias volcánicas y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyos tutores son: ALVARO MARQUEZ GONZALEZ Y JOSÉ FRANCISCO MEDIATO ARRIBAS.

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 24 de julio de 2024

Fdo.:

Firmado por GOMEZ
HURTADO JUAN
SEBASTIAN -
****1398* el día
24/07/2024 con un
certificado emitido
por AC FNMT Usuarios



Declaración Responsable sobre Autoría y Uso Ético de Herramientas de Inteligencia Artificial (IA)

Yo, GOMEZ HURTADO JUAN
SEBASTIAN Con NIE: Z1081398N

declaro de manera responsable que el/la presente:

- Trabajo de Fin de Máster (TFM)

Titulado/a

Caracterización geoquímica de materiales volcánicos mediante equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X. Análisis de su aplicabilidad en emergencias volcánicas

es el resultado de mi trabajo intelectual personal y creativo, y ha sido elaborado de acuerdo con los principios éticos y las normas de integridad vigentes en la comunidad académica y, más específicamente, en la Universidad Complutense de Madrid.

Soy, pues, autor del material aquí incluido y, cuando no ha sido así y he tomado el material de otra fuente, lo he citado o bien he declarado su procedencia de forma clara -incluidas, en su caso, herramientas de inteligencia artificial-. Las ideas y aportaciones principales incluidas en este trabajo, y que acreditan la adquisición de competencias, son mías y no proceden de otras fuentes o han sido reescritas usando material de otras fuentes.

Asimismo, aseguro que los datos y recursos utilizados son legítimos, verificables y han sido obtenidos de fuentes confiables y autorizadas. Además, he tomado medidas para garantizar la confidencialidad y privacidad de los datos utilizados, evitando cualquier tipo de sesgo o discriminación injusta en el tratamiento de la información.

En Madrid a 24 de julio de 2024

Fdo.:

Firmado por GOMEZ
HURTADO JUAN
SEBASTIAN -
****1398* el día
24/07/2024 con un
certificado emitido
por AC FNMT Usuarios

RESUMEN.....	III
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES.....	5
2.1 Vulcanismo característico	5
2.2 Monitoreo volcánico	6
2.3 Equipo portátil de fluorescencia de rayos X.	7
3. METODOLOGÍA.....	9
3.1 Zona de estudio.....	9
3.2 Marco geológico	10
3.3 Análisis granulométrico	11
3.4 Medición con equipo pXRF.....	12
3.5 Procesamiento de datos	13
3.6 Revisión con lupa	14
3.7 Revisión de dinámica de vientos durante la erupción	14
4. RESULTADOS.....	16
4.1 Granulometría.....	16
4.2 Columnas estratigráficas.....	18
4.3 Geoquímica de elementos.....	22
4.3.1 Elementos mayores	22
4.3.2 Elementos menores y traza	24
4.4 Composición mineralógica	29
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	31
5.1 Variaciones en la tasa de sedimentación al NE y SW del volcán.....	31
5.2 Dinámica de los vientos durante la erupción	34
5.3 Comparación de la técnica pXRF con técnicas de laboratorio	36
5.4 Protocolo para la aplicación de la técnica pXRF en futuras erupciones.....	38
5.4.1 Muestreo en campo	38
5.4.2 Preparación de las muestras.....	39
5.4.3 Medición con equipo pXRF.....	40
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
7. REFERENCIAS	43
ANEXO I.....	46
ANEXO II.....	48

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a los tutores de este trabajo: Álvaro Márquez González y José Mediato Arribas, por el acompañamiento, tiempo y recursos brindados durante la realización de este trabajo. Ayudándome a expandir mi entendimiento de las ciencias de la tierra y la importancia del estudio del riesgo volcánico. También agradezco a la Universidad Complutense, en especial a los docentes del master en Geología Ambiental, por los conocimientos y herramientas adquiridas durante este último año.

Por otro lado, quiero agradecer al personal del IGME en su sede Ríos Rosas por toda la ayuda brindada durante la realización de la parte práctica de este trabajo, pero especialmente a Eleuterio Baeza, por siempre estar disponible y abierto a ayudarme con lo que necesitara.

Muchas gracias a mis compañeros y amigos del master, por un año tan increíble, desde las clases a los campos, pero también por los momentos fuera del ámbito académico. Gracias a ustedes este año se sintió como en casa, solo que con una mezcla de culturas más diversa.

A mis amigos en Colombia y España por el apoyo brindado y por estar ahí en momentos difíciles durante este año tan bonito, pero a la vez complicado. Especialmente a Sergio, Maycol, Violeta, Fernando, Nataly y Sofia. Un agradecimiento muy especial a Sergio, por haberme acompañado en esta aventura, estoy seguro de que de no haber estado conmigo este año hubiese sido muy diferente.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia. Pero principalmente a mi mamá, mi madrina y mi hermano. Gracias por haberme brindado su amor, comprensión y acompañamiento durante este año y toda la vida, así como por darme la oportunidad de estar aquí.

RESUMEN

Durante gran parte de la historia humana, las sociedades se han asentado en inmediaciones de volcanes por diversas razones, asociadas a los nutrientes de los suelos volcánicos o por creencias relacionadas a estas montañas donde el interior de la tierra aflora y deja ver el gran poder de este planeta. Pero este modo de relación entre la humanidad y los volcanes conlleva a que las comunidades sean vulnerables a los diversos agentes volcánicos que existen durante una erupción. Por ello es imperativo comprender el comportamiento y la evolución de las erupciones a nivel geoquímico, con el fin de proteger a los millones de personas que alrededor del mundo, viven en las zonas de influencia de los volcanes.

Este trabajo se centra en el caso de estudio de la erupción de “La Palma” ocurrida entre septiembre y diciembre del 2021. Esta erupción se caracterizó por su larga duración y las afectaciones que tuvo sobre la población, así como en las actividades económicas de la isla. Durante un periodo de 85 días, el volcán Tajogaite emitió cerca de 45 millones de m³ de piroclastos, acarreado diversos daños en estructuras y cultivos.

Con el propósito de analizar la aplicabilidad de los equipos portátiles de Fluorescencia de Rayos X (pXRF). Se realizaron estudios sobre dos columnas estratigráficas, formadas por los piroclastos de caída de la erupción de La Palma del 2021, para determinar la fiabilidad de los resultados obtenidos con estos equipos. Por ello se realizó un análisis granulométrico, para determinar el tamaño de partícula más apropiado para la mediación de los elementos de interés, como Ni, Cr, Sr y Zr. A continuación, se realizó la toma y el procesamiento de los resultados. Los resultados, fueron comparados con otras técnicas de análisis geoquímico con el fin de determinar si estos equipos dan resultados similares, tanto en tendencias como en valores absolutos. Para poderlos utilizar como una alternativa más rápida y económica para la gestión de la emergencia en futuras erupciones.

Como resultado se obtuvieron curvas granulométricas, mediante las cuales se concluyó que la fracción 0,5-1 mm era el tamaño de piroclasto más prevalente en los diferentes niveles y el mejor para ser analizado mediante los equipos portátiles. Los resultados de geoquímica arrojaron que en general las concentraciones de los elementos variaron durante la erupción en función de la maficidad del magma emitido. Al comparar los resultados de este trabajo, con otros métodos de análisis geoquímico, se encontró que los datos obtenidos con esta técnica son fiables, mostrando las mismas tendencias y valores de concentraciones cercanos. A partir de esto se concluyó que los equipos pXRF son de utilidad en el monitoreo volcánico y se desarrolló un protocolo para su utilización en futuras erupciones.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Este trabajo se sitúa en el contexto de la erupción que tuvo lugar en la isla de La Palma, (Canarias, España) en el año 2021, la cual tuvo como resultado diferentes consecuencias para la población local. Esto es debido a que a lo largo de la historia y debido a los suelos fértiles que se suelen generar en las inmediaciones de los volcanes, son muchas las comunidades que se han asentado en las faldas de estas montañas. Para el caso específico de La Palma, en tiempos históricos se han registrado 8 erupciones entre los siglos XV y XXI (Melo, et al., 2023), las cuales han tenido implicaciones diferentes para la isla dependiendo de la ubicación de los puntos de emisión y la cercanía de estos a centros urbanos y áreas agrícolas. Como ejemplo de esto, durante la erupción de 2021 (denominada Tajogaite) se reportaron alrededor de 2988 edificaciones destruidas, 370 ha de cultivos afectadas y 73,8 km de carreteras cortadas por las coladas de lava (Melo, et al., 2023). A pesar de estos daños no hubo víctimas fatales como producto de la erupción. La mayoría de estas erupciones históricas se ha concentrado en la vertiente occidental de la dorsal de Cumbre Vieja donde se encuentran los municipios de Los Llanos de Aridane, El Paso y Tazacorte y que según el censo de 2011 contaban con 20493, 7665 y 4777 personas respectivamente (Instituto Nacional de Estadística, 2013), lo que muestra que ante los peligros volcánicos presentes en la isla hay una población e infraestructura expuesta a éstos. Así mismo esta erupción generó un importante interés de la comunidad científica en general para estudiar este fenómeno natural y que ha llevado a una amplia gama de estudios. Teniendo en cuenta este contexto, este trabajo busca mostrar la importancia del continuo desarrollo de métodos de monitorización de la erupción tanto antes como durante, así como los protocolos para llevarlos a cabo. Dichas metodologías son diversas y se concentran en medir diferentes parámetros, bien sean: actividad sísmica, deformaciones, gases o la misma composición de los productos volcánicos. Éstas en conjunto permiten entender mejor el comportamiento de un volcán y a partir de este desarrollar modelos que sean capaces de estimar la evolución de una erupción en el tiempo y espacio. Para dicho propósito, se realizó un análisis a partir de piroclastos expulsados durante la erupción del Tajogaite que fueron tomados a partir de dos columnas ubicadas a pocos kilómetros del cono del volcán. A estos piroclastos se les hizo una medición elemental con un equipo portátil de fluorescencia de rayos x, con el fin de analizar las variaciones temporales de estos, indicativas de la evolución de la erupción.

La erupción del volcán Tajogaite en Cumbre Vieja, tuvo una duración de aproximadamente 85 días entre septiembre y diciembre del 2021. Este evento se caracterizó por un paso relativamente rápido entre los eventos precursores y la erupción propia, evidenciando que las erupciones volcánicas pueden evolucionar rápidamente (Bonadonna, et al., 2023). Para esta

erupción los signos precursoros fueron: la deformación temprana del relieve, sismicidad superficial y emplazamiento magmático en profundidad (Day, et al., 2022). El volcán Tajogaite se caracterizó por presentar una erupción de tipo estromboliano, generando flujos de lava, piroclastos de caída y gases como los principales agentes volcánicos de esta erupción. En general estuvo marcada por grandes flujos de lava orientados hacia el occidente de la isla, condicionados fuertemente por la topografía de la isla que se divide en dos vertientes principales entre las márgenes derecha e izquierda de la dorsal de Cumbre Vieja. Los piroclastos tuvieron una distribución espacial más dispersa, aunque concentrándose principalmente en las direcciones NE y SW (Bonadonna, et al., 2022), estando estas determinadas por los vientos preferenciales en los archipiélagos de la región de Macaronesia, siendo los alisios del NE los más dominantes en la región (Carrillo, et al., 2016). Como mencionan (Ubide, et al., 2023), la fase inicial se caracterizó por tener una composición de magmas tefríticos, más diferenciados y que le otorgaron una mayor viscosidad a la lava y a los piroclastos. Posteriormente tras una interrupción de la erupción el día 27 de septiembre, el magma pasó a ser más fluido y de composición basanítica, algo que provocó un cambio importante en el comportamiento de los productos volcánicos de la erupción. Estas variaciones son confirmadas por Day et al., (2022) que aparte de los cambios en la composición mineral de los magmas, también menciona que algunos elementos, como el Ti, Mg y Ni, presentaron valores diferentes conforme avanzó la erupción, para finalmente terminar el 13 de diciembre con un último pulso explosivo (Ubide, et al., 2023). Estos estudios muestran la importancia que tiene el realizar mediciones de las variaciones composicionales, ya que a partir del conocimiento de cómo evolucionan diferentes elementos durante erupciones similares a las de La Palma del 2021, es posible desarrollar proyecciones de cómo se puede comportar dicho fenómeno natural., Estos estudios trabajaron a partir de muestras obtenidas de los flujos de lava de la erupción, manejando un control temporal para analizar de forma eficiente la evolución en la composición mineral y elemental de la lava. Respecto a los piroclastos, otro de los agentes volcánicos más influyentes durante la erupción, la columna eruptiva del volcán Tajogaite, tuvo una altura variable entre 2-5 km (Bonadonna, et al., 2023), en concordancia con el estilo eruptivo estromboliano mencionado previamente. En cuanto al tamaño de los piroclastos eyectados durante el evento, Bonadonna et al. (2023) mencionan que en comparación a otras erupciones de estilo similar, los contenidos de lapilli y ceniza son similares, pero para el Tajogaite, las cenizas finas se dan en menor proporción. Así mismo mencionan que las partículas de tamaño bloque se encuentran concentradas en inmediaciones del cono dada la incapacidad de los vientos para mover estos piroclastos de gran tamaño. Paralelamente Taddeucci et al. (2023) exponen que la erupción presentó fases efusivas y explosivas que se alternaron por momentos, provocando diferentes tasas de emisión de piroclastos y variabilidad en la granulometría de estos, generando momentos de

emisión preferencial de bloques y bombas y otros con mayor prevalencia de “jets” ricos en lapilli y ceniza (Taddeucci, et al., 2023) que eran movilizados por el viento en las dos direcciones preferenciales mencionadas previamente. Estas variaciones entre momentos de mayor efusividad y explosividad se vieron también evidenciadas en las velocidades de salida de los piroclastos, presentando rangos entre 60 m/s – 220 m/s (Taddeucci, et al., 2023), y por lo tanto cambiando el alcance tanto de los piroclastos de tamaño bloque como la altura de la columna eruptiva, facilitando una mayor dispersión de los piroclastos, llegando a afectar zonas pobladas más distantes del cono.

En base a los trabajos previamente mencionados (Bonadonna et al. (2022), Day et al. (2022), Taddeucci et al. (2023), Bonadonna et al. (2023), Ubide et al. (2023)), es de vital importancia realizar mediciones de diferentes parámetros volcánicos para comprender el funcionamiento de una erupción. Sin embargo, algo que cabe denotar de algunos de los análisis de laboratorio que se realizaron en estudios como: Day et al. (2022) y Ubide et al. (2023), y principalmente relacionados con la caracterización mineralógica y la variación elemental a lo largo de la erupción. Es que son técnicas que requieren de procedimientos que en escala temporal pueden tomar varios días para dar resultados y así mismo pueden tener elevados costes. También son técnicas muy específicas que requieren de personal capacitado. Esto puede representar un problema si se toma en cuenta que por ejemplo para el caso de Tajogaite el desarrollo de la erupción fue rápido y muy cambiante. En base a esto, se hace pertinente el utilizar otras herramientas que permitan obtener resultados en periodos de tiempo más cortos y que den una idea de valores cualitativos para tener una aproximación inicial a la evolución de la erupción. Una técnica que permite obtener un primer acercamiento a estos valores y que a la larga ayuda a complementar otras técnicas, es el uso del Equipo Portátil de Fluorescencia de Rayos X (pXRF, por sus siglas en ingles). En general el uso de estos equipos ha estado concentrado en geoquímica ligada a procesos de exploración minera, en planeación de cierre de minas y manejo de desechos, así como en remediación de espacios contaminados por actividades de extracción (Lemière, 2018). En base a estos trabajos, teniendo un nivel de preparación previo, el uso de pXRF, puede ser una alternativa que temporal y económicamente es viable, ya que se obtienen resultados confiables tanto a nivel cualitativo como cuantitativo, siempre teniendo en cuenta las limitaciones del mismo.

Tomando en cuenta las diferentes metodologías utilizadas por los trabajos previamente mencionados, en donde se evidencia la importancia de una aproximación diversa en el estudio y monitorización de las erupciones volcánicas, se ha planteado para este trabajo el objetivo general de analizar la aplicabilidad de los pXRF en emergencias volcánicas y desarrollar un protocolo para aplicar esta técnica en campo en una futura erupción. Para el

cumplimiento del objetivo general se desarrollaron los siguientes objetivos específicos: 1) hacer un análisis granulométrico para determinar la fracción de tamaño más común entre las muestras de piroclastos de las dos columnas estudiadas y determinar la dinámica de sedimentación de los piroclastos a lo largo de la erupción, 2) medir con un equipo portátil de fluorescencia de rayos X la composición elemental de los piroclastos y analizar la evolución de esta a lo largo de la erupción y 3) realizar una comparación entre la técnica pXRF aplicada a piroclastos de Tajogaite y técnicas de laboratorio con el fin de determinar la eficiencia de esta técnica en la caracterización elemental de piroclastos.

2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

2.1 Vulcanismo característico

En la isla de La Palma, los volcanes que han provocado las erupciones históricas de la isla han sido de tipo monogenético. Este término refiere a las geoformas de origen volcánico que se forman como resultado de una única erupción en un campo volcánico o a emisiones en laderas de complejos volcánicos de mayores dimensiones (McGee & Smith, 2016), (de Silva & Lindsey, 2015). A nivel composicional de los productos que surgen de la actividad volcánica se suelen clasificar, en función de su contenido en sílice como máficos o félsicos (de Silva & Lindsey, 2015), siendo los diferentes volcanes monogenéticos con actividad histórica de La Palma de tipo máfico. Estas geoformas a su vez están diferenciadas según el tipo de material que las compone, diferenciando entre conos de escoria, conos de toba y anillos de toba. de Silva y Lindsey (2015) explican que los conos de escoria adquieren su forma principalmente debido a lo que se conoce como el ángulo de reposo de la escoria (33°) lo que les confiere pendientes marcadas y una forma cónica dinámica asociada a cambios en la actividad volcánica, así como a los vientos presentes durante la erupción. Por otro lado, los conos y anillos de toba tienden a tener laderas con pendientes más bajas y presencia de superficies de aguas someras que forman pequeños lagos en torno a estas estructuras.

En lo que respecta al tipo eruptivo, las erupciones asociadas a estas morfologías se clasifican como hawaiana, estromboliana y freatomagmática . En muchos casos se da una combinación de estos tipos eruptivos a lo largo del tiempo que dura una erupción. A nivel de las erupciones estrombolianas, estas se pueden caracterizar por presentar momentos de mayor explosividad y momentos donde es superior la efusividad (Taddeucci, et al., 2015) . Las fases en la que la actividad se caracteriza por ser explosiva van asociadas a la rápida expansión de gases que al momento de salir arrastran consigo fragmentos de material volcánico y generan explosiones discretas de piroclastos. Por otro lado, la actividad efusiva está dada por la emisión casi continua de fuentes de lava en superficie, con un bajo contenido en “jets” de piroclastos (Taddeucci, et al., 2015). Cuando se presenta este tipo de actividad en volcanes monogenéticos, generalmente las primeras fases eruptivas se caracterizan por ser más explosivas, con una mayor emisión de piroclastos y conforme avanza la erupción, empieza a disminuir la actividad explosiva para ser reemplazada progresivamente por la actividad efusiva (Cassidy, et al., 2018). Estas variaciones en el comportamiento de la actividad volcánica están asociadas principalmente a los procesos de desgasificación por los que pasa el magma durante su ascenso y salida a superficie, siendo ésta mucho más violenta durante las fases explosivas como resultado de un rápido ascenso de magma y una fragmentación del magma y mientras en las fases efusivas se caracterizó por ser un ascenso más lento (Cassidy, et al., 2018).

