



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
GEOLOGÍA

**EVOLUCIÓN MAGMÁTICA DEL GRUPO DESCABEZADOS,
REGIÓN DEL MAULE (34°41'S-36°33'S), CHILE, A PARTIR DE
ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIABLE DE DATOS
GEOQUÍMICOS DE LAVAS Y TEFRA.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Nicolás Alfonso Orellana Silva

Profesor Guía: Dr. José Luis Palma Lizana
Profesor Co-Guía: Sr. Franco Elías Vera Rivadeneira
Profesores Comisión: Dra. Verónica Laura Oliveros Clavijo

Concepción, 2024

Siempre en mis recuerdos,

Hugo Alfonso Silva Arré

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quiero expresar mi profundo agradecimiento al Dr. José Luis Palma, mi profesor guía, por brindarme la oportunidad de trabajar a su lado. Su constante apoyo y enseñanzas en un área completamente nueva para mí han sido fundamentales en el desarrollo de mis habilidades, enriqueciendo mi trabajo con sus valiosos comentarios y orientación.

También deseo agradecer a Franco Vera por proponer el tema de mi trabajo y por facilitarme material esencial, a la Dra. Verónica Oliveros por dedicarme su tiempo y mostrarse siempre dispuesta a ayudar en los momentos en que más los necesitaba y la Dra. Fernanda Alvarez por el apoyo durante este último año con el cambio de malla.

Mi gratitud se extiende a todos los funcionarios y académicos del Departamento de Ciencias de la Tierra (DCT), quienes han sido un pilar en mi formación profesional. Su presencia constante, llena de vida y alegría, ha convertido al departamento en un lugar que se siente como un segundo hogar.

Quisiera agradecer de manera especial a mis amigos Maite, Daniela, Nelson, David, Diego, Fernanda, Esteban y Joaquín E. por las hermosas experiencias y enseñanzas compartidas. A mi grupo más cercano, Martín, Matías, Joaquín O. y Álvaro, les estoy profundamente agradecido por estar siempre ahí, en los buenos y malos momentos, considerándolos verdaderos hermanos.

Agradezco a Josefa por su constante apoyo y cariño durante todos los años y sobretodo en esta etapa final, a tu lado todo es mejor. Estoy también sumamente agradecido con mis tíos Darwin y Verónica, y con Margarita, por hacerme sentir como en casa durante mi estancia en Concepción, convirtiéndose en mi segunda familia y en un apoyo inquebrantable.

A mi familia, no hay forma de expresar mi gratitud, estoy completamente agradecido de que son parte de mi vida, sin ustedes no estaría donde me encuentro en estos momentos. Gracias por su apoyo incondicional, la preocupación constante y las enseñanzas, son mi soporte y mi contención en los momentos difíciles. Espero algún día poder devolver todo lo que me han podido entregar, siempre tendré presente el esfuerzo que han hecho por mí. Mis padres Ana María y Carlos, junto con mis hermanos Carlos, Carola y Ximena.

ÍNDICE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | Grupo Descabezados | 2 |
| 1.2 | Formulación del proyecto..... | 3 |
| 1.3 | Ubicación y accesos..... | 3 |
| 1.4 | Objetivos..... | 5 |
| 1.4.1 | Objetivo general | 5 |
| 1.4.2 | Objetivos específicos | 5 |
| 1.5 | Metodología..... | 5 |
| 2 | MARCO TEÓRICO | 7 |
| 2.1 | Evolución magmática en volcanismo activo | 7 |
| 2.2 | Descripción geoquímica | 8 |
| 2.2.1 | Centro y perturbación de datos geoquímicos. | 10 |
| 2.3 | Análisis estadístico geoquímico | 11 |
| 2.3.1 | Transformaciones log-cociente..... | 12 |
| 2.3.2 | Herramientas de discriminación y correlación | 13 |
| 2.3.3 | Aprendizaje automático supervisado..... | 15 |
| 3 | MARCO GEOLÓGICO | 17 |
| 3.1 | Rasgos morfoestructurales y geomorfológicos..... | 17 |
| 3.2 | Control estructural | 18 |
| 3.3 | Grupo Volcánico Descabezados | 20 |
| 3.3.1 | Volcán Descabezado Grande | 21 |
| 3.3.2 | Volcán Cerro Azul | 21 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.3 | Volcán Quizapu..... | 22 |
| 3.3.4 | Centros Eruptivos Menores Básicos..... | 23 |
| 3.3.4.1 | Los Hornitos | 23 |
| 3.3.4.2 | Cerro Colorado | 24 |
| 3.3.4.3 | Reformados..... | 24 |
| 3.3.4.4 | La Resolana | 24 |
| 3.3.5 | Centros Eruptivos Menores Ácidos..... | 25 |
| 3.3.5.1 | Mondaca | 25 |
| 3.3.5.2 | Alto Las Mulas | 26 |
| 3.3.5.3 | Domo Estero y Domo Torta..... | 26 |
| 3.3.6 | Centros Eruptivos Aledaños | 26 |
| 3.3.6.1 | Caldera Calabozos | 26 |
| 3.3.6.2 | Volcán Descabezado Chico | 27 |
| 3.3.6.3 | Cerro del Medio..... | 27 |
| 3.4 | Historial Eruptivo | 28 |
| 4 | METODOLOGÍA..... | 31 |
| 4.1 | Recopilación de datos y bibliografía | 31 |
| 4.2 | Preprocesamiento de la base de datos..... | 33 |
| 4.3 | Caracterización Geoquímica..... | 34 |
| 4.3.1 | Centro y perturbación de datos geoquímicos. | 35 |
| 4.4 | Estadística Multivariable | 36 |
| 4.4.1 | Transformación de datos..... | 36 |
| 4.4.2 | Correlación lineal | 36 |
| 4.4.3 | Análisis de componentes principales (PCA) | 37 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.4.4 | Análisis de clúster jerárquico | 38 |
| 4.4.5 | Análisis Discriminante Lineal (LDA) | 38 |
| 4.5 | Aprendizaje automático supervisado..... | 39 |
| 4.5.1 | Decision tree y random forest..... | 40 |
| 5 | RESULTADOS..... | 42 |
| 5.1 | Caracterización geoquímica | 42 |
| 5.2 | Análisis estadístico | 48 |
| 5.2.1 | Correlación Lineal | 48 |
| 5.2.2 | Análisis de componentes principales..... | 49 |
| 5.2.2.1 | Elementos mayores..... | 49 |
| 5.2.2.2 | Elementos traza y tierras raras..... | 51 |
| 5.3 | Modelo de discriminación de muestras, random forest..... | 53 |
| 6 | DISCUSIONES..... | 57 |
| 6.1 | Modelo de discriminación de muestras mediante random forest | 57 |
| 6.1.1 | Limitantes del modelo | 58 |
| 6.1.1.1 | Composición mineralógica..... | 58 |
| 6.1.1.2 | Temporalidad de las muestras..... | 59 |
| 6.1.2 | Mejoras para el modelo | 61 |
| 6.1.3 | Proyección del modelo | 61 |
| 6.2 | Evolución magmática a partir de estadística multivariable | 62 |
| 6.2.1 | Similitud entre los centros eruptivos | 62 |
| 6.2.2 | Procesos de diferenciación magmática en Grupo Descabezados | 64 |
| 6.2.3 | Análisis espacial | 66 |