2.2 Monitoreo volcánico

La actividad volcánica se puede monitorizar tanto antes como durante de una erupción. En lo que respecta a los momentos previos a una erupción, el monitoreo que se desarrolla está asociado en general a tres tipos: monitoreo de la sismicidad, medición de las deformación del terreno y muestreo de gases. A nivel de sismicidad, esta es medible a través del análisis de las características de los terremotos que se registran, tales como: la profundidad, el tamaño y la tasa de generación de estos, y a través de ellos generar modelos que permiten monitorear la dinámica del magma en profundidad, (p.ej, Saccorotti & Lokmer, 2021). La deformación del terreno puede ser medida mediante GPS, pero también en tiempos recientes se ha empezado a utilizar la tecnología DInSAR (Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar). En ambos casos se obtienen resultados que permiten identificar eficientemente cambios en el terreno que pueden estar asociados al ascenso de fluidos en la corteza (Głąbicki, 2020). A nivel de la medición de gases, una metodología muy utilizada es la Giggenbach, que consiste en la toma de muestras de gas directa en fumarolas y que permite el análisis de diferentes relaciones entre los compuestos emitidos, como: CO₂, CH₄, H₂S, SO₂ (Matias, et al., 2024). Alternativamente, otra metodología para la medición de gases consiste en el uso de datos satelitales, como Ozone Monitoring Instrument (OMI) con el cual se pueden estimar las concentraciones de gases como SO₂ y CO₂ (Carn, et al., 2017).

En tiempos recientes, conforme ha avanzado la tecnología y se han desarrollado metodologías en torno a éstas, la monitorización de la actividad volcánica precursora se ha vuelto más precisa, pero el pronóstico de la evolución de una erupción es un campo de estudio con incertidumbre. Por ello se han desarrollado nuevos métodos para fortalecer la prognosis de las erupciones una vez han comenzado, analizando entre otras cosas: composición elemental, petrología y mineralogía, contenido de volátiles (National Academies of Sciences, 2017), (Poland & Anderson, 2020), pero también la predicción de futuras erupciones a través de estudios de la historia eruptiva, basada en los registros geológicos e históricos (Poland & Anderson, 2020). A nivel de análisis petrológicos y mineralógicos, Re et al. (2021) resume el estado del arte de las técnicas y métodos aplicados en el campo y laboratorios, evidenciando la importancia de las campañas de muestreo rápido, con el fin de realizar análisis geoquímicos y utilizar los resultados como parte del monitoreo petrológico y observar la evolución composicional de una erupción. Trabajos como Pankhurst et al. (2022), Day et al. (2022) y Ubide et al. (2023) desarrollaron su trabajo de campo principalmente sobre coladas de lava, pero también en algunas muestras de piroclastos de caída, y técnicas de laboratorio orientadas a la obtención de datos geoquímicos y petrológicos que vislumbren las variaciones composicionales y la dinámica volcánica en erupciones como la de Tajogaite (2021) para expandir el conocimiento que existe respecto al funcionamiento de estos volcanes.

Además de los estudios sobre coladas de lava, hay también un interés sobre la información que se puede obtener a partir de las columnas eruptivas y los piroclastos de caída, y el uso de estos para estimar el riesgo asociado a estos eventos. Taddeucci et al. (2004) trabajaron sobre los piroclastos de la erupción del Monte Etna (2001), correlacionando la proporción entre sideromelana y taquilita con las diferentes fases eruptivas de este evento, asociando la formación preferencial de estos con diferentes dinámicas en el conducto principal. D’Orlando et al. (2011) por su parte utilizaron cenizas del volcán Estromboli para identificar cómo las variaciones en el contenido de burbujas de volátiles y el nivel de fraccionamiento del magma, pueden determinar la composición y textura de las cenizas de este volcán, llevando a una mejor comprensión de su funcionamiento y su monitoreo. Bonadonna & Houghton (2005) utilizaron la distribución espacial y el volumen de piroclastos emitido en dos casos de estudio, con el fin de determinar la relación de estas variables con la magnitud y el tipo de una erupción. Bonadonna & Costa (2013) mediante una función que describe el cambio en la proporción de tamaño de los piroclastos con respecto a la distancia al foco emisor, obtuvieron el volumen de material emitido y utilizaron este para calcular la altura de la columna eruptiva y el tipo eruptivo al que ésta va asociada.

2.3 Equipo portátil de fluorescencia de rayos X.

Como se ha mencionado en la introducción, la aplicación de equipos pXRF en diferentes campos de la ciencia y la industria ha arrojado datos prometedores. Sin embargo, los resultados del uso de este aparato no siempre son iguales, ni ofrecen el mismo grado de fiabilidad. Esto se debe a que la técnica es muy sensible a la preparación que tenga la muestra y por lo tanto si los materiales muestreados no llevan inicialmente una homogeneización previa, lo más probable es que los resultados que se obtengan sean únicamente semi cualitativos. Por otro lado, una limitación que tiene la técnica es que no todos los elementos pueden ser medidos satisfactoriamente con este equipo ya que en general a nivel cuantitativo se obtienen valores buenos para elementos pesados. Sin embargo, en el caso de los elementos mayores, sus valores dan una imagen más bien cualitativa (Lemière, 2018). Esto es corroborado por Zhou et al. (2023) que utilizaron este equipo en exploración geoquímica, realizando una comparación entre los resultados obtenidos con pXRF, y análisis de laboratorio donde se utilizaron diferentes métodos de espectrometría. Este estudio concluyó que el uso de pXRF da resultados confiables, pero considera que estos tienen una mayor confiabilidad dependiendo de varios factores, incluidos pero no limitándose a: 1) el elemento a determinar, debido a que algunos elementos son medidos con más precisión que otros; 2) el tiempo de detección, ya que a mayor tiempo más confiables los resultados y 3) la preparación de la muestra, en donde a las muestras que se les realizó una homogeneización previa, arrojaron resultados más cercanos a los obtenidos en los análisis de laboratorio, que las muestras a

las que se les hizo medición directa en roca (Zhou, et al., 2023). Aplicado a otro campo, Knight et al. (2021) desarrollaron un protocolo para la aplicación de esta técnica en la determinación de la composición elemental en muestras de sedimentos glaciogénicos. Este protocolo se configura en tres etapas, iniciando con cómo se debe tomar la muestra a analizar y el proceso de preparación que se debe hacer antes del uso del pXRF. A continuación se considera la aplicación de la técnica, en donde se deben tomar en cuenta, el método de análisis con el que se va a configurar el equipo, el tiempo de detección y el número de tomas a realizar. Finalmente se debe considerar el procesamiento de los resultados para su posterior análisis. Estos ejemplos pueden ser tomados en cuenta al momento de desarrollar un protocolo propio para el uso de pXRF en el análisis elemental orientado a piroclastos.

3. METODOLOGÍA

3.1 Zona de estudio

La zona de estudio está comprendida en las inmediaciones del volcán de Tajogaite (Figura 1). Se observa la ubicación aproximada de las dos columnas estratigráficas estudiadas en este trabajo. Al NE se encuentra la columna de Brujas, que recibe su nombre por su ubicación en el Llano de las Brujas y se encuentra aproximadamente a 2 km del cono del volcán. La columna al SW tiene por nombre Fátima y se encuentra cerca del monumento a la Virgen de Fátima en la población de Las Manchas, a una distancia cercana de 1,5 km del cono volcánico. Estas columnas se encuentran en zonas opuestas del edificio volcánico y se corresponden con la dirección principal de los vientos durante la erupción (Bonadonna, et al., 2022) y fueron medidas por José Francisco Mediato Arribas y Javier Martínez Martínez del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) durante una campaña de campo en La Palma en enero del 2023. La columna Fátima tiene una altura de 112 cm (Figura 2) y 30 niveles de piroclastos y la columna Brujas 103 cm (Figura 2) con un total de 27 niveles.

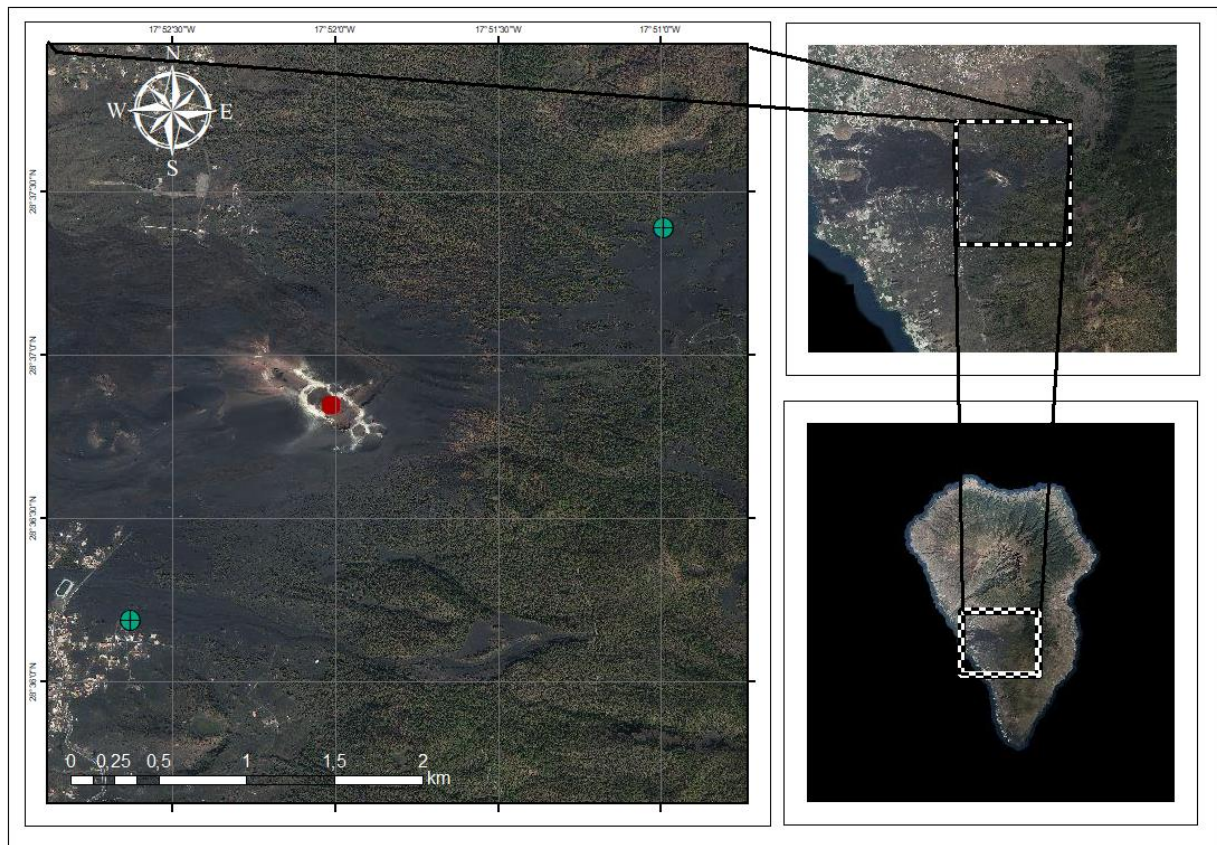


Figura 1. Mapa zona de estudio con respecto a la isla de La Palma. Punto rojo: ubicación del volcán Tajogaite. Puntos verdes: ubicación de las columnas de piroclastos de caída.



Figura 2. Columna Fátima (izquierda), columna Brujas (derecha). Fuente: José Francisco Mediato Arribas.

3.2 **Marco geológico**

El volcán Tajogaite, ubicado en la isla de La Palma, forma parte de una dorsal volcánica conocida como Cumbre Vieja. Esta dorsal corresponde a la sección sur de la isla y compone la parte activa de esta. Dentro del contexto del archipiélago de Las Canarias, La Palma es, junto con El Hierro, las islas occidentales y su historia geológica está marcada por una actividad con un inicio aproximado hace 1,77 Ma y la posterior formación de los edificios Garafía y Taburiente, que componen la parte norte inactiva de la isla. La actividad se empieza a desarrollar hacia el sur de la isla en forma de un rift de nombre Cumbre Nueva hace 700 Ka y durando hasta aproximadamente 400 Ka (Carracedo, et al., 2001). A partir de este punto inicia la actividad en Cumbre Vieja, formada por varios conos volcánicos orientados N-S y que evidencian la gran actividad de esta dorsal que intercala rocas basálticas y fonolíticas (Ancochea, et al., 1994) y que se mantiene como una de las zonas más activas en Las Canarias hasta la actualidad.

Los primeros precursores de esta erupción se registraron como terremotos de magnitud 1-2 entre 2017 y 2018. Esta actividad sísmica se mantuvo durante los siguientes años, variando de profundidad hasta que el 11 de septiembre de 2021 la profundidad de estos fue menor a 8 km (Troll, et al., 2024). Dichos terremotos precursores evidenciaron el ascenso de magma por la fisura de la dorsal de Cumbre Vieja y finalmente salieron a superficie, iniciando la erupción, el 19 de septiembre de 2021. En general la erupción se caracterizó por ser de tipo estromboliana, con emisión discreta de lava a lo largo de varias bocas y una significativa baja

viscosidad como resultado de una temperatura de emisión (Carracedo, et al., 2022) (Benito, et al., 2023) y acompañado de una fase piroclástica caracterizada por pulsos explosivos que variaron en magnitud y duración (Benito, et al., 2023). Durante la erupción se emitieron aproximadamente 45 millones de m³ de piroclastos a través de una columna eruptiva que tuvo una altura variable en torno a 3500 m, con una altura máxima registrada de 8500 m (Carracedo, et al., 2022). La primera fase de la erupción estuvo marcada por magmas de composición tefrítica, ricos en fenocristales de piroxenos y anfíbol, con una menor proporción de olivinos (Pankhurst, et al., 2022). Esta actividad se mantiene hasta un parón en la actividad el día 27 de septiembre, a partir del cual la composición del magma pasa a ser basanítica, con una composición mineral principalmente de piroxenos (Ubide, et al., 2023), en este punto la concentración de anfíbol se reduce y es lentamente reemplazada por olivinos que aumentan en proporción durante los meses de octubre y noviembre (Carracedo, et al., 2022). La erupción mantiene esta composición durante la mayoría de su duración, hasta que a finales de noviembre e inicios de diciembre se nota un cambio en la composición mineral y elemental, indicando una mayor diferenciación y cambios en el aporte del magma (Ubide, et al., 2023) y una disminución en la actividad que llegaría hasta el 13 de diciembre. La erupción finaliza el 12 de diciembre con un momento caracterizado por ser particularmente explosivo, registrando una columna eruptiva de 6.5 km de altura (Benito, et al., 2023).

3.3 Análisis granulométrico

La primera etapa del trabajo de laboratorio consistió en un análisis granulométrico, que tenía por objetivo homogeneizar las muestras de piroclastos por tamaño de partícula, y determinar cuál de estos era el más abundante en todos los niveles de las dos columnas estudiadas.

Para esto inicialmente se pesaron las muestras de piroclastos en húmedo, para su posterior secado en estufa. Para ello se colocaron las muestras en placas de Petri y llevadas a una estufa de secado a 60 °C, por un periodo de 24 horas (Figura 3a), conforme con la norma UNE-EN ISO17892-4:2016 (Asociación Española de Normalización, 2019) para determinación de la distribución granulométrica, esta temperatura y duración, se utilizó con el fin de evaporar el agua que se encontraba dentro de la porosidad de los piroclastos, para poder trabajar en seco con pesos netos de los piroclastos. Posterior al secado, se empleó una torre de tamices para realizar la separación de los diferentes tamaños de partícula (Figura 3b). Para este estudio se utilizaron los tamaños de malla: >2mm, >1mm, >0,5mm, >0,25 mm, >0,125 mm y >0,065 mm, una vez realizado el tamizado los piroclastos fueron divididos en bolsas según la distribución de los tamices previamente mencionada (Figura 3c).



Figura 3. Análisis granulométrico. Piroclastos dentro de estufa de secado (a). Torre de tamiz (b). Piroclastos clasificados por granulometría (c)

3.4 Medición con equipo pXRF

Posterior a la realización del análisis granulométrico se utilizó el equipo Olympus Vanta M Series XRF Analyser, con calibración geoquímica sin colimar y detección de 32 elementos más tierras raras (REE), para llevar a cabo la medición de la composición elemental de las diferentes muestras tamizadas (Figura 4). En concreto se realizó el procedimiento con la granulometría del intervalo 1-0.5 mm, el cual fue escogido tras analizar las curvas granulométricas que arrojaron que este tamaño de partícula era el más prevalente dentro de todos los niveles medidos. Previo al uso del equipo pXRF, se hizo una preparación de las muestras, colocándolas en probetas plásticas con una capacidad de almacenamiento de nueve gramos. Con el fin de reducir la porosidad de los piroclastos se realizó una compactación en las probetas, por medio de una tapa plástica, y así evitar que los haces de los rayos X se dispersasen y diesen información equivocada en sus mediciones. Una vez realizada la preparación, se iniciaron las mediciones con el equipo pXRF, configurándolo para hacer tres tomas individuales con un tiempo de detección de 60 segundos, ya que con esta duración se observó que los valores de las concentraciones de los elementos traza se

estabilizaban. Finalizado, el aparato hizo automáticamente un promedio de las tres series de datos registradas, para ser posteriormente importados para su procesamiento.



Figura 4. Olympus Vanta M Series XRF Analyser utilizado para la realización de las mediciones elementales y probeta plástica donde se prepararon las muestras.

3.5 Procesamiento de datos

Primeramente se tomaron los valores obtenidos de la granulometría para construir curvas granulométricas para los niveles de las columnas, tomando en cuenta el porcentaje de cada fracción y no el peso total ya que no todas las muestras tenían la misma cantidad de material., A partir de las curvas se determinó el tamaño de partícula mayoritario, para darle una clasificación por granulometría a cada nivel. Utilizando esta clasificación y en conjunto con datos obtenidos en campo se construyeron dos columnas estratigráficas para Fátima y Brujas.

Respecto a los resultados del análisis con el equipo pXRF, estos fueron procesados en Excel, organizando los valores promedio calculados por el aparato para cada nivel y diferenciándolos por elementos mayores (ej. Ca, Mg, K, Si) y traza registrados (ej. Zr, Nb, Ni, Cr). Para los elementos mayores, se realizó una conversión de sus concentraciones. Primeramente, se pasaron a su forma en óxidos, mediante el uso de los pesos atómicos y moleculares de cada elemento y la molécula de óxido correspondiente. Posteriormente se pasaron de

concentración en ppm a porcentaje en peso. A partir de las mediciones se construyeron graficas de dispersión para los elementos seleccionados con el propósito de analizar la evolución de la concentración a lo largo de la columna desde los niveles más profundos, y por tanto los de mayor antigüedad, hasta las capas superficiales, que representan las últimas etapas de la erupción.

3.6 Revisión con lupa

Como trabajo complementario a la medición de los elementos con pXRF, se realizó un análisis con lupa en algunas muestras que mostraban valores aparentemente anómalos en ciertos elementos, con el fin de observar la composición textural y mineralógica de los piroclastos en la fracción 1-0.5 mm, diferenciando entre: sideromelana, taquilita, fragmentos líticos y cristales. Se comparo la composición entre diferentes muestras que pudiesen mostrar variaciones en las proporciones de los minerales presentes en los niveles de piroclastos y que explicasen los cambios en concentración de los elementos.

Para ello se utilizó una lupa binocular de la marca BMS con 45x de aumento, con la cual se tomaron fotos de diferentes piroclastos en las muestras seleccionadas, que corresponden a los niveles 11, 12 y 13 de la columna Fátima, con un aumento de 15x y procesadas para colocar escala a las fotos y definir la composición textural y mineralógica de los piroclastos analizados.

3.7 Revisión de dinámica de vientos durante la erupción

Con el fin de analizar las diferencias en los espesores de los niveles de piroclastos en las columnas de Brujas y Fátima durante las diferentes etapas de la erupción en La Palma, se extrajo información del reanálisis Era-interim de 5ta generación (ERA5) del European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) en niveles simples. Los datos utilizados fueron en concreto, las componentes U, que refiere a la componente local (W-E) y V, la componente meridional (N-S) para los vientos a 10 y 100 m de altura con respecto a la superficie para las coordenadas: 28°37'09" N - 17°52'29" W y 28°36'21" N - 17°51'45" W, siendo esta la ubicación del cono del volcán Tajogaite, descargados del Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store de resolución horaria (Hersbach, et al., 2023) para los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre del 2021, conforme con las fechas de la erupción del Tajogaite con una resolución espacial de 0,25° para latitud y longitud. Primeramente, se calculó el promedio diario para las componentes U y V, ya que los datos utilizados se dan en resolución horaria, eliminando aquellos días de los meses de septiembre y diciembre previos al 19/09/2021 y posteriores al 13/12/2021. A partir de los valores promedio de las componentes U y V, se calculó la velocidad de los vientos (m/s) mediante la ecuación 1 y la dirección en grados (°) de los vientos a partir de las ecuaciones 2 y 3 (Pérez, 2014).

$$V \left(\frac{m}{s} \right) = \sqrt{\text{componente } U^2 + \text{componente } V^2}$$

Ecuación 1. Cálculo de la velocidad en m/s del viento a partir de las componentes local y meridional.

$$\theta = \text{ArcTan} \left(\frac{\text{Componente } U}{\text{Componente } V} \right)$$

Ecuación 2. Cálculo del ángulo a partir de la arco tangente de las componentes U y V.

$$\text{Dirección del viento} = \theta + \alpha$$

donde $\alpha = 0$ si $U < 0$ y $V < 0$, $\alpha = 180$ si $V > 0$, $\alpha = 360$ si $U > 0$ y $V < 0$

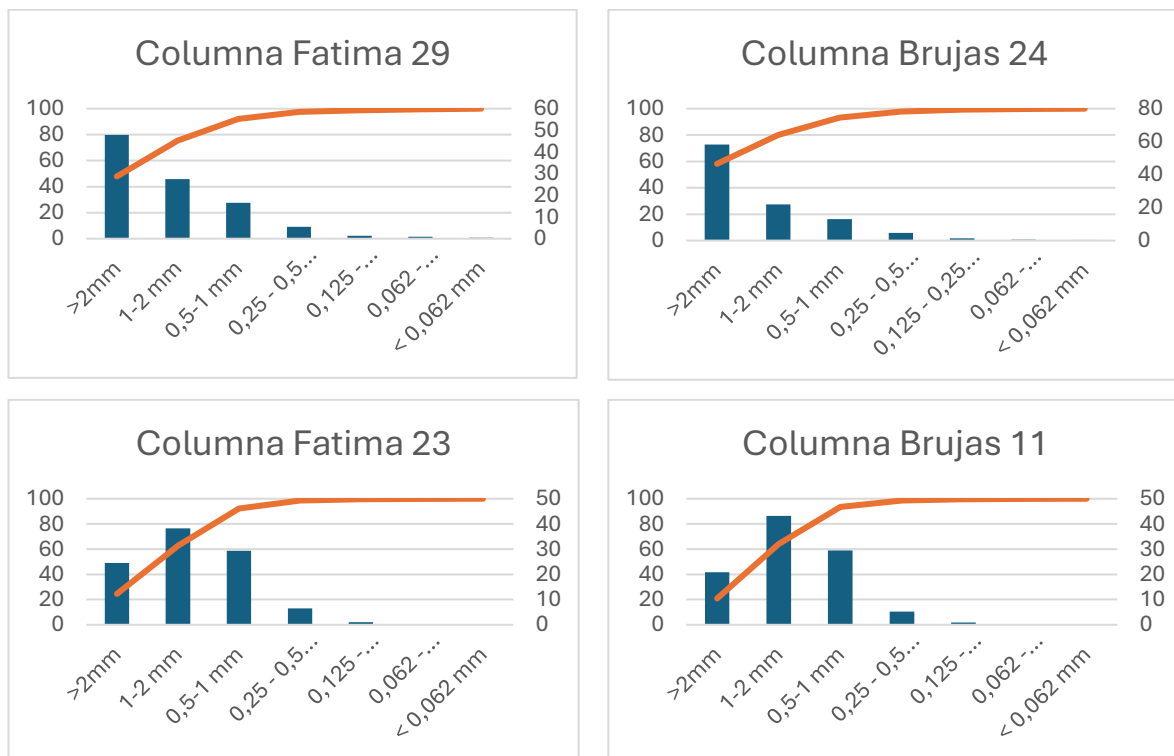
Ecuación 3. Cálculo de la dirección del viento.

Una vez realizados estos cálculos los datos fueron procesados y graficados con el software Grapher™ (Golden Software LCC, 2023), en donde se construyeron gráficas para mostrar las variaciones temporales de la velocidad y dirección de los vientos. Aparte se crearon rosas de viento utilizando la herramienta “Rose Wind Graph” (HatariLabs, 2022-2024), para las componentes de los vientos a 10 y 100 metros.

4. RESULTADOS

4.1 Granulometría

Para la granulometría se obtuvo, que las curvas granulométricas muestran tres formas típicas de distribución de los tamaños de partículas (Figura 5), que están asociadas a lapilli (>2 mm), ceniza gruesa (2 mm – 1 mm) y ceniza media (1 mm – 0.5 mm) como tamaño mayoritario. Dentro de estos tipos de curvas hay variaciones, sin embargo de forma general, las columnas que dibujan los niveles con lapilli como granulometría principal siguen una forma de curva descendente con mayor porcentaje de partículas de tamaños superiores a 0.5 mm y una proporción menor y decreciente de tamaños inferiores (Figura 5, a-b). De forma similar, aquellas gráficas que representan una granulometría de ceniza gruesa tienen una distribución entre una curva decreciente y una campana irregular, pero con porcentajes de partículas mayores a 2 mm menores en proporción (Figura 5, c-d). La tercera forma típica, muestra una distribución en forma de campana irregular, con su punto más alto en la granulometría de ceniza media y con un decrecimiento más rápido hacia los tamaños de partícula más pequeños a 0.5 mm (Figura 5, e-f). Por otro lado, en menor proporción las muestras con cenizas finas como granulometría principal, dibujan una campana irregular con su punta entre 0.5 mm y 0.25 mm (Figura 5, g-h). El análisis granulométrico no arrojó que hubiera algún nivel de piroclastos donde las cenizas muy finas y tamaños inferiores fueran los mayoritarios, en concordancia con Bonadonna et al. (2023) que mencionan una menor proporción de estos piroclastos más finos para la erupción del volcán Tajogaite.



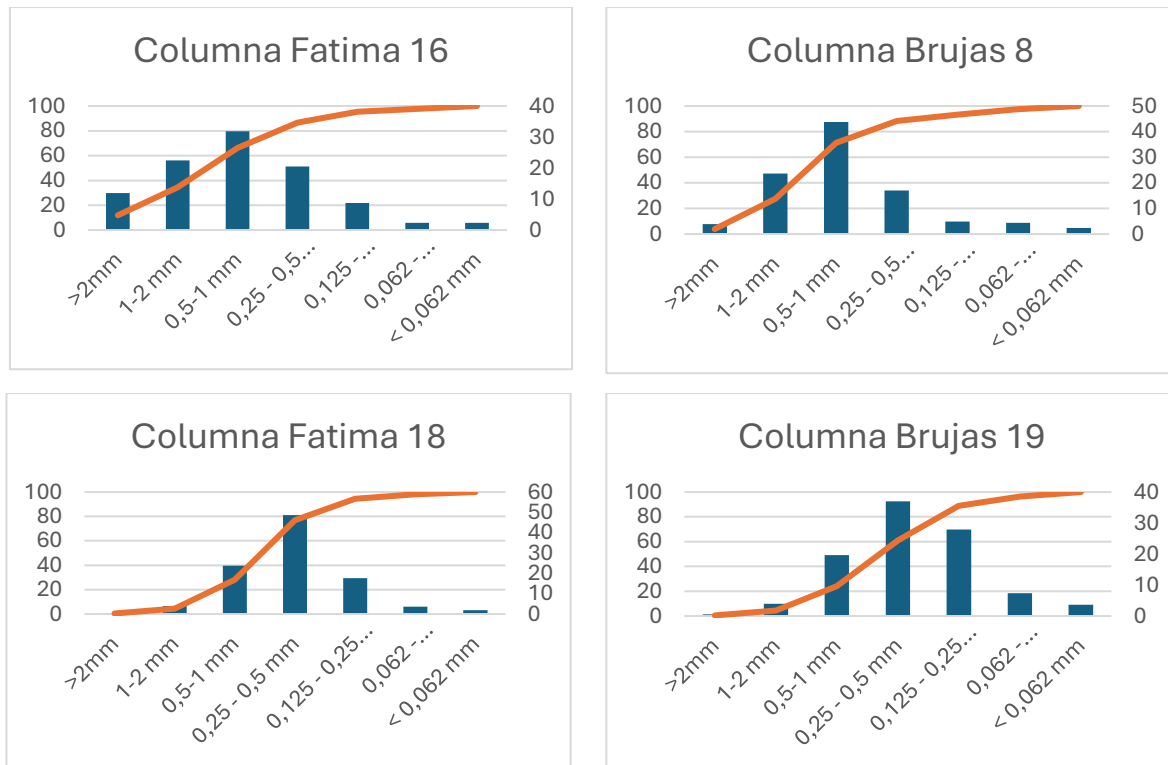


Figura 5. Curvas granulométricas tipo. La columna izquierda muestra el porcentaje acumulado representado por la línea continua, la columna derecha representa el porcentaje individual de cada división. Columna Fátima 29 y Columna Brujas 24 (A,B). Columna Fátima 23 y Columna Brujas 11 (C,D). Columna Fátima 16 y Columna Brujas 8 (E,F). Columna Fátima 18 y Columna Brujas 19 (G, H).

A partir de estas curvas granulométricas y conforme al trabajo de campo, se les definió una clasificación dada por el tamaño de partícula mayoritario y un apellido en base a los otros tamaños minoritarios presentes en los niveles de la columna s de Fátima (Tabla 1) y Brujas (Tabla 2). Esto dio como resultado que para el caso de la columna Fátima de los 30 niveles que componen la columna, un 40% tienen por tamaño mayoritario lapilli (>2 mm) y el apellido de estas dado por el tamaño ceniza gruesa (2 mm - 1 mm). El 10% de las muestras caen dentro de la ceniza gruesa (2 mm - 1 mm), con lapilli y ceniza media como los principales tamaños secundarios. La ceniza media (1 mm - 0.5 mm) representa un 43% de los niveles de esta columna, con la ceniza gruesa, fina y lapilli como tamaños minoritarios en estas muestras. Por último únicamente un 7% corresponden a ceniza fina.

Respecto a la columna de Brujas, la distribución de la clasificación es similar a la columna Fátima, ya que un 44% de las muestras corresponden a tamaño lapilli, con ceniza gruesa como el rango secundario más abundante en estas. Un 15% representan cenizas gruesas, en donde el lapilli y la ceniza media son los tamaños secundarios presentes. En cuanto a la ceniza media, en esta columna su proporción es menor a columna Fátima, representando el 37% de los niveles. También en el caso de la ceniza fina, el porcentaje en comparación es menor ya que solo un 4% de las muestras tienen esta granulometría como la mayoritaria. Esta menor proporción de granulometrías finas podría estar asociada a la ubicación

geográfica de esta columna, ya que se encuentra mas alejada con respecto al cono y topográficamente más alta, por lo que la llegada de cenizas medias y fina estaría condicionada al viento.

Tabla 1. Clasificación de los piroclastos según su granulometría para columna Fátima.

Columna Fátima	Granulometría	Columna Fátima	Granulometría
1	Lapilli - ceniza gruesa	16	Ceniza media a gruesa
2	Lapilli - ceniza gruesa	17	Ceniza media a gruesa
3	Lapilli	18	Ceniza fina
4	Ceniza gruesa - lapilli	19	Ceniza media a fina
5	Ceniza media a media fina	20	Ceniza fina
6	Ceniza media	21	Ceniza media a gruesa - lapilli
7	Ceniza media a media fina	22	Lapilli
8	Ceniza media a media fina	23	Ceniza gruesa a media - lapilli
9	Ceniza gruesa - lapilli	24	Lapilli - ceniza gruesa
10	Ceniza media	25	Lapilli
11	Ceniza media a gruesa	26	Lapilli
12	Ceniza media	27	Ceniza media - lapilli
13	Lapilli	28	Lapilli
14	Ceniza media a gruesa - lapilli	29	Lapilli
15	Lapilli - ceniza gruesa a media	30	Lapilli - ceniza gruesa a media

Tabla 2. Clasificación de los piroclastos según su granulometría para columna Brujas.

Columna Brujas	Granulometría	Columna Brujas	Granulometría
1	Lapilli - ceniza media a gruesa	15	Ceniza media a gruesa - lapilli
2	Lapilli - ceniza gruesa	16	Lapilli - ceniza gruesa
3	Ceniza gruesa - lapilli	17	Lapilli - ceniza gruesa
4	Lapilli - ceniza gruesa	18	Lapilli - ceniza gruesa
5	Ceniza media	19	Ceniza fina a muy fina
6	Ceniza media	20	Ceniza media a gruesa - lapilli
7	Ceniza media	21	Lapilli
8	Ceniza media	22	Ceniza media a gruesa
9	Ceniza gruesa a media - lapilli	23	Lapilli
10	Ceniza media	24	Lapilli
11	Ceniza gruesa a media - lapilli	25	Lapilli
12	Ceniza media a gruesa	26	Lapilli - ceniza gruesa
13	Ceniza gruesa a media - lapilli	27	Lapilli
14	Ceniza media a gruesa		

4.2 Columnas estratigráficas

Como se mencionó en la metodología, además de la clasificación granulométrica también se realizaron dos columnas estratigráficas. En estas columnas se visualizan tanto las variaciones en los tamaños de piroclastos obtenidos con el análisis granulométrico, como algunas características físicas de estos a partir del trabajo de campo realizado por personal

del IGME. La columna de Fátima (Figura 6), ubicada a 1,5 km al SW del cono del Volcán Tajogaite, cuenta con una altura total de 112 cm distribuida entre 30 niveles de piroclastos, que como se mencionó previamente están clasificados según su granulometría. La primera etapa de la erupción, previa al 17 de octubre, está representada aproximadamente por los primeros 27 cm de esta columna. Se observa que la granulometría está dominada para los inicios de la erupción por la emisión de piroclastos tamaño lapilli pardo, que se acumulan en niveles de espesor centimétrico y que presentan ciertas variaciones que por momentos llevan a algunas muestras a tener tamaño de partícula dentro de las cenizas gruesas y medias, algo que indicaría una actividad más explosiva por parte del volcán. El fin de esta primera fase se caracteriza por la presencia de un fino nivel de lapilli y ceniza gruesa con coloración rosa y que según el trabajo de campo realizado por personal del IGME fue depositado el 17 de octubre del 2021. Tras esto, la columna Fátima presenta nuevamente una granulometría de lapilli y ceniza gruesa, destacando el nivel columna Fátima 21 de ceniza gruesa a media y lapilli que tiene un espesor de 22,5 cm, siendo este el de mayor espesor de los niveles que componen la columna Fátima. La sección más superior de la columna y que representa 42 cm de la extensión total, está conformada por una intercalación de capas delgadas de ceniza media y lapilli, con algunas variaciones hacia la ceniza gruesa y en menor medida a ceniza fina, indicando una etapa eruptiva con alternancias entre momentos de actividad explosiva, con mayor emisión de partículas gruesas, y actividad efusiva, donde los piroclastos emitidos son de granulometrías más finas. Finalmente, los niveles superiores de esta columna vuelven a mostrar una mayor proporción de lapilli y en capas de espesor centimétrico, evidenciando una última fase más explosiva de la erupción.

Respecto a la columna Brujas (Figura 6), esta cuenta con una altura de 103 cm y está ubicada a 2,2 km al NE del cono del volcán Tajogaite. La fase eruptiva que tuvo lugar entre el 19 de septiembre y el 17 de octubre, se caracteriza por la emisión preferente de niveles de piroclastos de tamaño lapilli pardo y con espesores que oscilan entre los 5 a 14 cm y en menor proporción niveles de ceniza media y fina que tienen pocos centímetros de grosor en comparación, lo cual indica un periodo de mayor explosividad durante la erupción. En la columna Brujas este momento tiene un espesor absoluto de 60 cm, representando más de la mitad de la altura total de esta. De la misma forma, en la columna Brujas también está presente el nivel de lapilli rosa del 17 de octubre de 2021, que en este caso tiene un grosor de 0,5 cm y se encuentra embebido entre dos niveles de lapilli negro con espesores de entre 3,5 y 4,5 cm, marcando el fin del momento explosivo de la erupción. Tras este nivel rosa, los niveles de piroclastos muestran una alternancia entre capas con alturas de menos de cinco centímetros y que en algunos casos llegan a tener menos de uno, y con variaciones en la granulometría entre ceniza media y ceniza gruesa, con lapilli en menor proporción y limitados

niveles de ceniza fina indicando la alternancia entre momentos de mayor explosividad y otros más efusivos. Esta parte de la columna tiene un espesor total de 30 cm siendo apenas la mitad del tamaño de la primera fase. De forma similar a la columna Fátima, en la columna Brujas las últimas capas de piroclastos vuelven a evidenciar una mayor cantidad de partículas tamaño lapilli negro, corroborando que esta fase final de la erupción fue más explosiva en comparación a la fase inmediatamente anterior.

Realizando una comparación entre las dos columnas, es posible determinar que la columna Brujas tuvo una mayor tasa de sedimentación durante el periodo entre el 19 de septiembre y el 17 de octubre, ya que para casi un mes de erupción se depositaron 60 cm de piroclastos, mientras que en el caso de la columna Fátima, para el mismo periodo de tiempo, el espesor total de material fue de 27 cm. Es decir, para el primer mes se depositó más del doble de material en la columna Brujas que en la columna Fátima. Por otro lado, la transición entre la fase inicial explosiva y la fase de intercalación de capas de granulometría finas y gruesas se presenta de forma diferente en ambas columnas. Esto se evidencia en la figura 6 donde para el caso de columna Brujas tras el nivel rosa, que marca dicha transición, se pasa inmediatamente de la fase con una alta proporción de lapilli y ceniza gruesa en niveles de mayor espesor, a la presencia de capas delgadas de cenizas medias y gruesas, mientras que en columna Fátima entre la capa rosa y la intercalación de niveles finos hay un depósito de lapilli que tiene un espesor de 22,5 cm, que está completamente ausente en columna Brujas y que podría indicar una actividad más explosiva antes de finalmente pasar a esta fase eruptiva de actividad variable. En lo que respecta a la etapa de la erupción, donde se alternan niveles delgados de granulometrías medias, finas y gruesas, también se encontraron diferencias significativas entre las dos columnas estudiadas. En el caso de la columna Brujas, dicha fase está representada por un espesor de 30 cm y sus variaciones en la granulometría se dan principalmente entre ceniza media y ceniza gruesa. En contraposición, la columna Fátima muestra un mayor espesor de depósito de piroclastos para este momento de la erupción, con un total de 42 cm y a diferencia de la columna Brujas con intercalaciones entre ceniza media y lapilli. Esto evidencia no solo una mayor tasa de sedimentación en la zona al SW del cono durante este periodo de tiempo si no también cambios significativos en la granulometría de las partículas que cayeron en estas dos ubicaciones, NE y SW del cono respectivamente.