| | | |
|----------|---------------------------|-----------|
| 6.2.4 | Análisis temporal..... | 67 |
| c | | |
| 7 | CONCLUSIONES | 70 |
| 8 | REFERENCIAS | 71 |
| | ANEXOS | 77 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Mapa esquemático de la Zona Volcánica Sur..... | 1 |
| Figura 1.2. Mapa ubicación y accesos área de estudio..... | 4 |
| Figura 3.1. Mapa morfoestructural de la Región del Maule..... | 17 |
| Figura 3.2. Estructuras volcánicas y alineamientos en zona sur Grupo Descabezados..... | 19 |
| Figura 3.3. Mapa de ubicación de los principales centros de emisión del Grupo Descabezados.. | 20 |
| Figura 4.1. Mapa de ubicación de muestras recopiladas y columnas estratigráficas extraídas de Vera et al. (2022)..... | 32 |
| Figura 5.1. Diagrama de TAS para el Grupo Descabezadosc..... | 42 |
| Figura 5.2. Diagrama AFM para el Grupo Descabezados..... | 43 |
| Figura 5.3. Diagramas de Harker de elementos mayores para el Grupo Descabezados..... | 45 |
| Figura 5.4. Diagrama de Spider para elementos traza para Grupo Descabezados..... | 47 |
| Figura 5.5. Diagrama de Spider para tierras raras para Grupo Descabezados..... | 47 |
| Figura 5.6. Diagrama de Pairplot para el Grupo Descabezados..... | 48 |
| Figura 5.7. Análisis de componentes principales para elementos mayores del Grupo Descabezados..... | 50 |
| Figura 5.8. Biplot para elementos mayores del Grupo Descabezados..... | 50 |
| Figura 5.9. Biplot elementos mayores de muestras desconocidas..... | 51 |
| Figura 5.10. Análisis de componentes principales para elementos traza y tierras raras del Grupo Descabezados..... | 52 |
| Figura 5.11. Biplot para elementos traza y tierras raras del Grupo Descabezados..... | 52 |
| Figura 5.12. Biplot elementos traza y tierras raras de muestras desconocidas..... | 53 |
| Figura 5.13. Histograma de precisión de los modelos de random forest..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.14. Distribución espacial de las muestras estudiadas con las predicciones hechas por el modelo de discriminación..... | 56 |
| Figura 6.1. Columnas Estratigráficas. | 57 |
| Figura 6.2. Ejemplo decision tree..... | 58 |
| Figura 6.3. Gráfico LDA para el Descabezado Grande, Hornitos y Resolana. | 59 |
| Figura 6.4. . Gráfico LDA para el Descabezado Grande, Domo Estero y Quizapu. | 60 |
| Figura 6.5. Dendrograma elementos mayores Grupos Descabezados..... | 62 |
| Figura 6.6. Dendrograma elementos traza Grupos Descabezados. | 63 |
| Figura 6.7. Diagramas ternarios MgO-P ₂ O ₅ -K ₂ O Grupo Descabezados..... | 64 |
| Figura 6.8. Gráfico Zr/Cr vs SiO ₂ para el Grupo Descabezados..... | 65 |
| Figura 6.9. Gráfico Y/Ni vs SiO ₂ para Grupo Descabezados. | 66 |
| Figura 6.10. Variación elementos a lo largo de la columna Cerro Monsalve. | 68 |
| Figura 6.11. Variación elementos a lo largo de la columna Loma Seca | 69 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 5.1. Métricas de rendimiento por clase. En base al mejor modelo de random forest. | 55 |
| Tabla 5.2. Influencias de cada variable. En base al mejor modelo de random forest. | 56 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo 1. Base de datos de datos químicos de muestras extraídas del Grupo Descabezados | 77 |
| Anexo 2. Datos totales y referencia. Separado en base a cada centro eruptivo..... | 77 |
| Anexo 3. Valores faltantes de cada proveniencia en base a los elementos..... | 78 |
| Anexo 4. Columna estratigráfica Cerro Monsalve..... | 78 |
| Anexo 5. Columna estratigráfica Loma Seca. | 79 |
| Anexo 6. Metodología de preprocesamiento de datos..... | 80 |
| Anexo 7. Metodología de descripción geoquímica. | 81 |
| Anexo 8. Metodología para el análisis multivariable. | 81 |
| Anexo 9. Metodología para el aprendizaje automático supervisado..... | 82 |
| Anexo 10. Influencia de variables en elementos mayores..... | 83 |
| Anexo 11. Influencia de variables en elementos trazas..... | 84 |
| Anexo 12. Resultados entregados por el modelo de discriminación..... | 84 |
| Anexo 13. Análisis discriminante lineal para las muestras que no coinciden con las proveniencia. En relación con Vera et al. (2022) | 85 |
| Anexo 14. Importancia de las variables para los análisis discriminantes lineal (LDA) en los distintos casos..... | 88 |

RESUMEN

El Grupo Descabezados corresponde a un complejo volcánico de centros eruptivos de actividad volcánica Pleistocena-Holocena, ubicados en la Zona Volcánica Sur Transicional en el sector cordillerano de la Región del Maule. Este grupo presenta una amplia variabilidad composicional, con registros de magmas que van desde basálticos hasta riolíticos, lo que varía considerablemente de un centro volcánico a otro.

Debido a la amplia variabilidad composicional de los depósitos y a la relativamente corta distancia entre los centros eruptivos, resulta difícil discriminar la proveniencias de ciertas muestras. Por lo tanto, es esencial utilizar herramientas capaces de realizar esta tarea para la zona de estudio. Es necesario tener una idea clara acerca de la caracterización geoquímica y la correlación que existe entre los centros eruptivos.

Para poder realizar esta tarea, es fundamental utilizar herramientas de análisis multivariantes, como el análisis de componentes principales (PCA), para obtener patrones de variabilidad e importancia de elementos en los centros eruptivos. Además, para la discriminación directa de las muestras sin proveniencia clara, es necesario emplear una herramienta más específica de análisis de datos, como el aprendizaje automático supervisado.

El preprocesamiento de datos es crucial para utilizar estas herramientas estadísticas, como lo es la transformación log-cociente, que otorga independencia a las variables de una composición y evita correlaciones espurias.

Los resultados de estas herramientas proporcionan información concreta acerca de la evolución magmática del Grupo Descabezados, incluyendo procesos como la mezcla de magmas y cristalización fraccionada. Sin embargo, para obtener conclusiones más robustas sobre los procesos y las proveniencias de las muestras, también es necesario considerar otros parámetros, como la composición mineral y la temporalidad de las muestras. Además, todos estos resultados son dependientes de la credibilidad de la proveniencia de las muestras que ya están etiquetadas con un origen.