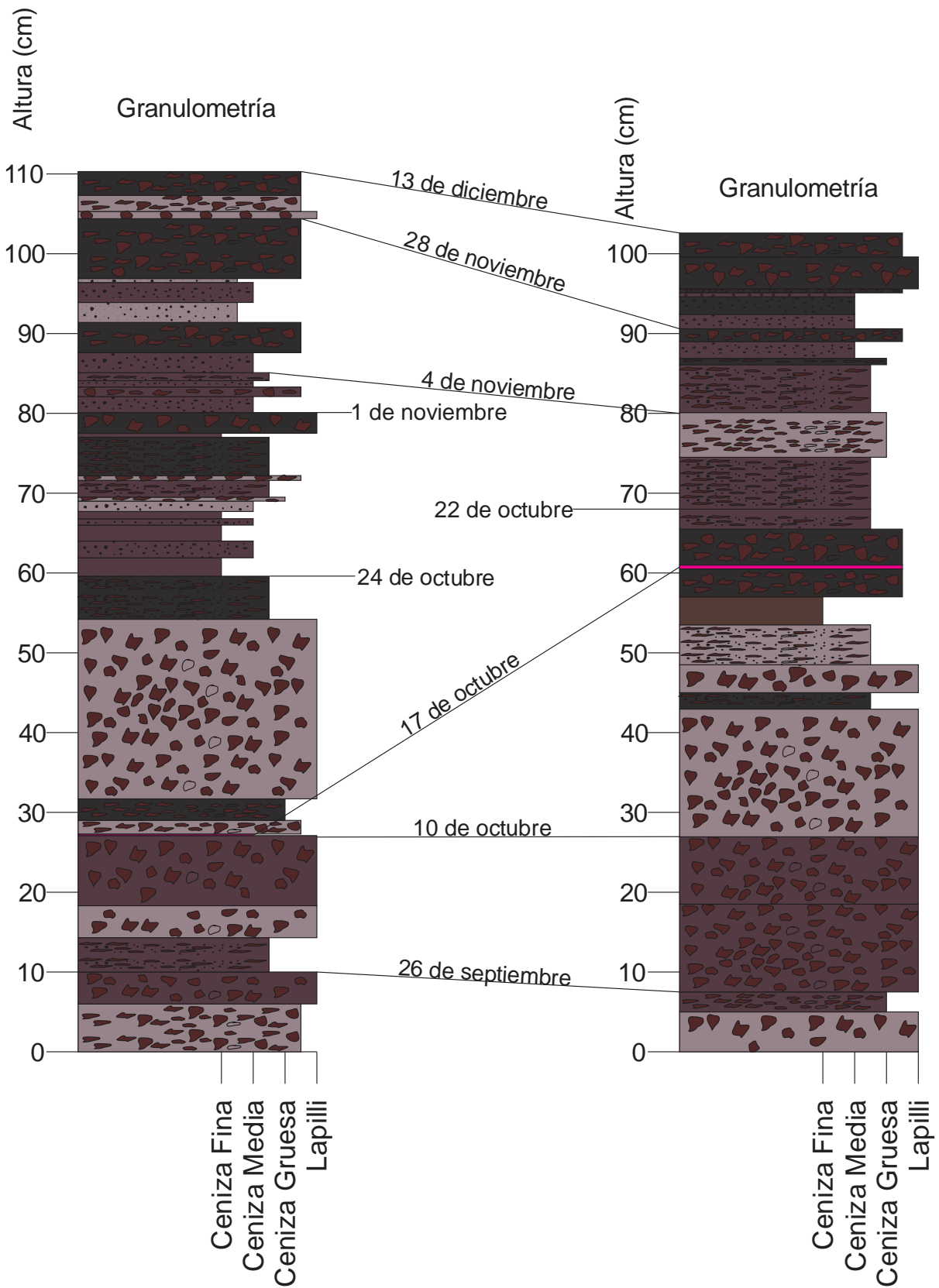


Figura 6. Columnas estratigráficas de piroclastos. Columna Fátima (Izquierda) y Columna Brujas (Derecha). Se marcan las fechas para las que existe control temporal de los niveles. Los colores en la columna representan la coloración de los niveles de piroclasto, siendo estos: pardo/marrón, gris, negro y rosa.

4.3 Geoquímica de elementos

Una vez se realizó la medición con pXRF y pos-procesamiento de los datos en software Excel, se definieron los elementos que mejor representarían la evolución petrológica de la erupción. Según Lemiere (2018) en el uso de pXRF los elementos que dan resultados más confiables son pero no se limitan a: Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cr, Co, Ni y Cu. Mientras que elementos mayores como Si, Mg, Ca y K, si bien no permiten obtener valores cuantitativos si dan resultado cualitativos significativos que pueden ser utilizados para identificar tendencias generales de las variaciones de elementos de importancia petrológica. Estos elementos en conjunto se utilizan ya que los cambios en sus concentraciones permiten relacionarlos con las diferentes etapas de la erupción y las diferencias en la composición de los magmas que son aportados durante esta. Tomando en cuenta lo anterior, se escogieron como elementos mayores para el análisis del comportamiento cualitativo de la erupción del volcán Tajogaite el Mg, Ca y K en base a los trabajos Ubide et al. (2023) y Day et al. (2022) que utilizaron algunos de estos elementos mayores para analizar la evolución de este fenómeno natural. Por otro lado, a nivel de elementos menores y traza, estos trabajos usaron principalmente Ni, Cr, Sr, Y, Zr, así mismo por la naturaleza de los análisis de laboratorio realizados en estos estudios se utilizaron algunos Elementos de Tierras Raras (REE, por sus siglas en inglés) como Nd, La e Yb para complementar los resultados obtenidos con los elementos mayores. En este trabajo se analizaron el Ni y Cr para identificar el comportamiento de elementos cuyas concentraciones aumentan con la maficidad del magma y Sr, Zr y Nb, como elementos que ante aumentos en la maficidad del magma, disminuyen su concentración. Respecto a los REE, no fueron considerados para el estudio de la evolución de la erupción debido a que los resultados de la medición de estos elementos con pXRF dieron valores inferiores al límite de detección del equipo, algo esperable según lo comentado en el trabajo de Lemiere (2018).

4.3.1 Elementos mayores

Si bien, como se mencionó previamente, los elementos mayores no ofrecen resultados cuantitativos confiables, sí permiten identificar tendencias y variaciones a nivel cualitativo que dibujan la evolución de la erupción, por lo que los valores de concentración reflejan cambios a lo largo de la erupción.

Los elementos mayores analizados, como se observa en la figura 7, muestran que, para el caso de Ca y el Mg, en las etapas iniciales de la erupción, presentan valores entre los 5,9 wt% y 6,5 wt% para Ca y 1,2 wt% y 1,5 wt% para Mg, siendo estos los valores medidos más bajos en ambas columnas, algo conforme con la evolución petrológica de la erupción. Posteriormente para ambas columnas los datos de estos elementos aumentan progresivamente. Es tendencia general para el Ca y el Mg se mantiene durante la mayoría

de la erupción en concordancia con cambios en la composición de las magmas, hasta llegar a valores máximos que rondan 8,1 wt% para Ca y 2,3 wt% para Mg. Hacia el final de la erupción se observa en las gráficas que la tendencia se invierte y las concentraciones de Ca y Mg se reducen significativamente indicando cambios en el aporte de magmas básicos y el fin definitivo de la erupción. Por otro lado, el K muestra una tendencia inversa a la que presentan el Ca y el Mg. En este caso las concentraciones de K inician en los valores máximos registrado y que rondan 1,2 – 1,3 wt%, lo que concuerda con aporte de magmas más evolucionados al inicio de la erupción, para posteriormente disminuir periódicamente conforme avanza el tiempo. Esta disminución en las concentraciones de K se mantiene hasta que se alcanzan valores mínimos en torno a 0,88 – 0,9 wt%, a partir de los cuales hay un cambio en la tendencia y los niveles de K aumenten hasta llegar a concentraciones cercanas a 1,1 wt% en la etapa final de la erupción.

Si bien se observa que en las columnas de Brujas y Fátima las tendencias son muy parecidas, en algunas partes de las gráficas los cambios en las concentraciones de los elementos mayores se dan de distinta forma. Para el caso del Ca en el punto en que empieza el aumento de las concentraciones, se observa que en la columna Fátima hay un salto muy rápido entre aproximadamente 6,5 wt% y 7,1 wt%, mientras que en la columna Brujas este mismo cambio se da de forma más gradual y no es tan inmediato. Luego a medida que las concentraciones siguen aumentando el comportamiento de las columnas cambia y para el caso de la columna Fátima las variaciones se dan de una forma gradual y en la columna Brujas esto se da de forma más rápida, pasando de concentraciones de 7,3 wt% a 7,8 wt% de un nivel a otro. Algo muy similar es observable para el Mg, donde en el caso de la columna Fátima hay un salto bastante abrupto desde concentraciones de 1,4 wt% a 1,8 wt% entre niveles estratigráficos, cambio que en la columna Brujas se da de forma más lenta, abarcando varios niveles de piroclastos. Y del mismo modo al Ca, las concentraciones de Mg presentan saltos más rápidos hacia las etapas finales de la erupción en la columna Brujas y más graduales en la columna Fátima. Por último, las concentraciones de K varían de forma similar en ambas columnas durante la primera etapa de la erupción, disminuyendo de forma rápida entre los niveles de ceniza y lapilli para posteriormente llegar a una pendiente más llana, que se mantiene similar en ambos casos durante gran parte de la gráfica. Las similitudes en estas variaciones para ambas columnas se rompen en los momentos finales de la erupción, donde para la columna Brujas los cambios en concentraciones se dan de forma más rápida en comparación con la columna Fátima

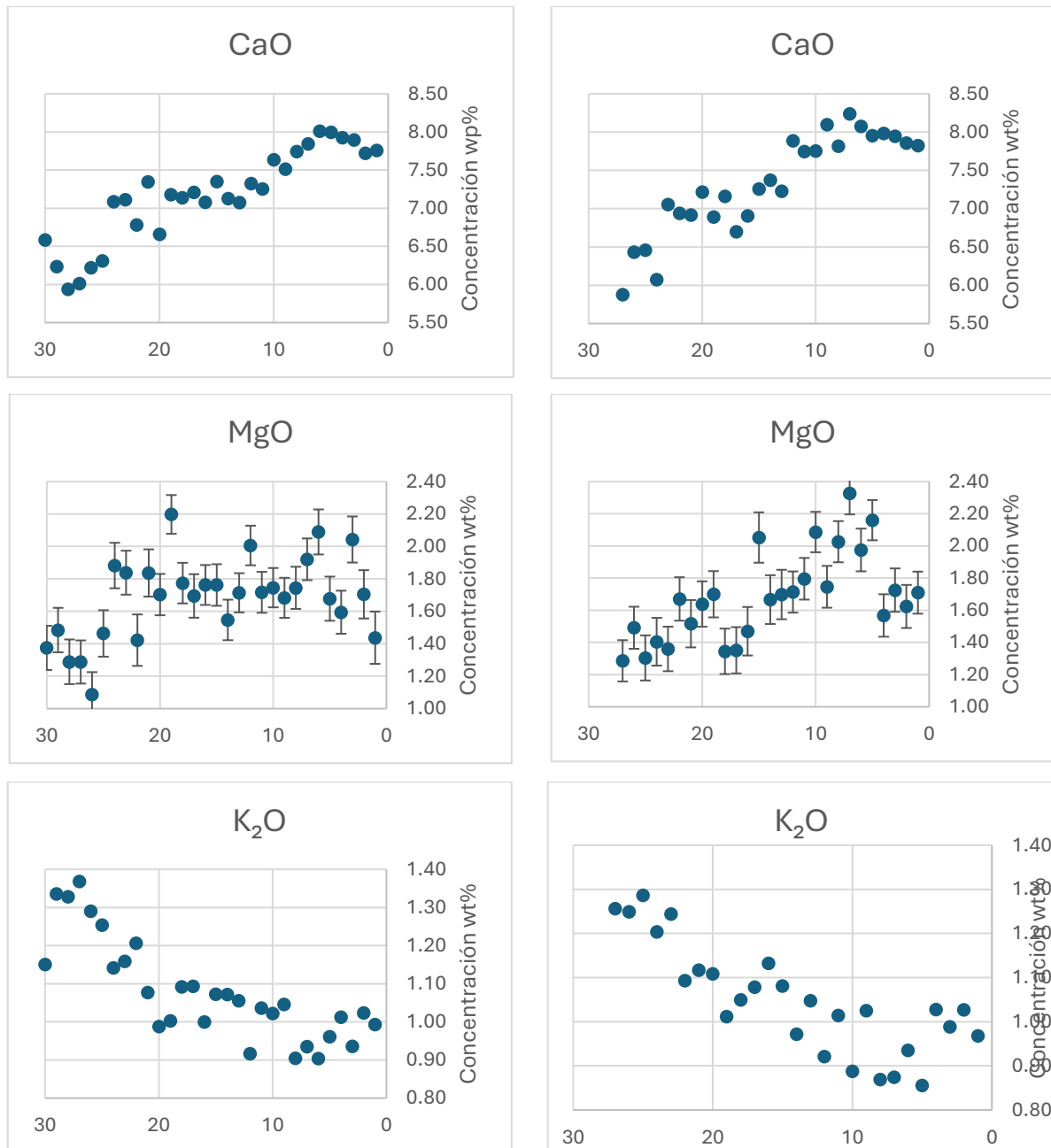


Figura 7. Elementos mayores en forma de óxidos. Columna Fátima a la izquierda, columna Brujas a la derecha. La evolución de la erupción, representada por los niveles de las columnas, avanza en el sentido de izquierda a la derecha.

4.3.2 Elementos menores y traza

A diferencia de los elementos mayores, en algunos elementos traza el uso de pXRF si da resultado que a nivel cuantitativo tienen un grado de confianza alto, por lo que no sólo se pueden utilizar para identificar tendencias, sino también para utilizar estos resultados como valores absolutos de las concentraciones para los elementos analizados.

Como se mencionó previamente, los elementos menores y traza fueron divididos entre elementos que aumentan con la maficidad del magma (Ni, Cr) y elementos que disminuyen ante una mayor maficidad (Sr, Zr, Nb). En la Figura 8 se observan las variaciones de los

elementos Ni y Cr a lo largo de la erupción. Aquí se evidencia que tanto Ni como Cr presentan una tendencia general muy similar a la que se vio en los elementos mayores (Ca, Mg), iniciando en valores bajos de concentración y aumentando durante el avance de la actividad volcánica. Hablando de forma específica, el Ni inicia la erupción con concentraciones entre 45-65 ppm dependiendo de la columna, y posteriormente hay un aumento significativo llegando a valores entre 90-100 ppm, indicando un cambio composicional importante. A partir de este punto, las variaciones en las concentraciones en el Ni se mantienen relativamente estables, oscilando entre 80 a 110 ppm. Sin embargo, cabe denotar que en la columna Fátima se observan durante esta fase dos valores anómalos de concentración para el Ni, correspondiendo específicamente a los niveles 12 y 19, con 125 y 135 ppm respectivamente. Por ello se realizó un análisis mineralógico de las muestras para determinar posibles razones para estos. Finalmente en la última etapa de la erupción, se identifican dos agrupaciones de concentraciones, una donde estas varían entre 110 ppm y 140 ppm, siendo estos los valores más altos registrados y la otra con menor variabilidad desde 84 ppm hasta 104 ppm.

El Cr presenta un comportamiento similar al Ni. La cantidad de este elemento inicia entre 25 ppm y 50 ppm y aumentan de forma rápida en ambas columnas hasta estabilizarse en concentraciones alrededor de 150-180 ppm. Al igual que con el Ni, se observan dos valores anómalos en la columna Fátima, tanto en el nivel 19 como en el 12, complementando los datos de concentraciones de Ni y sugiriendo variaciones mineralógicas en estas muestras. La estabilización de los valores se mantiene hasta llegar a la fase final de la erupción, a partir de la cual, las concentraciones de Cr presentan variaciones que se diferencian según la columna que se observe. Para el caso de la columna Fátima inicialmente los valores disminuyen desde 177 ppm hasta 99 ppm, para posteriormente subir hasta 204 ppm en el final de la actividad volcánica. Mientras que en la columna Brujas, se diferencian dos grupos de muestras, así como en el Ni, uno de estos con valores más altos y que oscilan entre 252 ppm hasta 171 ppm, identificando en estos niveles las concentraciones más altas de Cr. Por otro lado, el otro grupo presenta una disminución significativa en Cr y se ubica en una media de 125 ppm, con mínimos de 67 ppm y máximas de 156 ppm.

En general tanto para el Ni como el Cr, ambas columnas presentan comportamientos muy similares, salvo por algunos puntos en específico donde los cambios de concentración de estos elementos se dan más abruptamente entre columnas. Un ejemplo de esto se ve en el aumento rápido de las concentraciones iniciales de Ni, que para el caso de la columna Fátima se da en un salto de un nivel a otro de esta columna, pasando de 59 a 92 ppm, mientras que en la columna Brujas este incremento se da de forma más paulatina. Otro punto en el cual se identificaron diferencias significativas en las concentraciones en las columnas corresponde a la fase final de la erupción, pues para el caso del Ni en la columna Brujas se diferencian con

mayor facilidad los dos grupos de muestras y en la columna Fátima estos no están tan diferenciados, y con el Cr, estas agrupaciones solo se observan en la columna de Brujas, mientras que en la columna de Fátima los valores se mantienen más juntos.

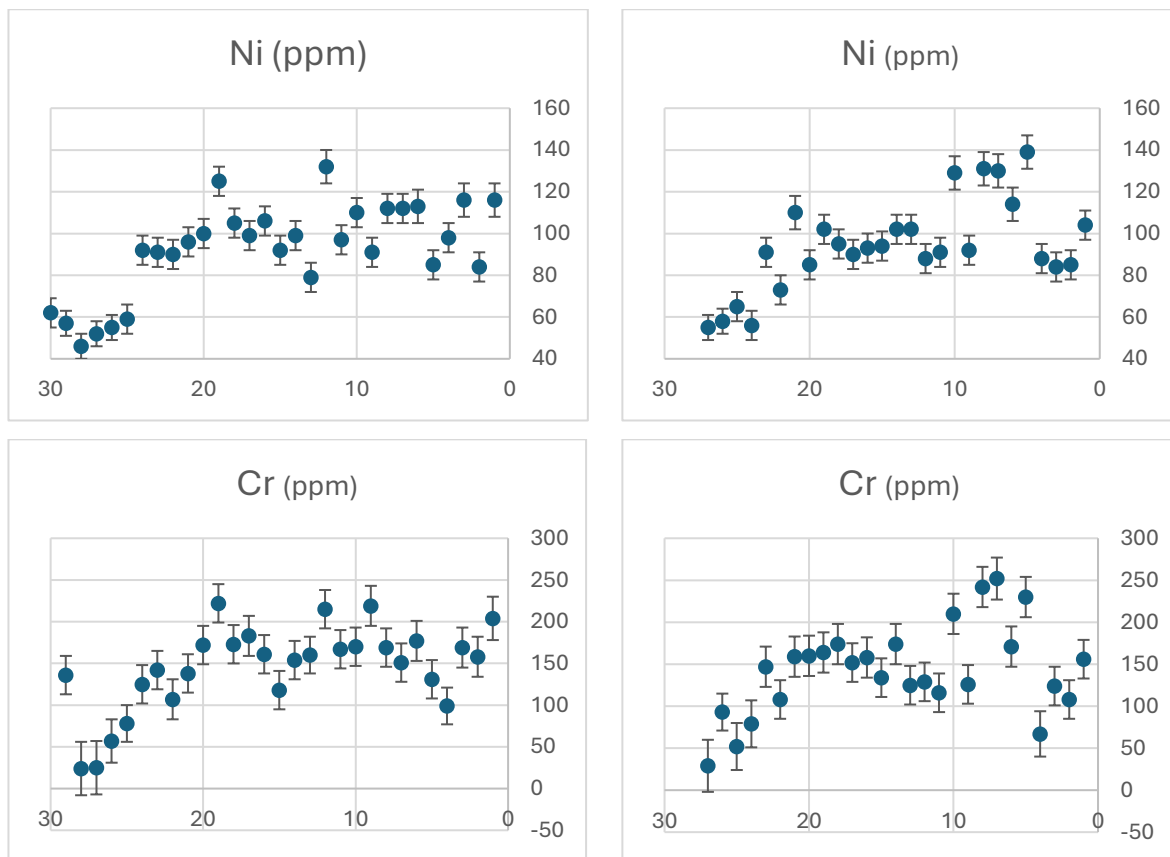


Figura 8. Elementos menores y traza. Columna Fátima a la izquierda, Columna Brujas a la derecha. La evolución de la erupción, representada por los niveles de las columnas, avanza en el sentido de izquierda a la derecha.

En lo que respecta a los elementos cuya concentración disminuye con la maficidad, su comportamiento durante este fenómeno natural se ve reflejado en la Figura 9. De forma general estos elementos tienen una dinámica similar a la observada con el K, mientras que las tendencias son inversas a las de los asociados a una mayor maficidad, tendiendo a iniciar en concentraciones relativamente altas, presentar un descenso rápido de estas, posteriormente este descenso se hace más progresivo, llegando a estabilizarse y en la etapa final evidenciar un pequeño aumento de los valores. Cabe mencionar que para la columna Fátima, los tres elementos (Zr, Nb, Sr) analizados muestran un aumento en sus concentraciones durante los primeros días de la erupción antes de iniciar el rápido descenso de estas que es visible en ambas columnas (Figura 9).

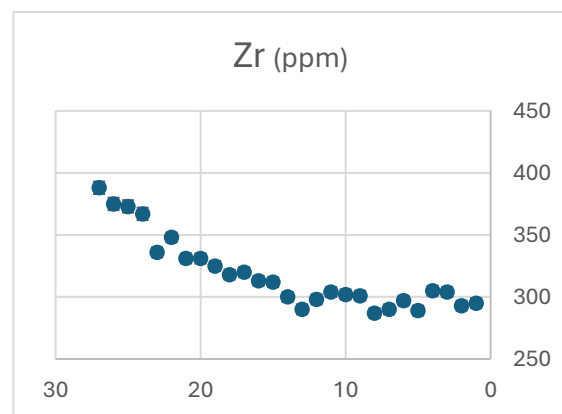
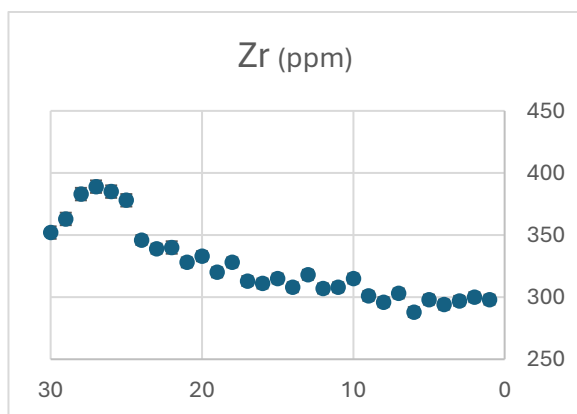
En el caso específico del Zr, esta tendencia general está bien marcada, con los valores máximos para este elemento registrados durante la primera fase de la erupción y concentraciones entre 352 y 382 ppm, luego una rápida disminución de estas pasando de 378 a 346 ppm en el caso de la columna Fátima y de 367 a 336 ppm en la columna Brujas

(estos cambios de un nivel estratigráfico a otro). A partir de este punto la disminución de las concentraciones de Zr continua con una pendiente más baja. En la columna Fátima dicho cambio se da en 18 niveles de la columna y con variaciones en los valores desde 346 ppm hasta 288 ppm. En lo que respecta a la columna Brujas, si bien la disminución de las concentraciones de este momento de la erupción es menos pronunciada en comparación a la primera etapa, los valores cambian más rápidamente en esta con respecto a la columna Fátima. Finalmente, en los niveles superiores de ambas columnas se observa que hay un leve repunte de las concentraciones, indicando posibles cambios en la composición de los magmas en la fase final de la actividad.

Con respecto al Nb, las concentraciones máximas registradas se encuentran alrededor de 100 ppm, para la columna Fátima entre 99 y 102 ppm y en la columna Brujas de 97 a 101 ppm. Manteniendo la tendencia de los elementos que disminuyen con la maficidad, estas concentraciones más altas se dieron en los niveles de mayor profundidad de ambas columnas. Estos valores son seguidos por un descenso en los valores de Nb, que se da de forma rápida en la columna Fátima y de forma más paulatina en la columna Brujas. En la columna Fátima las concentraciones pasan de 96 a 84 ppm de un nivel a otro, mientras que en la columna Brujas se da desde 97 ppm hasta 81 ppm en aproximadamente en 5 niveles. Al igual que con el Zr, las concentraciones de Nb continúan disminuyendo conforme avanza la erupción. Con una pendiente más reducida, tendiendo a equilibrarse los valores, aunque presentando una variabilidad en las concentraciones a lo largo de esta etapa de la erupción. Estos valores pasan de 84 a 73 ppm en la columna Fátima y de 82 a 69 ppm en la columna Brujas, destacando que en esta última hay una mayor variación de los valores y el descenso no es tan lineal como lo llega a ser en la columna Fátima. La tendencia se mantiene durante gran parte de la erupción y solo es interrumpida al final de la actividad volcánica. En esta última etapa, las concentraciones tanto en la columna Fátima como en la columna Brujas presentan un aumento ligero, en la columna Fátima este es de 4 ppm mientras que en la columna Brujas es un poco más significativo pasando de 69 ppm a 77 ppm. Posterior a esto los niveles superficiales registran una última disminución de las concentraciones justo antes del final definitivo de la erupción.

El último elemento analizado fue el Sr. Como primera aproximación a los resultados, este presenta las concentraciones más altas que cualquiera de los elementos menores utilizados, representando en general al menos un 0,1% del peso de las muestras analizadas. En el caso de la columna Fátima, la evolución del Sr está marcada por concentraciones máximas al inicio de la erupción y que rondan valores entre 1220 y 1330 ppm. Posteriormente estas tienen una disminución muy rápida pasando de 1271 a 1127 entre los niveles estratigráficos 24 y 25, manteniendo la tendencia general de esta columna, donde los cambios de concentración en

este momento de la erupción se reflejan en saltos muy marcados. Tras este cambio rápido, la cantidad de Sr en las muestras continúa disminuyendo pero ahora de forma más progresiva, pasando de 1107 ppm hasta 1100 ppm entre los niveles 23 y 6. Sin embargo, en esta etapa con una pendiente más pequeña, la disminución de las concentraciones no es lineal si no que presenta una variabilidad interna con pequeñas subidas y bajadas en los valores. Este momento de la erupción finaliza cuando se rompe la tendencia general de disminución de la cantidad de Sr y las concentraciones de este aumentan significativamente hasta el final de la erupción, pasando de 1100 ppm en el nivel 6 a 1085 en el nivel 1. En la columna de Brujas también se identifica la misma tendencia general, salvo por la ausencia de un aumento inicial, ya que en esta las concentraciones de Sr disminuyen a partir del nivel más profundo. Para el inicio de la erupción la cantidad de Sr es la máxima y se ubica en 1361 ppm, pasando de forma rápida a 1107 ppm desde el nivel 27 al 23. A partir del nivel 22, la reducción de las concentraciones de Sr se hace menos pronunciada y se mueve desde 1138 ppm hasta 1018 ppm entre el nivel 22 y el 5 de la columna Brujas. Esta etapa se caracteriza por presentar una variabilidad en las concentraciones que se ve reflejada en aumentos y descensos no muy pronunciados entre diferentes niveles estratigráficos de la columna. Del mismo modo que ocurre en la columna Fátima, la etapa final de la erupción se ve reflejada en un aumento importante en las concentraciones de Sr, que para este caso es más pronunciado, ya que pasa de 1018 ppm 1107 ppm del nivel 5 al 4. Posterior a este aumento en los valores, hay nuevamente una disminución pero la cantidad de Sr en los piroclastos nunca vuelve a ser tan baja como en los niveles anteriores, quedando al final de la erupción en 1049 ppm.



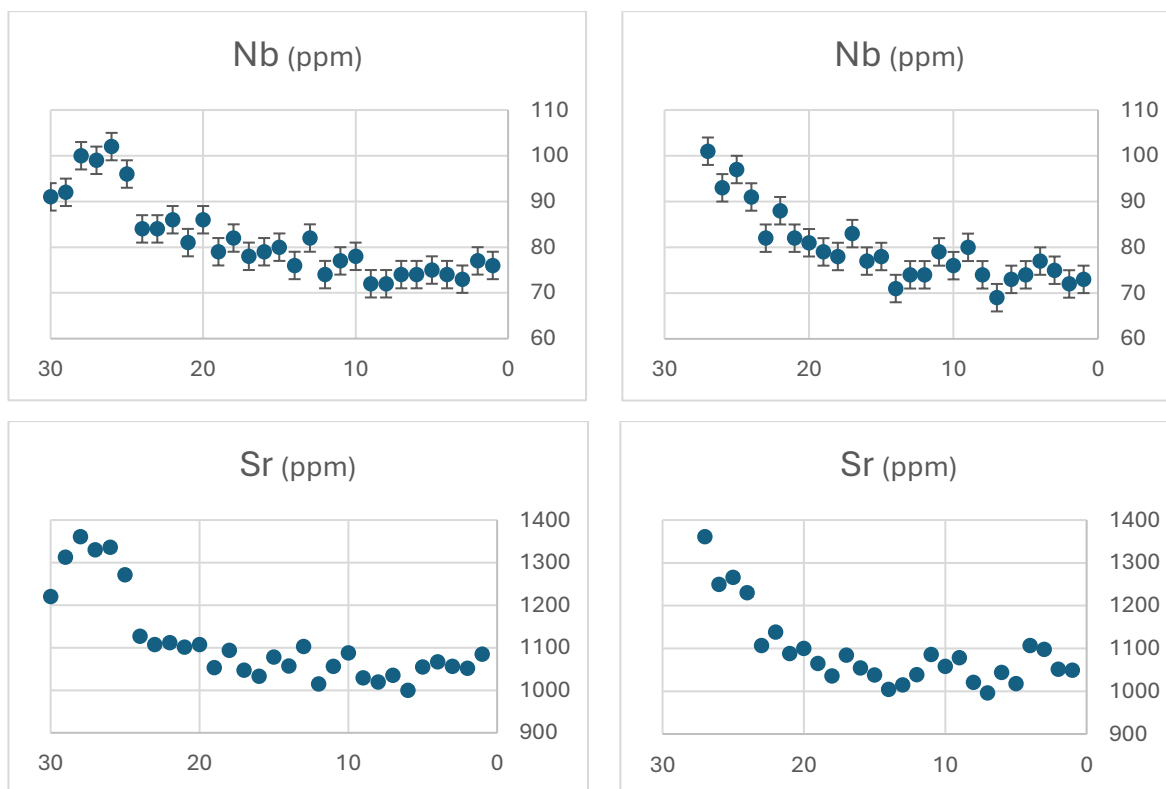


Figura 9. Elementos menores y traza. Columna Fátima a la izquierda, columna Brujas a la derecha. La evolución de la erupción, representada por los niveles de las columnas, avanza en el sentido de izquierda a la derecha.

4.4 Composición mineralógica

Como se mencionó en los elementos menores y traza que aumentan con la maficidad, en los niveles 12 y 19 de la columna Fátima se encontraron valores para el Ni y Cr que aparentemente son anómalos ya que destacan por sobre los valores de los niveles adyacentes. A través de observaciones con lupa binocular, se realizó un análisis cualitativo para identificar los componentes mineralógicos de las muestras: taquilita, vidrio volcánico de forma irregular y lustre mate, sideromelana, vidrio volcánico de forma irregular y alargada (con lustre vitreo acaramelado), cristales minerales y fragmentos líticos. Se buscaba relacionar variaciones entre estos componentes que pudieran explicar las concentraciones de estos niveles, ya que ante mayores concentraciones de Ni y Cr, sería esperable una proporción de cristales minerales, como olivino o piroxeno.

Conforme con la metodología, se analizaron las muestras correspondientes a los niveles 11, 12 y 13 de la columna Fátima, siendo el nivel 12 uno de los que presentó valores superiores a la media para Ni y Cr y con 11 y 13 como niveles control para comparar la composición mineral. En la figura 10 se observan las diferentes mineralogías encontradas en las tres muestras que fueron analizadas. A nivel general en la fracción granulométrica de 1-0,5 mm la composición está dada en su gran mayoría por sideromelana y taquilita, mientras que en menor proporción se encontraron algunos fragmentos líticos. En cuanto a cristales minerales, estos eran muy escasos y de difícil identificación. El nivel 12 (Figura 10: a, b, c) estaba

representado por proporciones muy similares de sideromelana y taquilita, aunque era apreciable una cantidad ligeramente mayor de taquilita sobre sideromelana. El nivel 13 (Figura 10: d, e, f) se caracterizó por presentar también una composición mayoritaria de taquilita y sideromelana, con un poco más de fragmentos líticos que el nivel 12, pero no llegando a ser significativo como para considerarlo como un factor influyente en la composición. En cuanto a la proporción entre los dos componentes mayoritarios, se observó que había más sideromelana que taquilita en esta muestra pero no por un gran margen. El nivel 11 presentó una composición mineral similar al nivel 13 por lo que no se realizó toma de fotos de esta muestra. Respecto al contenido de cristales minerales, se encontraron muy pocos en los niveles analizados (11,12,13), contando un promedio de 3 cristales, probablemente de olivino en las muestras. Sin embargo, debido a que no se encontró una gran diferencia en la cantidad de cristales de olivino, mineral al que podrían estar asociados los niveles anómalos de Ni, se descarta que las concentraciones encontradas en los niveles 12 y 19 de la columna Fátima estén relacionadas a un mayor contenido de olivino en estas capas de piroclastos.

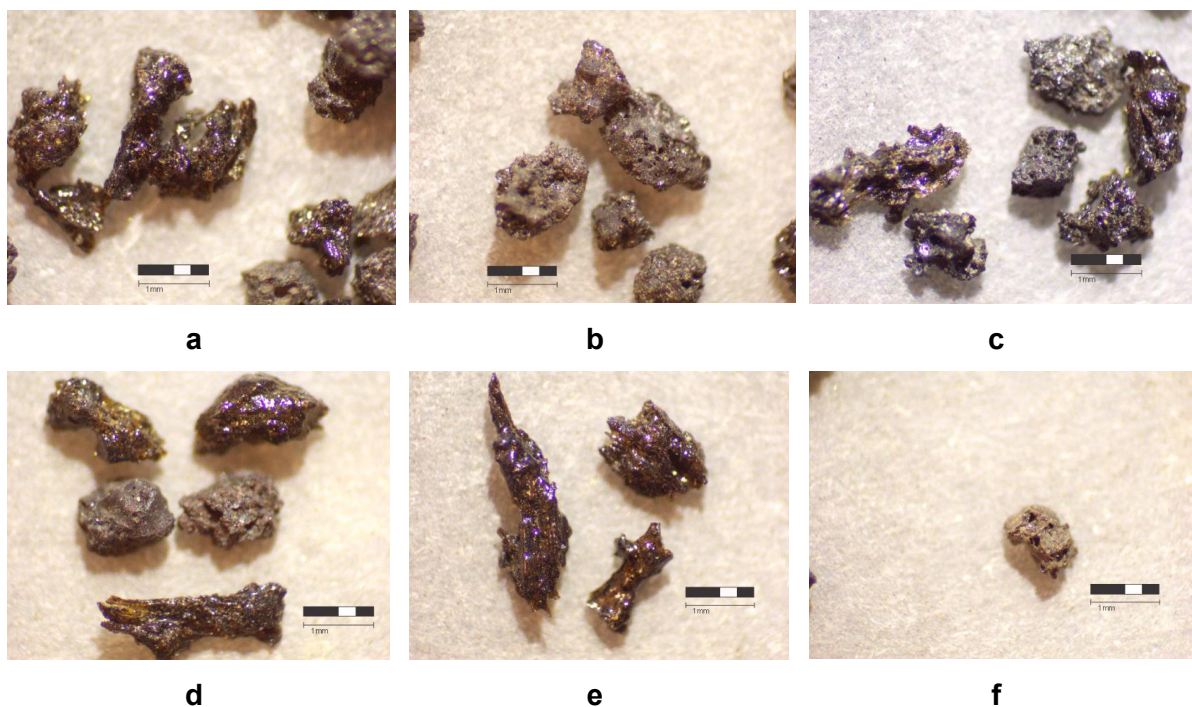


Figura 11. Vista en lupa binocular de piroclastos fracción 1-0.5 mm (Ceniza media). Escala 1 mm. a: Sideromelana en nivel 12. b: Taquilita en nivel 12. c: Comparativa de sideromelana y taquilita en nivel 12. d: Comparativa entre sideromelana y taquilita en nivel 13. e: Sideromelana acicular e irregular en nivel 13. f: fragmento lítico en nivel 13.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Variaciones en la tasa de sedimentación al NE y SW del volcán

En el apartado de resultados, donde se compararon los espesores de los niveles de piroclastos para ambas columnas, se observó que para diferentes momentos de la erupción hubo mayores espesores de nivel y granulometrías variables en alguna de las dos columnas. Las variaciones sobre los espesores de los niveles estarían asociadas a cambios en la intensidad y dirección de los vientos, mientras que los cambios en la granulometría de los piroclastos estarían marcando las fases de la erupción, que variaron entre explosivas y efusivas. Hasta ese punto, solo se describieron las diferencias entre ambas columnas sin tomar en cuenta el control temporal. Para analizar la dinámica deposicional entre la columna Fátima y la columna Brujas, se tienen definidas algunas fechas en ambas columnas y los niveles de piroclastos asociados a estas (Tabla 3).

Tabla 3. Control temporal de niveles de piroclastos en columnas Fátima (izq.) y Brujas (der.).

Columna Fátima	Fechas	Columna Fátima	Fechas	Columna Brujas	Fechas	Columna Brujas	Fechas
1	13 diciembre	16		1	13 diciembre	15	22 octubre
2		17		2		16	
3		18		3		17	17 octubre
4	28 noviembre	19		4		18	
5		20		5		19	
6		21	24 octubre	6		20	
7		22		7		21	
8		23		8		22	
9		24	17 octubre	9	28 noviembre	23	
10		25	10 octubre	10		24	10 octubre
11	4 noviembre	26		11		25	
12		27		12		26	26 septiembre
13	1 noviembre	28		13	4 noviembre	27	
14		29	26 septiembre	14			
15		30					

A partir de estas fechas se dividió la erupción en periodos, 8 periodos de tiempo en la columna Fátima y 7 para la columna Brujas (Tabla 4). El primer periodo de tiempo es igual en ambas columnas y es coetáneo con la etapa de la erupción previa al parón del 27 de septiembre (Ubide, et al., 2023). En ambas columnas hay dos niveles de piroclastos que representan este momento de la erupción (Tabla 3) y con tasas de sedimentación similares, pero siendo ligeramente mayor en la columna Fátima. El segundo periodo ocurre durante los mismos días en ambas columnas, para el caso de la columna Fátima hay cuatro niveles, mientras que en la columna Brujas hay dos niveles representando este tiempo (Tabla 3). Sin embargo, en ambos casos tanto el espesor como la tasa de sedimentación para este periodo es similar

(Tabla 4). En el tercer periodo se observa por primera vez una diferencia significativa entre las dos columnas. Para un mismo tiempo, en la columna Brujas se depositaron siete niveles, con espesor total de 34 centímetros y una tasa media de 4,86 cm/día, mientras en la columna Fátima, solo se depositó un nivel con un espesor de 1,9 centímetros y una tasa media de apenas 0,27 cm/día. A partir del 17 de octubre y hasta el 4 de noviembre, los periodos entre ambas columnas no abarcan los mismos días, como se presenta en la tabla 4. Sin embargo, entre estas dos fechas la tasa media de sedimentación de la columna Fátima fue en promedio 3,14 cm/día y 13 niveles de piroclasto, mientras que en la columna Brujas esta fue inferior con apenas 1,20 cm/día y únicamente 4 niveles. Desde el 4 de noviembre los periodos vuelven a ser iguales en ambas columnas. Entre el 4 y el 28 de noviembre la tasa media de sedimentación baja significativamente en las dos columnas, pero se mantiene más alta en la columna Fátima, siendo casi el doble que la columna Brujas (Tabla 4) y con un mayor número de niveles (Tabla 3). El último periodo también se caracteriza por tasas medias más bajas, en comparación a otros momentos de la erupción. Pero en este caso es la columna Brujas la que presentan una mayor tasa media de sedimentación con 0,80 cm/día, por encima de 0,39 cm/día en la columna Fátima, así como un mayor número de niveles de piroclastos (Tabla 3).