1 INTRODUCCIÓN

El arco volcánico andino se caracteriza por un volcanismo reciente que abarca desde el Pleistoceno hasta el Holoceno, el cual se despliega a lo largo del cordón montañoso al oeste de Sudamérica. En este arco, se refleja una diversidad de procesos magmáticos que resultan en una amplia heterogeneidad de depósitos volcánicos y, consecuentemente, una variabilidad significativa en la composición química de estos (Stern, 2004).

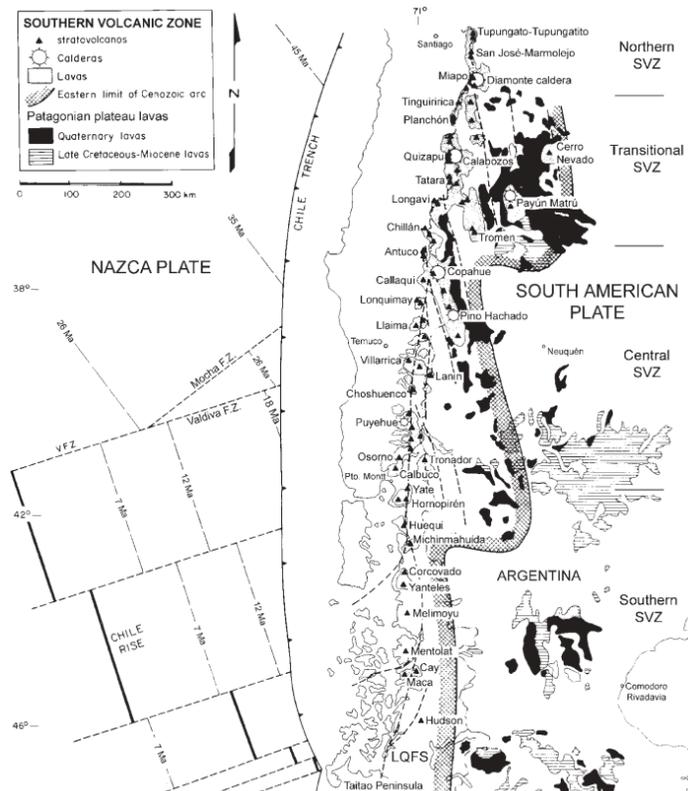


Figura 1.1 Mapa esquemático de la Zona Volcánica Sur. Se observa la ubicación de los complejos volcánicos Caldera Calabozo y Grupo Descabezados (Quizapu), extraído de Stern et al. (2004).

La Zona Volcánica Sur (SVZ) es parte del arco volcánico andino y se extiende en un área que va latitudinalmente desde los 33°S hasta los 46°S (Figura 1.1). Esta región es la que presenta la mayor actividad volcánica registrada en la historia, con un promedio de aproximadamente una erupción al año (Stern, 2004; Siebert et al., 2011). Dentro de la SVZ se encuentra la Zona Transicional Volcánica Sur (TSVZ), la cual se extiende desde los 34,5°S hasta los 37°S (Figura 1.1), este segmento se caracteriza por presentar estratovolcanes compuestos, calderas y grandes complejos

volcánicos que se superponen a antiguos volcanes de escudo basáltico (Tormey et al., 1991; Dungan et al., 2011).

Dentro de la Zona Transicional Volcánica Sur (TSVZ), los complejos volcánicos de Caldera Calabozos, Laguna del Maule y el Grupo Descabezados destacan por abarcar una extensa área. Estos complejos en conjunto albergan más de 200 estructuras volcánicas como estratovolcanes, cráteres, conos de escoria, domos y maares (González-Ferrán, 1994).

1.1 Grupo Descabezados

El Grupo Descabezados se sitúa en la TSVZ, específicamente en el sector cordillerano de la Región del Maule, Chile ($35^{\circ}14'-35^{\circ}49'$ S; $71^{\circ}11'-70^{\circ}35'$ O). Este grupo engloba al menos 18 centros de emisión de actividad volcánica entre el Pleistoceno y el Holoceno. Entre estos centros destacan los volcanes Descabezado Grande, Cerro Azul y Quizapu. Además, se identifican centros eruptivos menores como Las Resolanas, Los Hornitos, Cerro Colorado, Reformados, Mondaca y Alto Las Mulas, así como los domos Estero, Guamparo y Torta (Vera et al., 2022).

Caldera Calabozos es un complejo volcánico ubicado al este del Grupo Descabezados. Aunque no formar parte de este grupo, es significativa para el estudio debido a su proximidad y la influencia de sus depósitos volcánicos en el área. Dentro de este complejo se encuentran los centros de emisión Cerro del Medio y Descabezado Chico, caracterizados por una actividad volcánica Pleistocena a Holocena (Grunder & Mahood, 1988).

El volcanismo del Grupo Descabezados se manifiesta a través de una amplia variedad de estilos eruptivos y composiciones químicas, las cuales están evidenciadas en los depósitos preservados en el registro geológico. Estos depósitos registran erupciones que abarcan desde magmas basálticos hasta riolíticos (Hildreth & Drake, 1992). Desde una perspectiva histórica, en el grupo Descabezado predomina un estilo eruptivo explosivo, que se caracteriza por la formación de columnas eruptivas que pueden variar desde estrombolianas hasta plinianas. Además, de manera secundaria, se ha identificado actividad efusiva, que se manifiesta por medio de la formación de decenas de domos y flujos de lava (Vera et al., 2022).

La composición química de las rocas volcánicas estudiadas en la zona varía considerablemente de un centro volcánico a otro, existiendo diferencias incluso entre centros pertenecientes a grupos de volcanes que son parte de una misma estructura volcánica. Esto se evidencia claramente en el caso

del volcán Quizapu y los cráteres Hornitos y Resolana. Siendo estos volcanes considerados adventicios del volcán Cerro Azul, se esperaría encontrar una tendencia similar en las concentraciones de elementos entre ellos. Sin embargo, los depósitos provenientes de los volcanes Hornitos y Resolana muestran una mayor concentración de los elementos de Fe y Mg en comparación con el volcán Quizapu, lo que indica que sus magmas son menos diferenciados (Salas et al., 2017).

1.2 Formulación del proyecto

Dada la amplia variabilidad de depósitos y composiciones de roca, así como la relativamente corta distancia entre los centros eruptivos del Grupo Descabezados, identificar la procedencia de algunos depósitos se vuelve difícil. Por lo tanto, resulta esencial llevar a cabo una caracterización y correlación geoquímica de los centros eruptivos para poder diferenciar el origen de estos depósitos. El análisis estadístico multivariable en la geoquímica de los depósitos de lavas y tefra en la zona se presenta como una buena herramienta para identificar los distintos patrones y tendencias de los diferentes centros eruptivos. Esto no solo permitiría caracterizar los centros eruptivos, sino también establecer correlaciones con otros volcanes pertenecientes al Grupo Descabezado.