Tabla 4. Tasas de sedimentación durante la erupción, asumiendo una tasa continua durante toda la erupción. Columna Fátima (izq.) y Columna Brujas (der.)

Columna Fátima				Columna Brujas			
Periodo	Días	Espesor (cm)	Tasa (cm/día)	Periodo	Días	Espesor (cm)	Tasa (cm/día)
9/19/21-9/26/21	8	10	1,25	9/19/21-9/26/21	8	7.5	0,94
9/26/21-10/10/21	14	17.1	1,22	9/26/21-10/10/21	14	19.5	1,39
10/10/21-10/17/21	7	1.9	0,27	10/10/21-10/17/21	7	34	4,86
10/17/21-10/24/21	7	30.6	4,37	10/17/21-10/22/21	5	7	1,40
24/10/21-11/1/21	8	20.5	2,56	10/22/21-11/4/21	12	12.1	1,01
11/1/21-11/4/21	2	5	2,50	11/4/21-11/28/21	24	10.5	0,44
11/4/21-11/28/21	24	19.3	0,80	11/28/21-12/13/21	15	12	0,80
11/28/21-12/13/21	15	5.9	0,39				

Estos periodos de tiempo pasan a representar tres etapas principales en la erupción como se observa en la Figura 12. La primera etapa, entre el 19/09/2021 y el 10/10/2021 tuvo una tasa

de sedimentación media de 1,2 cm/día. La segunda etapa, desde el 10/10/2021 hasta el 4/11/2021, presenta un aumento significativo en las tasas de sedimentación, siendo esta de media 3,3 cm/día, dándose primero en la columna de Brujas y unos días después en la columna de Fátima, en función de los vientos predominantes. Estas dos primeras etapas se caracterizaron por una mayor abundancia de piroclastos de tamaño lapilli y ceniza gruesa, así como una mayor explosividad de la erupción, explicando en parte por qué las tasas de sedimentación son más altas en estos periodos de tiempo. Durante la última etapa, desde el 4/11/2021 hasta el fin de la erupción, las tasas disminuyen y se ubican en promedio como las más bajas de toda la erupción con una media de 0,6 cm/día. Esta última etapa está caracterizada por que los piroclastos son en general de tamaños más finos y con menor cantidad de lapilli, así como una actividad menos explosiva del volcán.

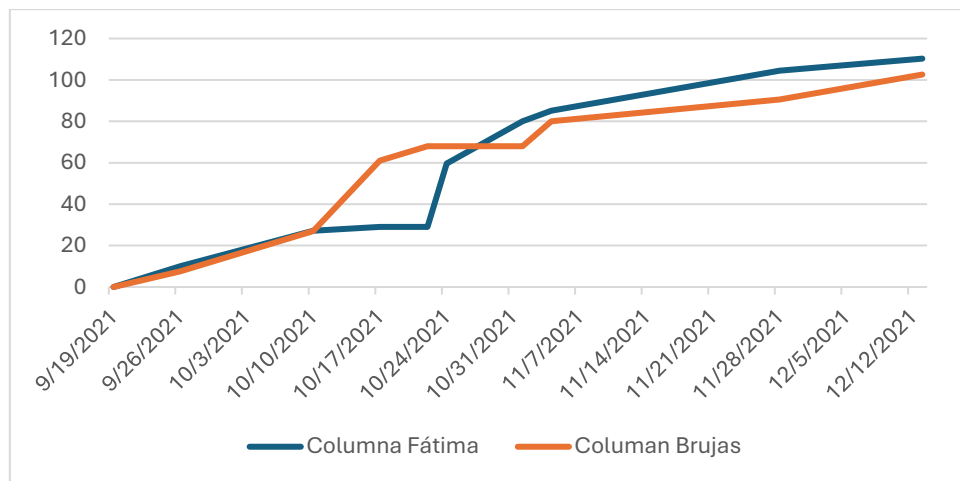


Figura 12. Tasa de sedimentación y espesor acumulado para columna Fátima y columna Brujas.

En base a lo anterior, se puede decir que, debido al registro de la columna de Brujas para los días previos al 17 de octubre, esta es mejor para observar la evolución de los elementos para este periodo de tiempo. Al tener más niveles estratigráficos, va a tener mayor cantidad de medidas con pXRF, mostrando de forma más completa la evolución de los elementos en el tiempo. Esto se ve representado en los resultados de pXRF, ya que mientras que en la columna de Fátima los cambios en las concentraciones se dan de forma inmediata entre el 10 y el 17 de octubre, en la columna de Brujas estas variaciones se dan más progresivamente para esas mismas fechas. Por otro lado, a partir del 17 de octubre la columna de Fátima tiene un mejor registro a comparación de la columna Brujas. Esto es debido a un mejor control de fechas, así como a un mayor número de niveles analizados con pXRF. Esto permite identificar la evolución de los elementos para estas fechas de forma más completa. Esto se evidencia, en que a partir del 17 de octubre, los datos en la columna Fátima son más estables, mientras que en la columna Brujas, los datos parecen tener una mayor variabilidad

5.2 Dinámica de los vientos durante la erupción

En base a lo anterior, se identifica que hay variaciones en las tasas de sedimentación entre las dos columnas, siendo mayor en la columna de Brujas por momentos y mayor en la columna de Fátima en otros. Una razón a la que se podría llegar a atribuir esta diferencia está relacionada con los vientos dominantes en la isla de La Palma: los vientos del NE, también conocidos como Alisios del Noreste, y los vientos del SW (Bonadonna, et al., 2022). Para corroborar si estos vientos explican este comportamiento, se utilizaron datos del ERA5 (Hersbach, et al., 2023) para analizar tanto las direcciones de los vientos como sus velocidades. Lo primero que se encontró a partir de estos datos, es que durante la erupción la dirección preferencial de los vientos fue del NE para las dos alturas analizadas. Las velocidades oscilaron en promedio entre 6,1 y 11,3 m/s a 10m, con mínimos de 0,9 m/s y máximos de 13,9 m/s (Figura 13, izq.). Para 100 m las velocidades de los vientos estuvieron entre 7,3 y 13,6 m/s, con máximos de 16,8 m/s y mínimos de 0,9 m/s (Figura 13, der.).

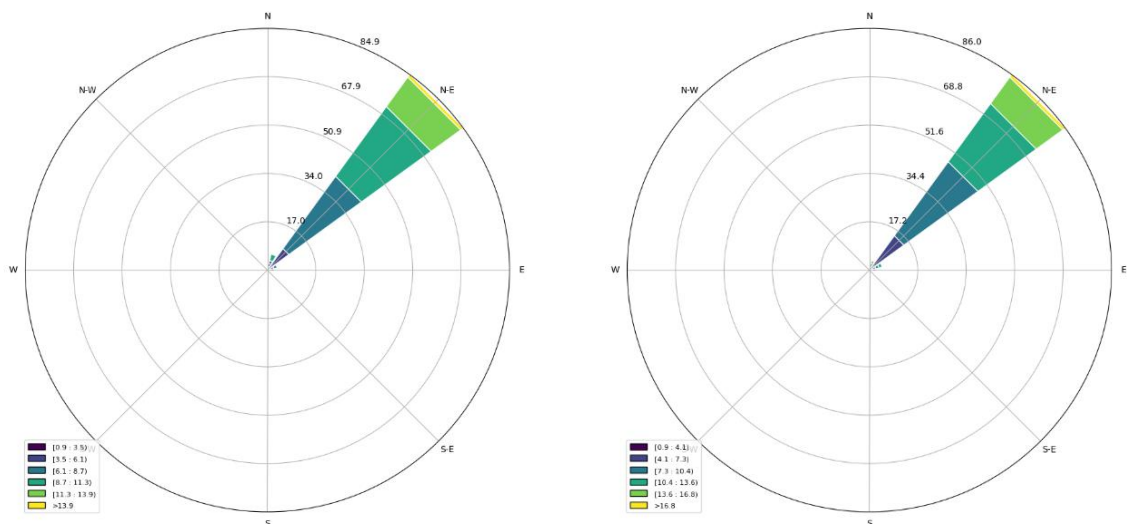


Figura 13. Rosas de los vientos a 10m (superior) y 100m (inferior) sobre el cono del volcán Tajogaite.

Debido a que la dirección de los vientos fue preferencialmente la del NE, la columna de piroclastos se debió dirigir hacia el SW, si solo se considerase esta variable, lo que daría como resultado una mayor tasa de sedimentación a lo largo de toda la erupción en la columna Fátima, ubicada en esta dirección con respecto al cono del volcán Tajogaite. Sin embargo, como se mencionó previamente, este no es el caso durante toda la erupción, si no que entre el 27 de septiembre y el 17 de octubre la columna con una mayor tasa de sedimentación es la del Llano de las Brujas. Para explicar esto, se pensó que si la velocidad del viento no fuese tan alta durante esos días, a pesar de que la dirección de los vientos fuese opuesta a la columna Brujas, sería posible que los piroclastos se depositaran con una mayor tasa en esta

ubicación. Pero, al analizar las velocidades de los vientos para el periodo 27/09/21-17/10/21 se encontró que tanto para los vientos a 10m (Figura 14.a) como a 100m (Figura 14.b) las velocidades son en general de las más altas registradas durante la erupción, alcanzando casi 13.9 m/s y mínimos de 5 m/s a 10m y máximas de 16.8 m/s con mínimas 5 m/s para 100m, durante estos días. Por lo que sería esperable que para ese periodo hubiese una mayor sedimentación hacia el SW en la columna de Fátima y no en el NE en la columna de Brujas.

Por otro lado, la dirección del viento fue del SW únicamente para el día 21 de noviembre del 2021. Sin embargo, es notable que la velocidad del viento a 10m y 100m fue inferior a 6 m/s, por lo que su capacidad de desplazar la columna de piroclastos hacia el NE no parece haber sido lo suficiente como para generar una mayor acumulación de material en la columna Brujas con respecto a la columna Fátima.

Tras analizar las direcciones y velocidades de los vientos, se podría utilizar como explicación para la tasa de sedimentación en la columna Fátima, ya que por sí solas, estas dos variables movilizarían la columna de piroclastos en la dirección SW. Sin embargo, estos datos no explican por qué hubo un periodo de tiempo en el cual la tasa de sedimentación fue mayor en la columna Brujas. Una posible explicación recae en que los vientos aquí analizados solo cubren el nivel superficial de la troposfera. En consecuencia cualquier cambio, sea en la dirección o en la velocidad de los vientos, no se evidenciaría en niveles más altos de la troposfera con estos datos. Por ello para futuros trabajos sería importante indagar sobre los efectos locales que fenómenos atmosféricos, así como aspectos orográficos de la zona donde se dé la erupción, y la posible relación de estos con las variaciones de las direcciones de transporte de los piroclastos.

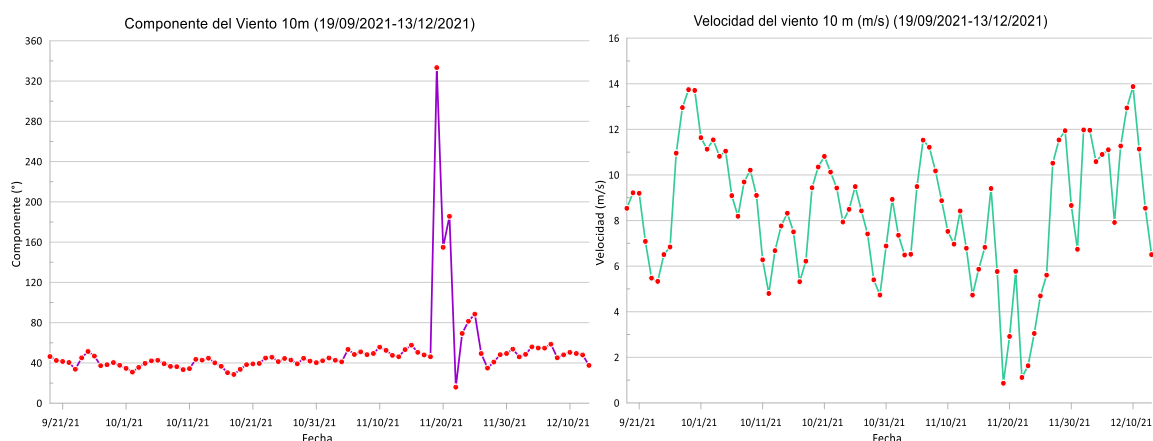


Figura 14.a. Variaciones en la componente (°) (izq.) y velocidad (m/s) (der.) de los vientos a 10m.

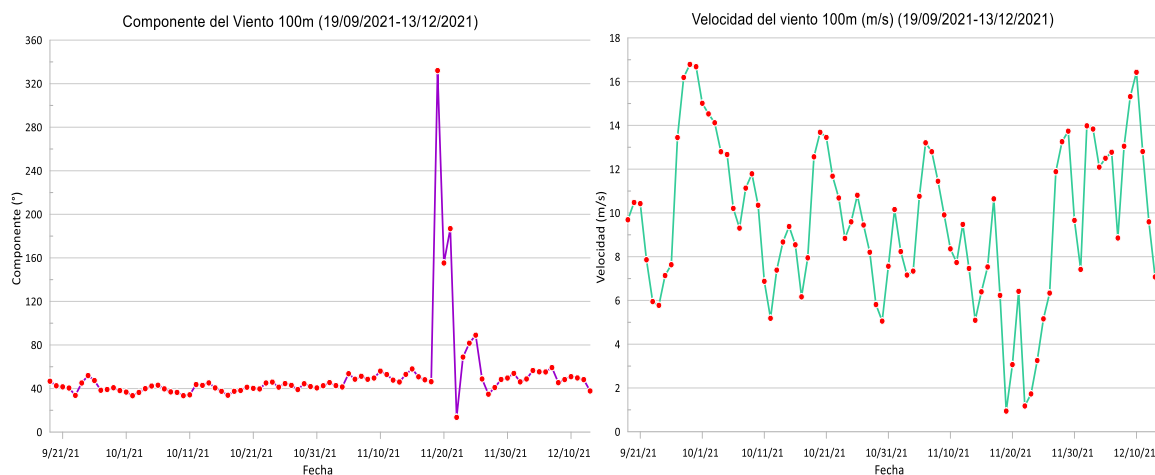


Figura 14.b. Variaciones en la componente (°) (izq.) y velocidad (m/s) (der.) de los vientos a 100m.

5.3 Comparación de la técnica pXRF con técnicas de laboratorio

Con el fin de determinar la utilidad de los resultados obtenidos a nivel cualitativo y cuantitativo con el uso de pXRF, se hace pertinente realizar una comparación con otras técnicas de laboratorio que realizan mediciones de composición elemental como: Geoquímica de Roca Total (GRT), tanto por (ICP) como por (FRX) y Geoquímica de Matriz de Alta Resolución (GMAR),. Para ello y como se observa en los Anexos 1 y 2 se construyeron graficas que contrastan las tendencias generales y las concentraciones de los elementos menores y traza, para los niveles de piroclastos con control temporal (resaltados con una cruz) y los niveles sin control temporal (se calculó una posible fecha con la tasa media de sedimentación) , con los análisis de GMAR y GRT (ICP) realizados por Ubide et al. (2023) (Figura 15 y Anexo I) y los de GRT (FRX e ICP) de Day et al. (2022) (Figura 16 y Anexo II).

A partir de la comparativa entre los resultados obtenidos en este trabajo y los de Ubide et al. (2023) (Figura 15 y Anexo I), se puede decir que: la tendencia que marcan los elementos asociados a una mayor maficidad (Ni, Cr) es similar, iniciando en concentraciones relativamente bajas para ambos elementos, seguido de un progresivo aumento de éstas, para finalmente llegar a las concentraciones máximas de estos elementos durante los días finales de la erupción. Con respecto a los valores de concentración, estos se encuentran bien diferenciados, mostrando los tres tipos de análisis geoquímico como agrupaciones separadas. Se observa que para estos elementos los resultados en roca total de Ubide et al. (2023) tienen las concentraciones más altas (Ni: 110-180ppm, Cr: 80-350ppm), mientras que, para este mismo trabajo, los análisis sobre la matriz corresponden a las menores concentraciones (Ni: 18-41ppm, Cr:1-27ppm). Por otro lado, los valores obtenidos en este trabajo se encuentran en medio de los datos diferentes datos de Ubide et al. (2023), con concentraciones entre 56ppm a 116ppm para el Ni y desde 24ppm a 204ppm para Cr. Para el caso de Zr, Nb y Sr, a nivel de la tendencia general durante la erupción, los datos muestran

un comportamiento similar, con valores más altos a comienzos de la erupción y una disminución progresiva de la concentración de estos elementos conforme avanza el tiempo. Hacia finales de la erupción los valores empiezan a aumentar levemente, sin llegar a ser iguales a los iniciales. También se destaca que para los elementos Zr, Nb y Sr no se observa mayor diferencia entre las tres técnicas de análisis geoquímico, estando los resultados más cercanos entre sí. Los análisis en matriz de Ubide et al. (2023) son los de mayor valor (Zr: 439-329ppm, Nd: 124-99ppm, Sr: 1426-1057ppm) y los de roca total, del mismo trabajo, los de menor concentración (Zr: 350-274ppm, Nd: 90-71ppm, Sr: 1243-1025ppm), con los resultado de pXRF de este trabajo nuevamente como valores intermedios de los otros dos (Zr: 378-290ppm, Nd: 96-73ppm, Sr: 1313-1015ppm).

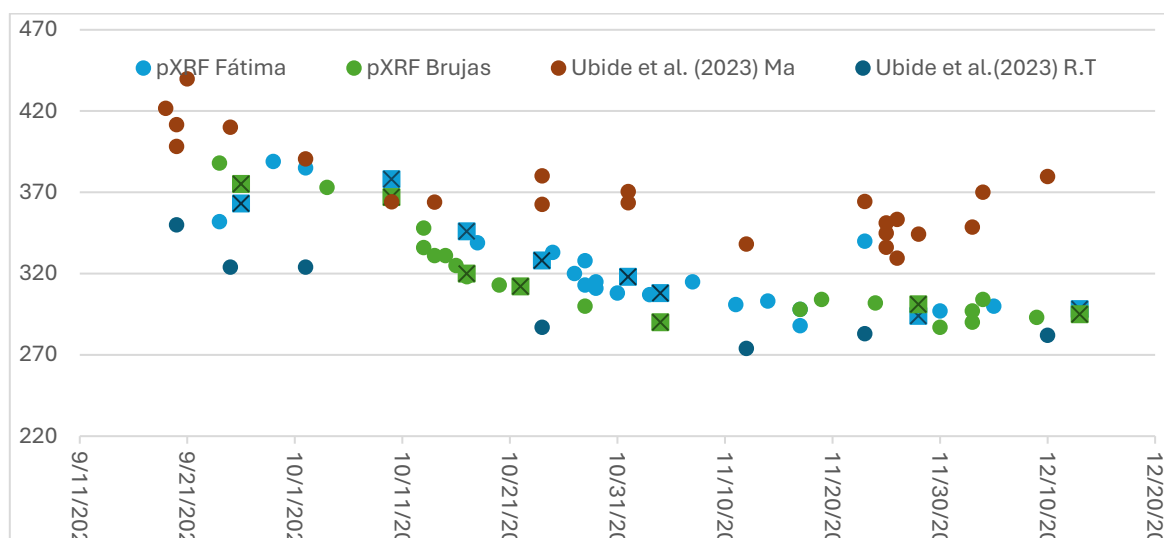


Figura 15. Comparación entre geoquímica de matriz y roca total (Ubide, et al., 2023) y pXRF en las columnas Fátima y Brujas para Zr, los niveles con control temporal absoluto se marcan con cuadrados.

Al realizar la comparación de los resultados de este trabajo con los de ICP de Roca Total obtenidos por Day et al. (2022) (Figura 16 y Anexo II), se obtuvo que, así como con Ubide et al. (2023), las tendencias generales para elementos más abundantes en magmas maficos (Ni, Cr) y los de menor abundancia ante mayor maficidad (Zr, Nb, Sr) son similares, donde las concentraciones aumentan a la largo de la erupción para el Ni y Cr y disminuyen con el tiempo hasta un punto de inflexión a finales de la erupción para Zr, Nb y Sr. En términos de valores de concentración entre ambos grupos de resultados, se observa que para los Ni y Cr, las concentraciones de estos son mayores en Day et al. (2022) oscilando entre (Ni: 43-136ppm, Cr: 51-337ppm) y con pXRF entre (Ni: 56-116ppm, Cr: 24-204ppm), destacando que para el Cr, la diferencia entre los resultados de los trabajos es mayor, mientras que con el Ni esta diferencia no es tan grande. Respecto a los elementos que disminuyen en concentración conforme aumenta la maficidad, en general los resultados con pXRF arrojaron resultados ligeramente mayores a los de Day et al. (2022). Sin embargo, se observa que los valores

entre ambos trabajos son similares y no distan mucho, oscilando para Day et al (2022): Zr (365-266ppm), Nb (98-72ppm) y Sr (1278-846ppm), mientras que para este trabajo las concentraciones fueron: Zr (378-290ppm), Nb (96-73ppm) y Sr (1313-1015ppm).

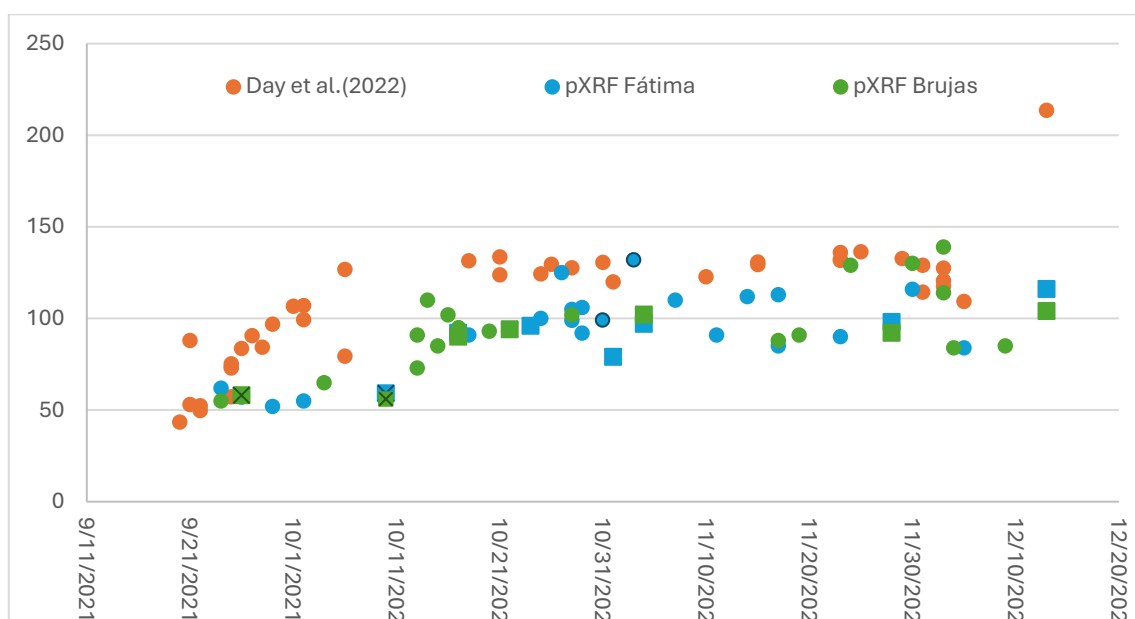


Figura 15. Comparación entre geoquímica de roca total (Day et al., 2022) y pXRF en las columnas Fátima y Brujas para Ni, los niveles con control temporal absoluto se marcan con cuadrados.

A partir de estas comparaciones, entre técnicas de laboratorio más especializadas y la técnica con pXRF de este trabajo, se concluye que los resultados obtenidos con esta última, cumplen a nivel cualitativo, ya que reflejan las tendencias y comportamientos generales de los elementos menores y traza y tienen una buena confianza cuantitativa, ya los resultados tienen los mismos ordenes de magnitud y presentan variaciones similares, presentándose como una técnica que arroja valores intermedios de las técnicas de GRT y GMAR .

5.4 Protocolo para la aplicación de la técnica pXRF en futuras erupciones

Tras realizar la comparación de los resultados obtenidos con la técnica pXRF, con trabajos previos de geoquímica de la erupción de La Palma (2021), es posible afirmar que ésta puede ser aplicada en erupciones que tengan características similares a la del volcán Tajogaite. Por esto, se desarrolló el siguiente protocolo para su aplicación en futuros eventos, estructurado en base a los protocolos mencionados por Knight et al. (2021) y Re et al. (2021), el primero orientado hacia el uso de los equipos portátiles de fluorescencia de Rayos X y el segundo a monitoreo volcánico a través de estudios petrológicos.

5.4.1 Muestreo en campo

El muestreo en campo se debe realizar en la medida de las posibilidades de forma diaria. La dirección de caída de los piroclastos está influenciada por diferentes parámetros meteorológicos (las dinámicas del viento), así como por la orografía de la zona donde se dé

la erupción y las propias características de la columna eruptiva. Por ello es importante consultar el pronóstico del tiempo atmosférico, así como el constante monitoreo de este durante las labores de recolección de muestras. También, manteniendo control de la actividad eruptiva y como está condiciona la columna de piroclastos. Esto con el fin de garantizar la mejor ubicación para la toma de las muestras. Finalmente se debe tomar en cuenta la distancia al cono, tomando en cuenta las determinaciones oficiales sobre zonas seguras, fundamental para obtener las muestras dentro de un margen seguro y de una forma presumiblemente constante durante todo el tiempo de la erupción.

El análisis granulométrico realizado en este trabajo mostró que la fracción de tamaño de piroclasto más representativa correspondía a 1-0.5mm y que se requiere un mínimo de 9 g de esta fracción para ser utilizados en la medición con pXRF. De los niveles analizados, el porcentaje más bajo que se encontró de esta fracción corresponden a 9% en la columna Brujas 23 y 7.5% en la columna Fátima, por lo que asumiendo estos porcentajes al momento de tomar las muestras se deberían recoger como mínimo entre 120 y 100 gramos de piroclastos para obtener el porcentaje de fracción 1-0.5 mm necesario.

Respecto a los materiales a utilizar para el muestreo en campo, se debe tener disponible:

- Un recipiente para la recolección de piroclastos, con capacidad para al menos 120 gramos. Asumiendo una densidad para los piroclastos de 1.09 gr/cm^3 , el volumen del mismo debe ser de 110 cm^3 . Sin embargo, se recomienda recoger más de este mínimo de piroclasto, para asumir posibles pérdidas de masa por manipulación durante las diferentes fases del procedimiento.
- Bolsas con un volumen superior a 110 cm^3 para llevar las muestras recolectadas.
- Bascula para medir la masa de las muestras.
- Los elementos utilizados deben ser de materiales que no contaminen la composición de las muestras.

5.4.2 Preparación de las muestras

Posterior al muestreo, se debe realizar una preparación de las muestras previo a realizar la medición con el equipo pXRF. Inicialmente se deben secar los piroclastos, con el fin de eliminar la humedad de estos, mediante un horno o estufa. El equipo se debe configurar tomando en cuenta la norma UNE-EN ISO17892-4:2016 (Asociación Española de Normalización, 2019), que establece dejar la muestra a 60°C durante un periodo de 24 horas para garantizar la eliminación del agua. Sin embargo, la duración de este secado puede ser menor dependiendo del nivel de humedad que tenga la muestra.

Posterior a este secado, las muestras deben volver a ser pesadas, para conocer la masa total recogida. Con el uso de una torre de tamices se deben tamizar las muestras para separar la fracción 1-0.5 mm o ceniza media. De preferencia la torre de tamices debe estar dividida en mallas de: 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,25mm, 0,125mm, 0,062mm, como la utilizada en este trabajo. Una vez obtenida esta fracción de ceniza, se debe pesar para determinar si cumple con el mínimo necesario. Finalmente, cuando se haya obtenido la cantidad mínima de fracción 1-0,5 mm, esta deberá ser colocada en probetas plásticas con capacidad de 9 gramos, llenarlas y sellarlas con una tapa para comprimir la muestra y reducir su porosidad.

5.4.3 Medición con equipo pXRF

Tras preparar las muestras, se debe configurar el equipo pXRF en un método que determine geoquímicamente los contenidos de elementos mayores, menores y traza, con énfasis en los elementos menores y traza, ya que, según los resultados de este trabajo, los valores de estos son los de mayor confianza. Respecto al tiempo de detección, este debe ser de mínimo 1 minuto o hasta que se observe que los valores se estabilicen. A partir de lo hecho en este trabajo, se sugiere realizar tres mediciones y calcular un promedio con estas.

Una vez realizadas estas mediciones, utilizar los datos obtenidos para llevar un inventario con el cual se puede llevar un control de cambios, para su posterior análisis y uso como herramienta de monitoreo durante una erupción activa.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de la evolución de las erupciones es un pilar fundamental en el análisis del riesgo volcánico. El uso de técnicas de análisis geoquímico como la utilizada en este trabajo, así como otros métodos mencionados en este texto, permiten expandir el entendimiento que existe sobre estos fenómenos naturales y lo que esto implica para las comunidades. Los equipos portátiles de Fluorescencia de Rayos X (pXRF), utilizados generalmente en otros campos de la geología, ofrecen una alternativa a nivel económico, logístico y temporal sobre técnicas de laboratorio especializadas y que permite obtener resultados rápidos y confiables de la química de materiales eruptivos, como los piroclastos estudiados en este trabajo. Sin embargo, el uso de estos equipos requiere una preparación previa que permita obtener resultados fiables.

El análisis granulométrico realizado en este trabajo sobre 57 niveles piroclásticos arrojó que durante la erupción de “La Palma” de 2021 los piroclastos tuvieron cuatro distribuciones preferentes, cada una asociada a un tamaño de partícula mayoritario. Las distribuciones con tamaños de piroclastos más gruesos (lapilli y ceniza gruesa) como tamaño dominante corresponde a niveles de las dos primeras etapas de la erupción, generalmente entre el 19 de septiembre y el 24 de octubre, mientras que las distribuciones con tamaños más finos (ceniza media y ceniza fina) son en su mayoría de niveles a partir del 24 de octubre y hasta final de la erupción. En cada una de estas distribuciones, la ceniza media, dentro del intervalo 0,5-1mm, se caracterizó como el tamaño de piroclasto más prevalente en todos los niveles analizados. Por ello se determinó que este intervalo era el más apropiado para realizar las mediciones con pXRF. Con ello se consigue mantener un control y que los cambios en la concentración de los elementos estuviesen asociados a la evolución de la erupción y no a cambios en el tamaño de las partículas.

A partir de los resultados obtenidos de la geoquímica de los piroclastos, se concluye que a lo largo de la erupción los elementos presentes en los piroclastos tuvieron dos comportamientos asociados al carácter máfico del magma. Por un lado, elementos como el Mg, Ca, Ni y Cr, aumentaron su concentración durante la erupción a medida que los magmas en el volcán se volvieron más máficos con el tiempo. Mientras que elementos como el K, Zr, Nb, Sr, mostraron un comportamiento inverso, disminuyendo en concentración conforme el magma se volvía más máfico.

En algunos niveles de piroclasto, se observó que elementos como el Ni y el Cr tenían concentraciones más altas en comparación a niveles colindantes. Se hipotetizó que esto podría deberse a cambios en la composición mineral de los piroclastos. Sin embargo, los análisis realizados en este trabajo no evidenciaron grandes cambios en los componentes de los piroclastos.

En base a la comparación realizada sobre las tasas de sedimentación en las dos columnas estudiadas, se concluye que, a pesar de estar ubicadas a distancias similares, los ritmos en los cuales se depositan estos piroclastos presentan variaciones importantes, encontrándose influenciados por diferentes factores ambientales e intrínsecos de la columna eruptiva. Por ello se recomienda al momento de analizar este tipo de agente volcánico, estudiar a detalle los efectos que tienen factores meteorológicos y del terreno sobre el movimiento de las columnas eruptivas a lo largo de la troposfera y la dinámica de los piroclastos al caer y depositarse.

Al comparar los resultados obtenidos en este trabajo mediante el uso de pXRF con otras técnicas de análisis geoquímico, se encontró que este método permite obtener resultados fiables. Estos reflejan las tendencias principales de la erupción estudiada, así como las concentraciones absolutas de algunos elementos (Ni, Cr, Zr, Sr). Esto permite identificar momentos importantes en la evolución de una erupción y a comprender el funcionamiento de estos complejos sistemas volcánicos. Por tanto se confirma su utilidad como alternativa a técnicas más costosas y que demandan más tiempo para su realización.

Finalmente, mediante el análisis de los resultados obtenidos se estructuró un protocolo para la aplicación de esta metodología en futuras erupciones, que considera diferentes etapas a tomar en cuenta para su aplicación. En futuras aplicaciones, se recomienda trabajar en la optimización de tiempos y recursos. También se recomienda probar el uso de esta técnica en muestras de más volcanes, con el fin de complementar los datos obtenidos en este trabajo y crear una base de información más amplia para darle el uso más eficaz posible a los pXRF como herramienta en el monitoreo volcánico.