A través de este análisis, se busca identificar el o los centros eruptivos a los que pertenecen los depósitos de la zona cuya proveniencia aún no se conoce. Una vez conocida la posible fuente de estos depósitos, se puede establecer relaciones espacio-temporales entre los depósitos estudiados y los centros eruptivos que los originaron, aprovechando la información estratigráfica disponible.

Para concluir el análisis de manera integral, se puede obtener una comprensión clara de la evolución magmática tanto del Grupo Descabezados como de los diversos centros eruptivos que forman parte de él.

1.3 Ubicación y accesos

El Grupo Descabezados se sitúa en la Región del Maule, específicamente en el sector cordillerano. El área que abarca el Grupo Descabezados se extiende principalmente por la comuna de San Clemente y, en menor medida, incluye parte de las comunas de Molina, Río Claro, Pelarco y Colbún. Entre las localidades más cercanas a los centros eruptivos de este complejo volcánico se encuentran los sectores de El Médano, Suiza, Los Álamos y el Campamento Los Cipreses hacia el sur, así como Vilches Alto y El Radal al oeste. Notablemente, hacia el oeste del Grupo

Descabezados se encuentran dos importantes áreas de conservación: el Parque Nacional Radal Siete Tazas y la Reserva Nacional Altos de Lircay (Figura 1.2).

La ciudad de Talca es la capital regional de la Región del Maule, por lo cual se utilizará esta localidad como punto de referencia. El cráter del volcán Cerro Azul se ubica a una distancia aproximada de 84,1 km de la ciudad de Talca, mientras que el cráter del volcán Descabezado Grande se encuentra a unos 83,3 km de distancia. Ambos centros eruptivos forman parte de la zona central del Grupo Descabezados (Figura 1.2).

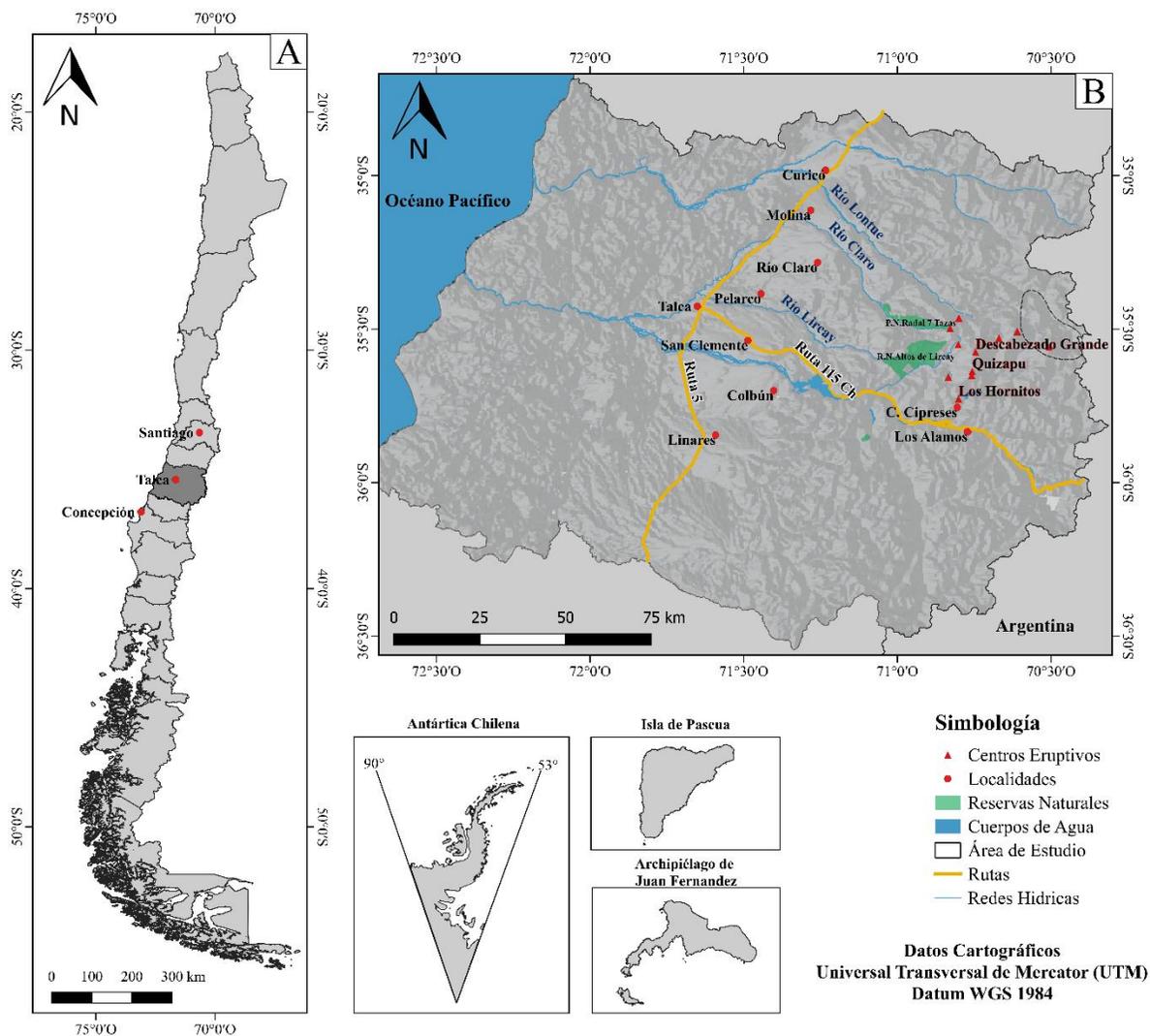


Figura 1.2. Mapa ubicación y accesos área de estudio (A) Mapa Regiones de Chile con principales localidades de referencia (B) Mapa Región del Maule, con rutas de accesos, arroyos, localidades y reservas naturales cercanas a la zona de estudio.

El acceso terrestre al área de estudio es limitado debido a la ubicación remota de la mayoría de los centros eruptivos. La única vía de acceso directa es por la zona sur del área de estudio, a través de la ruta de internacional CH-115 hasta el sector Los Álamos. Desde allí, para llegar directamente a los centros eruptivos, se deben utilizar rutas privadas pertenecientes a la central hidroeléctrica Los Cipreses, propiedad de Enel Generación Chile S.A. Estas vías permiten el acceso a la laguna de La Invernada, facilitando el estudio de una gran parte de la zona sur y centro del Grupo Descabezados, abarcando centros eruptivos relevantes como Hornitos, Quizapu y Cerro Azul.