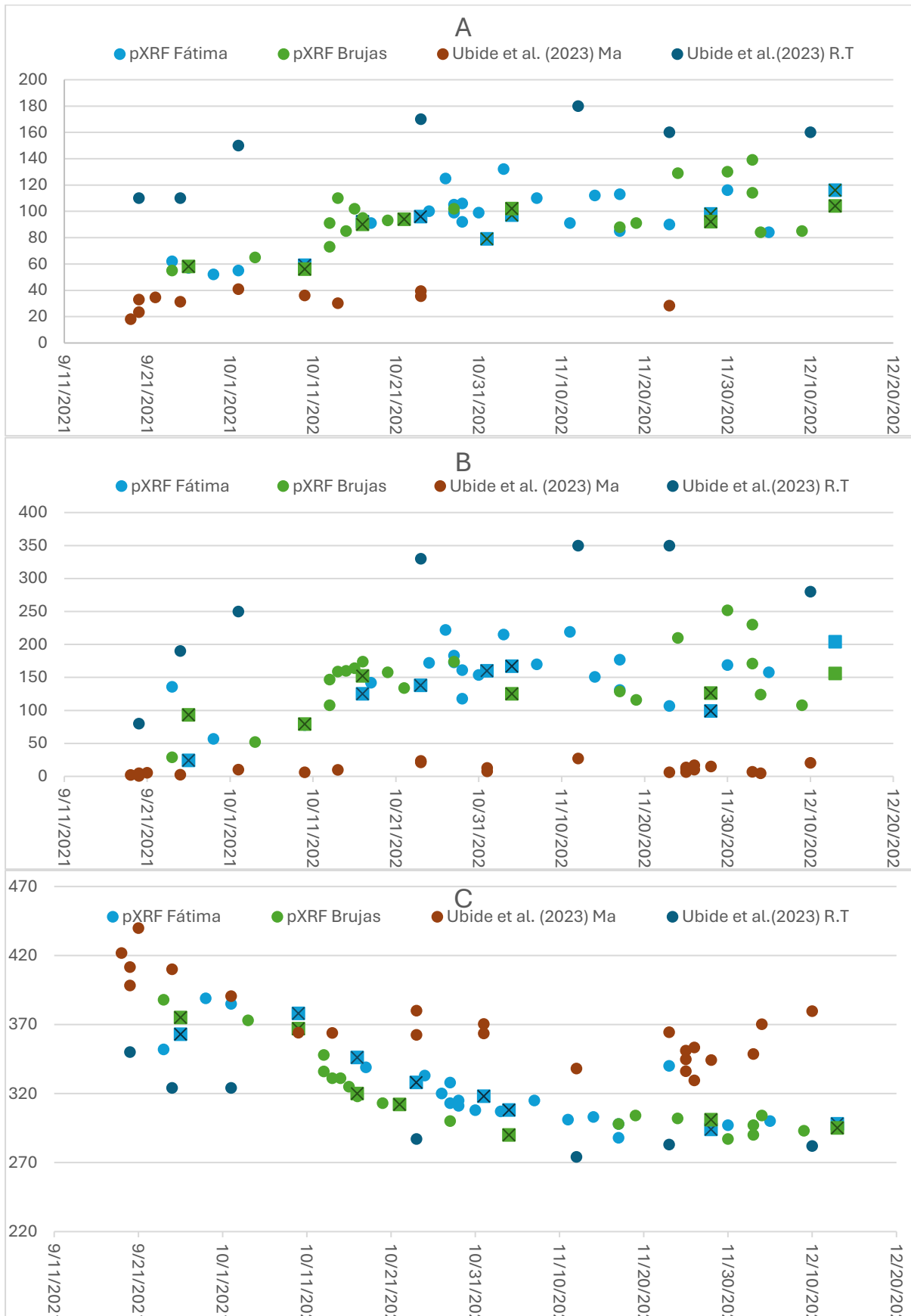
7. REFERENCIAS

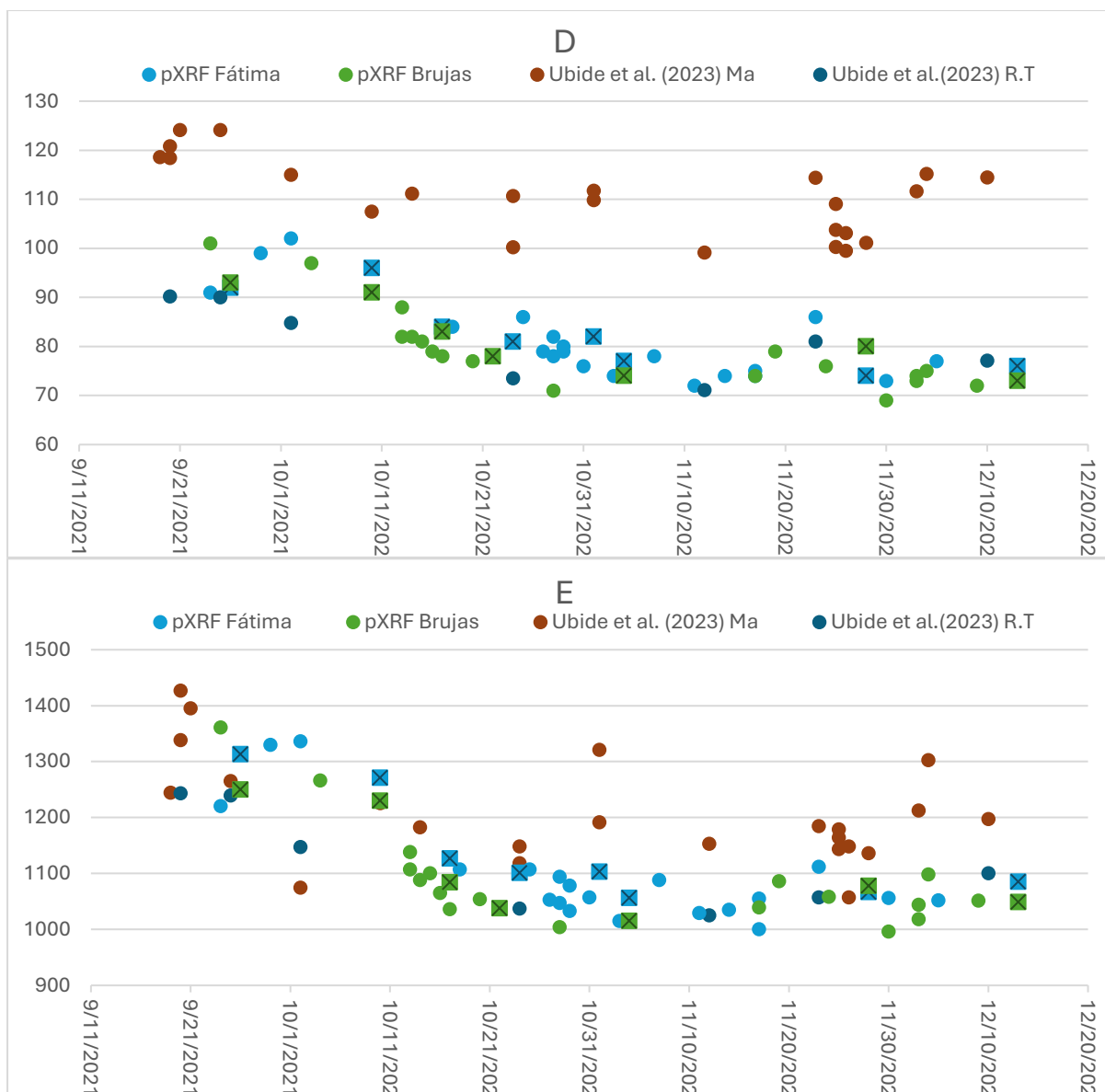
- Ancochea, E., Hernán, F., Cendrero, A., Cantagrel, J. M., Fúster, J., Ibarrola, E., & Coello, J. (1994). Constructive and destructive episodes in the building of a young Oceanic Island, La Palma, Canary Islands, and genesis of the Caldera de Taburiente. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *60*, 243-262.
- Asociación Española de Normalización. (2019). Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 4: Determinación de la distribución granulométrica. UNE-EN ISO 17892-4:2019. Retrieved from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0062597>
- Benito, M. B., Alvarado, G. E., Marchamalo, M., Rejas, J. G., Murphy, P., Franco, R., . . . Sanchez, J. (2023). Temporal and spatial evolution of the 2021 eruption in the Tajogaite volcano (Cumbre Vieja rift zone, La Palma, Canary Islands) from geophysical and geodetic parameter analyses. *Natural Hazards*, *118*, 2245-2284. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-023-06090-y>
- Bonadonna, C., & Costa, A. (2013). Plume height, volume, and classification of explosive volcanic eruptions based on the Weibull function. *Bull Volcanol*, *75*(742). doi:<https://doi.org/10.1007/s00445-013-0742-1>
- Bonadonna, C., & Houghton, B. F. (2005). Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bull Volcanol*, *67*, 441-456. doi:<https://doi.org/10.1007/s00445-004-0386-2>
- Bonadonna, C., Pistolesi, M., Biass, S., Voloschina, M., Romero, J., Coppola, D., . . . Rodriguez, F. (2022). Physical Characterization of Long-Lasting Hybrid Eruptions: The 2021 Tajogaite Eruption of Cumbre Vieja (La Palma, Canary Islands). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *127*(11). doi:<https://doi.org/10.1029/2022JB025302>
- Bonadonna, C., Pistolesi, M., Dominguez, L., Freret-Lorgeril, V., Rossi, E., Fries, A., . . . Perez, N. M. (2023). Tephra sedimentation and grainsize associated with pulsatory activity: the 2021 Tajogaite eruption of Cumbre Vieja (La Palma, Canary Islands, Spain). *Frontiers in Earth Science*, *11*. doi:10.3389/feart.2023.1166073
- Carn, S. A., Fielotov, V. E., McLinden, C. A., Li, C., & Krotkov, N. A. (2017). A decade of global volcanic SO₂ emissions measured from space. *Sci Rep*, *7*(44095). doi:<https://doi.org/10.1038/srep44095>
- Carracedo, J. C., Badiola, E. R., Guillou, H., de La Nuez, J., & Perez Torrado, F. J. (2001). Geology and volcanology of la Palma and El Hierro, Western Canaries. In *Estudios Geológicos* (Vol. 57, pp. 175-273). Madrid.
- Carracedo, J. C., Troll, V. R., Day, J. M., Geiger, H., Aulinas, M., Soler, V., . . . Albert, H. (2022). The 2021 eruption of the Cumbre Vieja Volcanic Ridge on La Palma, Canary Islands. *Geology Today*, *38*, 94-107. doi:<https://doi.org/10.1111/gto.12388>
- Carrillo, J., Guerra, J. C., & Cuevas, E. (2016). Characterization of the Marine Boundary Layer and the Trade-Wind Inversion over the Sub-tropical North Atlantic. *Boundary-Layer Meteorology*, *158*, 311-330. doi:<https://doi.org/10.1007/s10546-015-0081-1>
- Cassidy, M., Manga, M., Cashman, K., & Backmann, O. (2018). Controls on explosive-effusive volcanic eruption styles. *Nat Commun*, *9*(2839). doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-018-05293-3>

- D’Oriano, C., Bertagnini, A., & Pompilio, M. (2011). Ash erupted during normal activity at Stromboli (Aeolian Islands, Italy) raises questions on how the feeding system works. *Bull Volcanol*, 73, 471-477. doi:<https://doi.org/10.1007/s00445-010-0425-0>
- Day, J. M., Troll, V. R., Aulinas, M., Deegan, F. M., Geiger, H., Carracedo, J. C., . . . Perez-Torrado, F. J. (2022). Mantle source characteristics and magmatic processes during the 2021 La Palma eruption. *Earth and Planetary Science Letters*, 597. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117793>
- de Silva, S., & Lindsey, J. M. (2015). Chapter 15 - Primary Volcanic Landforms. In H. Sigurdsson (Ed.), *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)* (pp. 273-297). Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00015-8>
- Głąbicki, D. (2020). Ground surface deformation monitoring of an active volcano using the DInSAR technique in comparison with GPS data: Case study of Okmok Volcano, Alaska. *AIP Conf. Proc.*, 2209 (1): 040004. doi:<https://doi.org/10.1063/5.0000008>
- Golden Software LLC. (2023). Grapher™ 16.2.354 (64-bit). 2D & 3D Graphing Software Copyright ©1992-2023. Golden, CO, USA. Retrieved from www.goldensoftware.com
- HatariLabs. (2022-2024). *HatariUtils*. Retrieved from Rose Wind: www.utils.hatarilabs.com
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., . . . Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). Retrieved 06 18, 2024
- Instituto Nacional de Estadística, I. (2013). *Censo de Poblacion y Viviendas 2011*. Madrid: Instituto Nacional de Estadística.
- Knight, R. D., Kjarsgaard, B. A., & Russell, H. A. (2021). An analytical protocol for determining the elemental chemistry of Quaternary sediments using a portable X-ray fluorescence spectrometer. *Applied Geochemistry*, 131(105026). doi:<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105026>
- Lemière, B. (2018). A review of pXRF (field portable X-ray fluorescence) applications for applied geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 188, Pages 350-363. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.02.006>
- Matias, D., Antlauf, M., Viveiros, F., Moreno, L., Silva, C., & Oliveira, S. (2024). Monitoring hydrothermal fumaroles in the Azores archipelago - Applications and sources of analytical uncertainties. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 450(108076). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108076>
- McGee, L. E., & Smith, I. E. (2016). Interpreting chemical compositions of small scale basaltic systems: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 325, 45-60. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.007>
- Melo Lopez, V. M., Marrero, J. M., Backhouse, S., & Ireland, B. (2023). El proceso de comunicación e información durante la erupción de La Palma: errores, aciertos, aprendizajes y propuestas de mejora. (R. S. Cosmológica, Ed.) *Cosmológica*(3), 109-154. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9103700>
- National Academies of Sciences, E. a. (2017). Forecasting Eruptions. In *Volcanic Eruptions and Their Repose, Unrest, Precursors, and Timing* (pp. 53-67). Washington, DC: The National Academies Press. doi:<https://doi.org/10.17226/24650>

- Pankhurst, M. J., Scarrow, J. H., Barbee, O. A., Hickey, J., Coldwell, B. C., Rollinson, G. K., . . . Pérez, N. M. (2022). Rapid response petrology for the opening eruptive phase of the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma, Canary Islands. *Volcánica*, 5, 1-10. doi:doi:10.30909/vol.05.01.0110
- Pérez, S. A. (2014). *Dirección y velocidad del viento con componentes meridional y zonal*. Retrieved from <https://www.silviaalonsoperez.com/2014/06/direccion-y-velocidad-del-viento-con-componentes-meridional-y-zonal/>
- Poland, M. P., & Anderson, K. R. (2020). Partly cloudy with a chance of lava flows: Forecasting volcanic eruptions in the twenty-first century. *Journal of Geophysical Research: Solid*, 125. doi:<https://doi.org/10.1029/2018JB016974>
- Re, G., Corsaro, R. A., 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:<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107365>
- Saccorotti, G., & Lokmer, I. (2021). Chapter 2 - A review of seismic methods for monitoring and understanding active volcanoes. In P. Papale (Ed.), *In Hazards and Disasters Series, Forecasting and Planning for Volcanic Hazards, Risks, and Disasters* (pp. 25-73). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818082-2.00002-0>
- Taddeucci, J., Edmonds, M., Houghton, B., James, M. R., & Vergnolle, S. (2015). Chapter 27 - Hawaiian and Strombolian Eruptions. In H. Sigurdsson (Ed.), *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)* (pp. 485-503). Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00027-4>
- Taddeucci, J., Pompilio, M., & Scarlato, P. (2004). Conduit processes during the July–August 2001 explosive activity of Mt. Etna (Italy): inferences from glass chemistry and crystal size distribution of ash particles. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 137(1-3), 33-54. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.05.011>
- Taddeucci, J., Scarlato, P., Andronico, D., Ricci, T., Civico, R., Del Bello, E., . . . Pérez, N. M. (2023). The Explosive Activity of the 2021 Tajogaite Eruption (La Palma, Canary Islands, Spain). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 24(6). doi:<https://doi.org/10.1029/2023GC010946>
- Troll, V. R., Aulinas, M., Carracedo, J. C., Geiger, H., Perez-Torrado, F. J., Soler, V., . . . Dayton, K. (2024). The 2021 La Palma eruption: social dilemmas resulting from life close to an active volcano. *Geology Today*, 40, 96-111. doi:<https://doi.org/10.1111/gto.12472>
- Ubide, T., Marquez, A., Ancochea, E., Huertas, M. J., Herrera, R., Coello-Bravo, J. J., . . . Galindo, Í. (2023). Discrete magma injections drive the 2021 La Palma. *Sciences Advances*, 9(27). doi:10.1126/sciadv.adg4813
- Zhou, S., Wang, J., Wang, W., & Liao, S. (2023). Evaluation of Portable X-ray Fluorescence Analysis and Its Applicability As a Tool in Geochemical Exploration. *Minerals*, 13. doi:<https://doi.org/10.3390/min13020166>

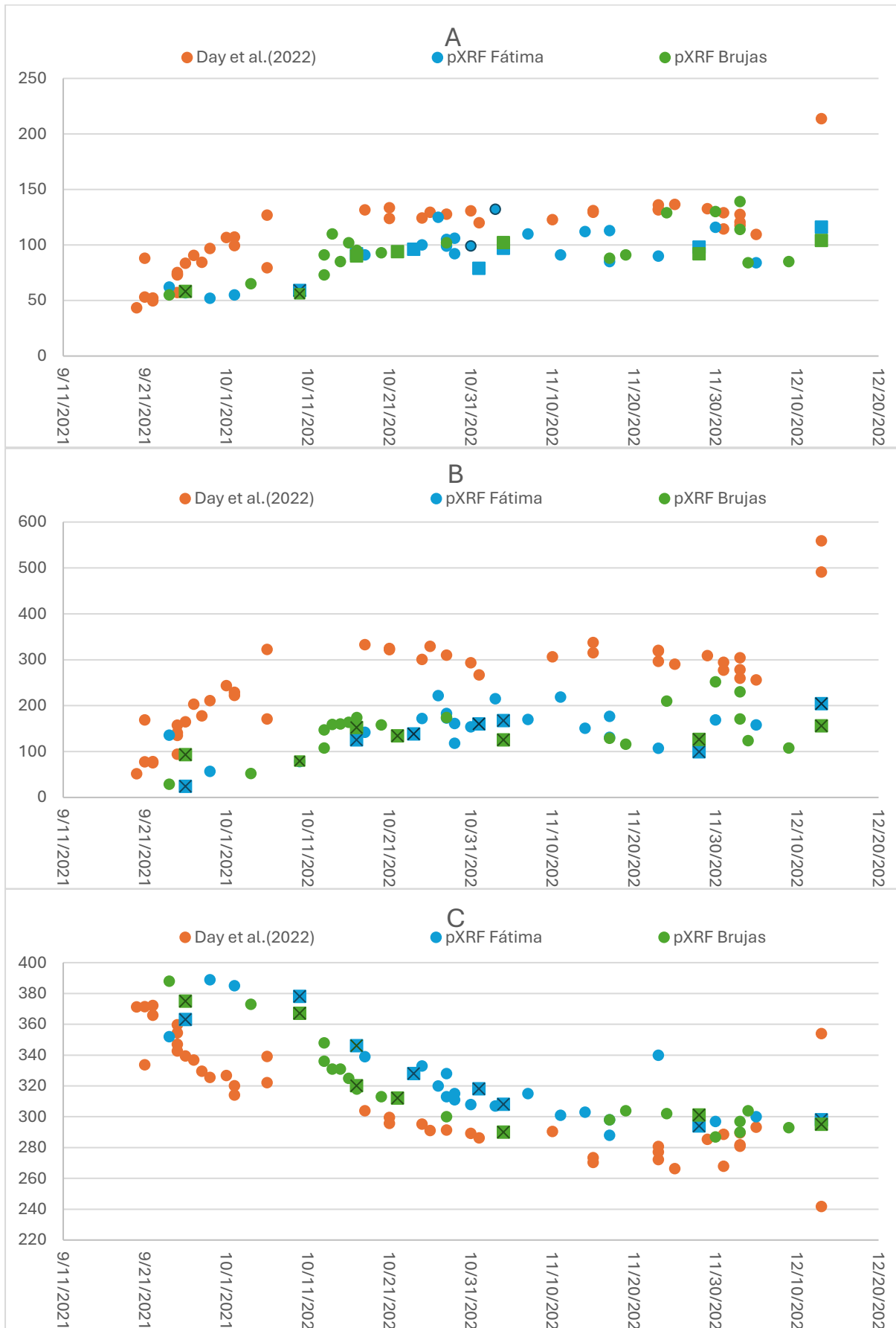
ANEXO I

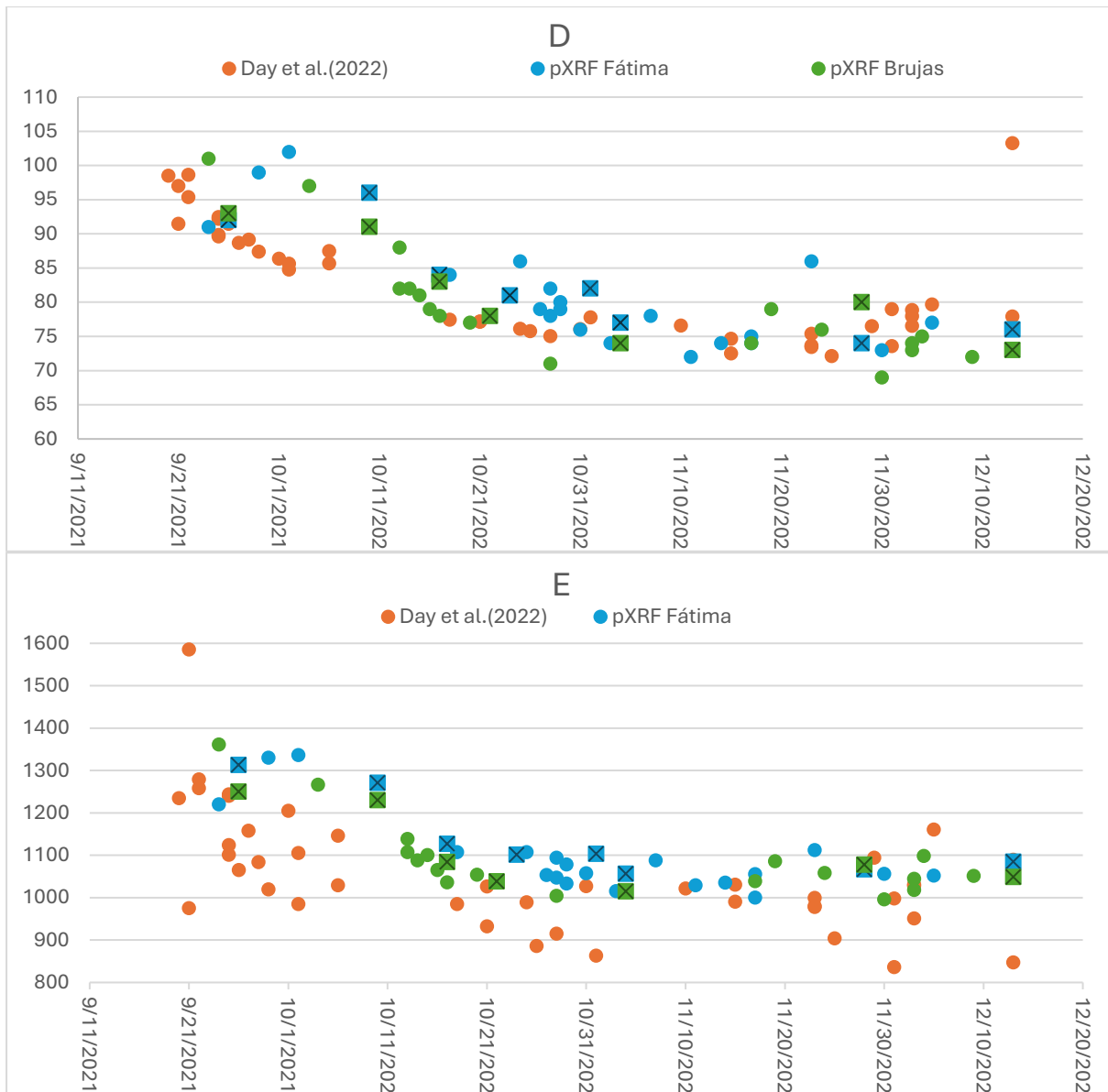




Anexo I. Comparación entre geoquímica de matriz y roca total (Ubide, et al., 2023) y pXRF en las columnas Fátima y Brujas, los niveles con control temporal absoluto se marcan con cuadrados. A: Ni, B: Cr, C: Zr, D: Nb, E: Sr

ANEXO II





Anexo II. Comparación entre geoquímica de roca total (Day, et al., 2022) y pXRF en las columnas Fátima y Brujas los niveles con control temporal absoluto se marcan con cuadrados. A: Ni, B: Cr, C: Zr, D: Nb, E: Sr