En contraste, los accesos para llegar a los centros eruptivos de la zona norte son de mayor complejidad, debido a que no existe una ruta directa a estos en comparación a la zona sur. En este caso, es esencial recurrir a medios alternativos de transporte, como cabalgatas y caminatas por senderos que se encuentran a lo largo de los valles de los ríos Claro, Blanquillo y Lontué (Figura 1.2).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar la evolución magmática del Grupo Descabezados mediante la caracterización, correlación y análisis estadístico multivariable de la geoquímica de sus depósitos de tefra y lavas.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar geoquímicamente los depósitos de los centros eruptivos.
2. Determinar estadísticamente patrones y tendencias de los valores geoquímicos de cada centro eruptivo.
3. Discriminar y correlacionar los centros eruptivos del Grupo Descabezados.
4. Determinar la evolución magmática del Grupo Descabezados y los centros eruptivos que lo componen, en base a un enfoque espacial y temporal.

1.5 Metodología

Para llevar a cabo el presente estudio, se ha estructurado en tres etapas principales de trabajo. Cada una de estas etapas se compone de diversas tareas con el fin de cumplir con los objetivos establecidos. Estas etapas de trabajo se detallan a continuación:

Etapa 1: Recopilación bibliográfica y trabajo de datos químicos.

En esta etapa inicial, se lleva a cabo la recopilación de material bibliográfico relacionado con investigaciones previas de los centros volcánicos que forman parte del Grupo Descabezados. Este proceso abarca registros de erupciones anteriores, productos volcánicos asociados y análisis de datos químicos efectuados por diversos autores. Además, se procede a la construcción de una base de datos que almacena los resultados de los análisis químicos de muestras publicadas en Vera et al. (2022) . Esta base de datos se complementa con datos publicados por otros investigadores que hayan estudiado algún centro eruptivo perteneciente al Grupo Descabezados.

Etapa 2: Análisis geológico y estadístico de los datos.

En esta etapa, se realiza una caracterización geoquímica integral de cada centro eruptivo. Esto se basa en la utilización de diversos diagramas (TAS, AFM, Harker y Spider) que abarcan los elementos mayores, elementos traza y tierras raras presentes en los distintos tipos de depósitos volcánicos. Posteriormente, se procede a correlacionar y discriminar entre los centros eruptivos que forman parte del Grupo Descabezados utilizando patrones y tendencias obtenidos mediante diversas técnicas de análisis estadístico multivariable (PCA y Análisis de Clúster). Estos resultados se utilizan para asignar una procedencia a través de algoritmos de machine learning supervisado (Decision Tree y Random Forest) a ciertos depósitos que cuentan con un análisis químico, pero carecen de un origen conocido.

Etapa 3: Evaluación e interpretación de resultados.

La última etapa consiste en una evaluación exhaustiva de las técnicas estadísticas utilizadas, con el objetivo de caracterizar cada centro eruptivo desde una perspectiva tanto geológica como estadística. Además, se busca identificar las diferencias significativas que puedan resultar útiles para la discriminación entre los diversos centros eruptivos. Como resultado final, se logra obtener un análisis espacio-temporal completo del Grupo Descabezados, utilizando columnas estratigráficas publicadas en Vera et al. (2022), junto con un análisis detallado de la evolución magmática presente en la zona de estudio.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Evolución magmática en volcanismo activo

En la zona de subducción, que se forma por la colisión entre placas tectónicas con diferencias en sus densidades y direcciones opuestas de desplazamiento, una de las placas, generalmente la placa oceánica, es subducida y se introduce por debajo de la otra con un ángulo inclinado hacia el manto superior. A medida que esta placa subducida se adentra, experimenta un aumento gradual de temperatura y presión. Este proceso conduce a la liberación de fluidos de la placa subducida, lo que facilita la fusión del manto astenosférico. La fusión del manto da origen al magma, que asciende gradualmente hacia la superficie. Cuando finalmente el magma logra llegar a la superficie, esto da lugar a la formación de volcanes (Seyfried et al., 1998).

Las composiciones de los elementos principales y traza en un magma están determinadas por el proceso y el grado de fusión parcial (Rollinson, 1993). Sin embargo, la mayoría de los magmas que se originan en el manto no llegan a la superficie en sus condiciones originales; en su lugar, sufren cambios en su composición en diferentes grados (McSween et al., 2003). En el contexto de subducción, la mayoría de los magmas, una vez formados, no asciende directamente a la superficie. Antes de alcanzarla, estos magmas se filtran y se acumulan en cavidades subterráneas denominadas cámara magmática, donde experimentan modificaciones en su composición química inicial. Estos cambios son el resultado de diversos procesos de diferenciación magmática como la cristalización fraccionada, la mezcla de magma, la contaminación o una combinación dinámica de estos procesos (Rollinson, 1993; Winter, 2010). Como resultado de estos procesos, las composiciones de los magmas experimentan una redistribución en las abundancias de los elementos presentes, y esto depende del comportamiento de compatibilidad de estos elementos (White, 2013).

Los productos magmáticos exhiben una diversidad no solo en su composición química, sino también en su textura y mineralogía. Esta variedad, combinada con otros factores, contribuye a explicar la amplia gama de estilos eruptivos, tipos de volcanes y depósitos volcánicos que se observan a lo largo del margen de subducción (Oesch et al., 2022; Pan et al., 2022).

Las propiedades físicas de los productos magmáticos, como la viscosidad, la temperatura y la presión, desempeñan un papel crucial en la determinación de los diversos estilos eruptivos. Estas propiedades están influenciadas por una serie de factores, siendo la composición química uno de

los más fundamentales cuando se trata de la viscosidad del magma (McBirney & Murase, 1984; Giordano et al., 2008) . Por ejemplo, al referirse a la lava que fluye por la superficie durante una erupción volcánica, generalmente indica una baja viscosidad. Por otro lado, si el magma presenta una alta viscosidad, es probable que se forme un domo en el cráter volcánico en lugar de fluir a través de la superficie. Una vez que la lava de alta viscosidad se solidifica en la superficie del cráter, esto conduce a una alta volatilización en la cámara magmática, lo que genera una alta presión y, como consecuencia, una erupción explosiva que expulsa material volcánico fragmentado, denominado como tefra (Self & Sparks, 1981; Cas & Wright, 1988).

De manera general, la prevalencia de flujos de lava se relaciona con erupciones efusivas que involucran un magma de composición básica, donde su composición no ha sido afectada significativamente. Por otro lado, la predominancia de tefra se asocia con erupciones explosivas que implican un magma de composición ácida y, como resultado, magmas más evolucionados (Cas & Wright, 1988; Gardner et al., 1995). El tipo de erupción y depósito de un volcán no están determinados únicamente por la composición magmática, sino que también están influenciados por otros parámetros. Estos parámetros incluyen las propiedades físicas del magma como la viscosidad y el contenido de gas. Por lo tanto para comprender y caracterizar completamente las erupciones volcánicas, es importante tener en cuenta todos los parámetros adicionales junto con la composición magmática (Jaupart & Allègre, 1991; Valdivia et al., 2023).

2.2 Descripción geoquímica

La descripción geoquímica desempeña un rol fundamental en la interpretación de la evolución magmática y en la discriminación entre depósitos de características similares. Para llevar a cabo esta tarea, se recurre a la utilización de diagramas que correlacionan datos geoquímicos y a la evaluación cualitativa de los productos volcánicos. El uso de estos recursos tiene diversas finalidades (Rollinson, 1993; Minnitt & Esbensen, 2023). A continuación, se nombran los diagramas que comúnmente se utilizan en la descripción geoquímica:

- Diagrama álcalis-sílice (TAS): Es uno de los esquemas de clasificación ampliamente utilizado para describir rocas volcánicas. Este diagrama relaciona el contenido de Na_2O y K_2O (álcalis totales, TA) con el contenido de SiO_2 (S), ambos expresados como porcentaje en peso de

óxidos, obtenidos a partir de un análisis químico de la roca. El diagrama de TAS organiza las rocas volcánicas en 14 campos (Le Maitre et al., 1989).

Este diagrama es particularmente útil para clasificar las rocas volcánicas en cuatro categorías principales: ultrabásicas, básicas, intermedias y ácidas (Peccerillo & Taylor, 1976).

- Diagrama AFM: Es una representación gráfica de variación triangular, y su nombre proviene de los óxidos representados en sus vértices: los óxidos de álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), los óxidos de hierro (FeO y Fe_2O_3) y el óxido de magnesio (MgO). Para generar este diagrama, se calculan los parámetros de trazado sumando los óxidos para luego recalcular cada uno como un porcentaje de la suma total (Rollinson, 1993).

Este diagrama se usa principalmente para distinguir entre las tendencias de diferenciación toleítica y calco-alkalina dentro de la serie de magma subalkalino. El diagrama presenta líneas divisorias que separan las rocas pertenecientes a la serie calco-alkalina de las rocas de la serie toleítica. La diferencia entre estas divisiones radica en que una produce un área más pequeña para la suite toleítica (Kuno, 1968; Irvine & Baragar, 1971).

- Diagramas de Harker: Son esquemas bivariados que utilizan el SiO_2 a lo largo del eje horizontal (eje x) y un óxido en el eje vertical (eje y). Estos diagramas se utilizan para visualizar las variaciones químicas en conjuntos de rocas ígneas con contenido de cuarzo variable, debido a que el cuarzo es uno de los componentes principales de dichas rocas y exhibe una variabilidad significativa en comparación con los otros óxidos. El uso del SiO_2 en estos diagramas permite señalar el grado de diferenciación que va experimentando el magma a lo largo de su proceso evolutivo (Cox et al., 1979; Rollinson, 1993).
- Diagrama de Spider: Es una representación gráfica que se basa en la normalización de elementos múltiples. Este enfoque se basa en una agrupación de elementos incompatibles con respecto a una mineralogía típica del manto. Son una extensión de los diagramas de elementos de Tierras Raras (REE) normalizados, con condritos más familiares en los que se añaden otros oligoelementos al diagrama REE tradicional. Este tipo de representación resulta particularmente útil para representar la química de las rocas ígneas (Rollinson, 1993).

La normalización se lleva a cabo utilizando los valores característicos del manto o de los meteoritos condriticos como punto de referencia. Esta normalización permite medir las desviaciones de una composición dada con respecto a una composición primitiva (Thompson, 1982; Wood et al., 1979).

A partir de los diagramas, es posible obtener una amplia gama de información sobre los procesos que tuvieron lugar tanto en profundidad como en la superficie, conduciendo a la formación de los depósitos. El análisis de los resultados obtenidos por la geoquímica de los depósitos volcánicos facilita la comprensión de los diferentes niveles de evolución que puede experimentar el depósito que se desea estudiar (McSween et al., 2003).

La descripción geoquímica se puede complementar con la estratigrafía para distinguir los diferentes procesos que han influido en la evolución magmática. Los estudios geoquímicos proporcionan valiosa información acerca de la composición y las características de los magmas. Estos análisis pueden revelar la presencia de diferentes tipos de magmas, sus fuentes y los procesos a los que se someten durante la diferenciación y la asimilación (Caricchi & Blundy, 2015). Por su parte, el análisis estratigráfico resulta fundamental para identificar diferentes secuencias volcánicas y sus entornos deposicionales, lo que aporta datos esenciales sobre la evolución temporal de los sistemas magmáticos, así como las características eruptivas que influyen en la depositación de los diferentes productos volcánicos (Branca et al., 2014).

Al combinar datos geoquímicos y estratigráficos, los investigadores pueden distinguir entre las diferentes etapas en la evolución magmática, tales como el fraccionamiento de cristales, la asimilación de la corteza, la mezcla del magma y la desgasificación. Estos métodos permiten una comprensión completa de los procesos que ocurren dentro de los sistemas magmáticos y su influencia en la actividad volcánica y en la composición de las rocas volcánicas (Dungan et al., 2001).

2.2.1 Centro y perturbación de datos geoquímicos.

El centro de un conjunto de datos composicionales se refiere al punto que representa la posición central o media de todos los puntos de datos en el espacio composicional. En diagramas de descripción geoquímica, particularmente en los diagramas ternarios, a veces los datos se concentran en un solo sector del espacio del triángulo. Por ello, es necesario distribuir de manera más eficiente estos datos para poder observar alguna diferencia característica. En este contexto el centro se ubica en el centro geométrico del triángulo (Martínez, 2022).

Para poder visualizar esta distribución de datos en relación con el centro del triángulo, es necesario realizar una perturbación. La perturbación implica modificar los datos de una manera específica.

En el caso de un diagrama ternario, se realiza una perturbación negativa, que consiste en alterar cada muestra de los datos composicionales por la inversa de su centro. El objetivo de esta perturbación es re-escalar y reposicionar los datos dentro del espacio composicional. La perturbación cambia la distribución de los puntos de datos en relación con su centro, pero mantiene invariables ciertas propiedades estructurales del conjunto, como los vértices (Martín-Fernández et al, 2004)

2.3 Análisis estadístico geoquímico

Al trabajar con datos geoquímicos, generalmente se encuentran normalizados, lo que significa que representan la abundancia relativa de elementos en lugar de una abundancia absoluta. En esta normalización, la suma de las variables o elementos de la composición es un valor constante. Esto implica que existe una fuerte dependencia entre estas variables, lo que significa que si el valor de un elemento en la composición cambia, necesariamente al menos otro elemento debe aumentar o disminuir en la composición con el fin de mantener la suma igual a la constante (Aitchison, 2005; Pawlowsky-Glahn & Buccianti, 2011). Esta característica de los datos composicionales tiene varias implicaciones que afectan la interpretación de los datos, como la aparición de correlaciones espurias o incoherencias subcomposicionales. Estos fenómenos pueden dificultar la correcta utilización e interpretación de herramientas estadísticas simples (Pawlowsky-Glahn & Buccianti, 2011).

En este caso, los datos se encuentran en un espacio muestral conocido como Simplex. El Simplex es un concepto matemático que hace referencia a una forma geométrica en un espacio de D -dimensional, donde D representa el número de componentes o variables que se están considerando. En este espacio, cada vértice del Simplex representa una variable distinta en la composición, y el interior del Simplex abarca todas las posibles combinaciones. El simplex S^D es un subconjunto $(D - 1)$ -dimensional del espacio real D -dimensional. Los diagramas ternarios son un ejemplo del espacio Simplex. En estos diagramas, los puntos en su interior representan combinaciones de las tres variables que se están analizando, y la suma de estas combinaciones es una constante, generalmente 100 (Pawlowsky-Glahn & Buccianti, 2011; Greenacre, 2018). La definición formal del Simplex es la siguiente:

$$S^D: \left\{ \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_D]; x_i > 0; \sum_{i=1}^D x_i = k \right\}$$

Donde “k” es la constante establecida, este es un valor que varía dependiendo del trabajo en el que se esté involucrado y de los elementos que se están analizando.

Para evitar que las dependencias entre las variables que existen en el espacio muestral del Simplex afecten la aplicación de las herramientas estadísticas, es necesario realizar una transformación en los datos que se están analizando. Esto tiene como objetivo llevar el espacio D-dimensional del Simplex a un espacio real de D dimensiones (\mathbb{R}^D o \mathbb{R}^{D-1}), donde D o D – 1 representa la cantidad de variables en la composición y esta depende de la transformación que se realice (Martín-Fernández et al., 2011; Greenacre, 2018).

2.3.1 Transformaciones log-cociente

Una transformación log-cociente es aquella que manda un punto del espacio muestral del Simplex al logaritmo de un cociente que involucra a las partes de la composición. Esto facilita la conversión de datos composicionales a un espacio real (Martínez, 2022).

Existen diferentes variantes de la transformación log-cociente, cada una con propiedades prácticas y teóricas distintas. Dos de las transformaciones más comunes son la transformación log-cociente aditiva (alr), la transformación log-cociente isométrica (ilr) y la transformación log-cociente centrada (clr). Estas se basan en el uso de logaritmos de cocientes entre las partes de un dato composicional (Aitchison, 1984).

La transformación alr es ampliamente utilizada, principalmente debido a su utilidad en facilitar diversos cálculos. Para el cálculo de esta transformación se utiliza un componente como divisor del cociente, se puede utilizar cualquier componente pero lo importante es que se tiene que utilizar el mismo cociente en todas las partes. Esta transformación opera entre espacios vectoriales, lo que significa que conserva las operaciones matemáticas básicas, utilizándose en pruebas de hipótesis y regiones de confianza (Pawlowsky-Glahn & Buccianti, 2011; Greenacre, 2018).

Por otro lado, la transformación clr ofrece la ventaja adicional de ser una isometría entre ambos espacios, lo que significa que no solo conserva las operaciones, sino también las distancias entre los datos. Esto la hace especialmente útil en análisis que se basan en distancias, como el análisis

de clustering. También se emplea para evaluar el grado de correlación entre componentes y entre muestras, por ejemplo, en el análisis de componentes principales (Pawlowsky-Glahn & Buccianti, 2011; Greenacre, 2018). La transformación log-cociente centrada de una composición se define como:

$$\text{clr}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) = \left(\ln \frac{x_{i1}}{g_i}, \ln \frac{x_{i2}}{g_i}, \dots, \ln \frac{x_{iD}}{g_i} \right)$$

Donde D es el número de variables del espacio, i es el vector composicional y g_i es la media geométrica del vector composicional i .

La transformación ilr crea un nuevo espacio en el que las dimensiones son independientes y de igual importancia. Esta característica no solo conserva las operaciones matemáticas básicas y las distancias entre los datos, como en el caso de la transformación clr, sino que también organiza los datos de forma equilibrada, distribuyendo de manera única las distintas partes de la composición original (Pawlowsky-Glahn & Buccianti, 2011; Greenacre, 2018).

Las transformaciones log-cociente son esenciales en el análisis de datos composicionales, y su elección depende del objetivo del estudio. La transformación alr tiene la ventaja de ser simple y efectiva para comparaciones relativas, aunque puede ser sesgada por la elección del denominador. Por otro lado, la transformación clr tiene la ventaja de ser intuitiva y conserva las distancias entre las muestras, pero en algunos casos puede introducir correlaciones espurias. En cambio, la transformación ilr ofrece un espacio ortogonal que evita correlaciones espurias y es útil en la reducción de dimensionalidad. Sin embargo, su complejidad computacional y conceptualmente la hace menos adecuada para análisis estadísticos multivariados simples, siendo preferible reservarla para estudios más avanzados (Pawlowsky-Glahn & Buccianti, 2011).

2.3.2 Herramientas de discriminación y correlación

En estadística multivariable, las herramientas de discriminación se emplean para identificar las variables que mejor distinguen entre grupos o categorías diferentes dentro de un conjunto de datos. Por otro lado, las herramientas de correlación se utilizan para analizar las relaciones estadísticas entre múltiples variables, lo que permite identificar patrones de asociación o dependencia entre dichas variables (Reimann et al., 2011; Varmuza & Filzmore, 2016). Entre estas herramientas de discriminación y correlación se encuentran:

- **Análisis de Componentes Principales (PCA):** Es una técnica de estadística multivariable que se utiliza para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos, preservando la mayor cantidad posible de su variabilidad original. El PCA genera esta reducción identificando las direcciones principales de variación en los datos, conocidas como componentes principales, y proyectando los datos en un nuevo espacio de menor dimensión definido por estos componentes. Esta técnica facilita la visualización y el análisis de datos, así como la reducción del ruido y la identificación de patrones importantes en un conjunto de variables correlacionadas (Jackson, 2005; Varmuza & Filzmore, 2016).
- **Correlación Lineal:** La correlación es una técnica utilizada para medir la asociación lineal entre dos variables cuantitativas, mientras que la regresión lineal busca identificar una relación matemática entre ellas. La regresión proporciona información sobre cómo cambia una variable dado un cambio en la otra, mientras que la correlación evalúa qué tan bien se ajustan los datos en una línea de regresión. El coeficiente de correlación de Pearson es una medida estadística que evalúa la relación lineal implicando la covarianza entre las dos variables y las desviaciones estándar de cada variable, este valor varía entre -1 y 1, indica la fuerza y la dirección de la relación entre las variables. Un valor de 1 o -1 indica una correlación perfecta positiva o negativa, respectivamente, mientras que un valor cercano a 0 sugiere una correlación débil (Zou et al., 2003; Yang et al., 2021). Para observar las correlaciones lineales de diferentes variables a la vez se usan herramientas gráficas como el *pairplot* que visualiza las relaciones en una matriz de gráficos de dispersión o la matriz de correlación de Pearson, el cual corresponde una representación tabular de la correlación entre todas las variables en un conjunto de datos. Este tipo de herramientas ayuda a la identificación de tendencias y correlaciones entre variables (Bellie et al., 2020).
- **Análisis de Clúster Jerárquico:** Es una técnica de estadística multivariable utilizada para clasificar y agrupar un conjunto de datos en subconjuntos o clústeres. Esta clasificación se basa en la similitud de las características de los datos, permitiendo identificar las relaciones naturales entre ellos. Como ventaja de este método es que no requiere la especificación previa del número de clústeres, y construye una jerarquía de clústeres representada en forma de dendrograma. Esta jerarquía se puede formar de dos maneras: a partir de clústeres individuales que se fusionan progresivamente según su similitud, o partir de un único clúster que se va dividiendo

sucesivamente Esta técnica facilita la habilidad de detectar y representar las relaciones complejas entre los datos (Aldenderfer & Blashfield, 1984; Everitt et al., 2001).

- **Análisis Discriminante Lineal (LDA):** Es una técnica de estadística multivariable que se utiliza para identificar una combinación lineal de características que diferencien dos o más clases de eventos u objetos a través de una transformación lineal de las clases originales. El objetivo del LDA es proyectar un conjunto de datos en un espacio de menor dimensión, manteniendo una capacidad de clasificación eficaz y preservando al máximo la separación entre las distintas clases. El LDA busca maximizar la distancia entre las medias de las diferentes clases, al tiempo que minimiza la dispersión dentro de cada clase (Xanthopoulos et al., 2013; Tharwat et al., 2017)

2.3.3 Aprendizaje automático supervisado

El aprendizaje automático supervisado (supervised machine learning) es un subcampo del aprendizaje automático donde los modelos son entrenados utilizando conjunto de datos etiquetados. En este contexto, al referirse a supervisado se refiere a que los datos de entrenamiento incluyen tanto las entradas (características) como las salidas deseadas (etiquetas). Un ejemplo de esto podría ser el uso de datos composicionales como entradas, a los que se les asigna un origen como datos de salida (Jiang et al., 2020)

El objetivo principal del aprendizaje supervisado es aprender una función que pueda asignar características a cada salida deseada. Esto significa que, el modelo puede predecir la salida correspondiente. De esta manera, se crea una herramienta capaz de identificar de forma sistemática la etiqueta adecuada para los datos que no han sido previamente etiquetado (Nasteski, 2017). Dentro del aprendizaje automático supervisado, se utilizan diferentes técnicas, entre estas se encuentran:

- **Decision tree (árboles de decisión):** Es un algoritmo utilizado en estadística multivariable y aprendizaje automático con el objetivo de para tomar decisiones o realizar predicciones, tanto en clasificación como en regresión. Esta técnica utiliza una estructura de árbol, en la que cada nodo simboliza una característica específica del conjunto de datos. Las ramas derivadas de estos nodos representan las decisiones basadas en dichas características. Este proceso se repite a cada nodo, subdividiendo los datos en grupos más pequeños y

manejables. El proceso concluye con una decisión final en las hojas del árbol. Este algoritmo es popular por su facilidad de interpretación y su capacidad para manejar tanto variables categóricas como numéricas (Kingsford & Salzberg, 2008).

- **Random forest aleatorio:** Es un avanzado algoritmo de aprendizaje automático que se utiliza para tareas de clasificación y la regresión. Este combina múltiples decision tree en un único modelo, lo que lo hace eficaz en el manejo de grande conjuntos de datos con múltiples variables. Cada árbol se construye a partir de una muestra aleatoria del conjunto de datos, seleccionando un subconjunto aleatorio de las características en cada división. Esta estrategia promueve la diversidad entre los árboles, contribuyendo a la robustez y precisión del modelo global. En clasificación, la decisión final se toma por mayoría de votos entre todos los árboles (Cutler et al., 2012).

3 MARCO GEOLÓGICO

3.1 Rasgos morfoestructurales y geomorfológicos

La Región del Maule (34°41'S-36°33'S) en los Andes, se caracteriza por una disposición morfoestructural que comprende tres franjas principales de orientación norte-sur: la Cordillera de la Costa, la Depresión Central y la Cordillera Principal. Esta última, donde se concentra la actividad volcánica actual, y por lo tanto es donde se enfoca el área de estudio.

La Cordillera Principal está mayormente conformada por un basamento de rocas ígneas y sedimentarias de origen marino y continental de edad Meso-Cenozoica, con intrusiones Mio-Pliocenas (Charrier et al., 2002; Farías et al., 2008). Según la clasificación geomorfológica de Börgel (1983), la Región del Maule se divide en varias unidades, siendo la Cordillera Andina la que abarca el Grupo Descabezados.

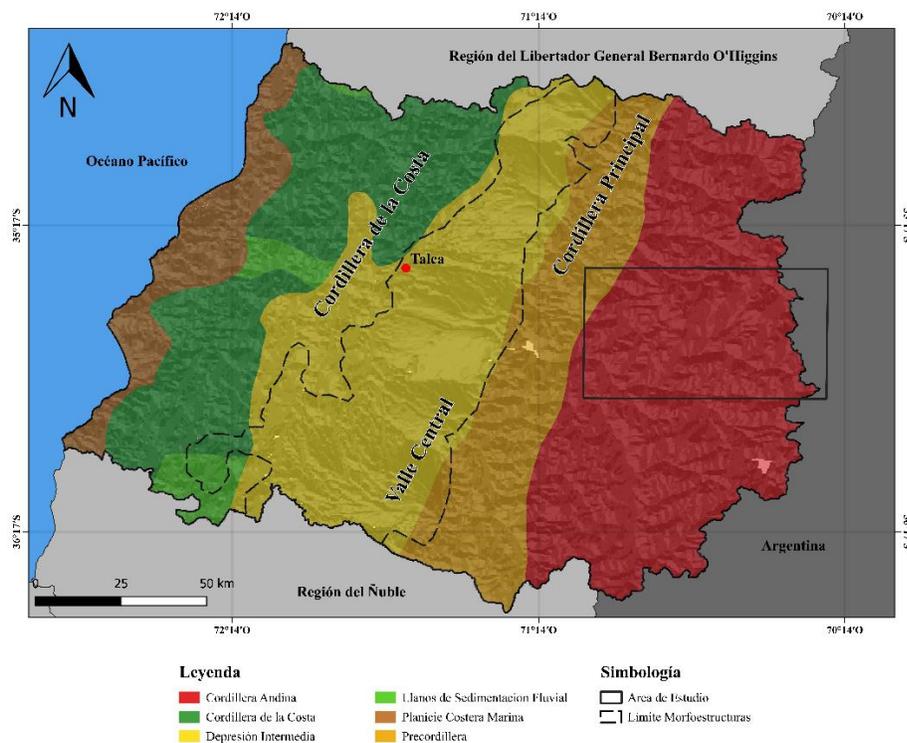


Figura 3.1. Mapa morfoestructural de la Región del Maule. Se observa delimitada la zona de estudio.

Dentro de la Cordillera Andina, se identifican tres tipos principales de relieves, como lo describen González-Ferrán y Martínez (1962): remanentes del macizo andino, caracterizados por una intensa erosión influenciada por factores estructurales y litológicos; valles, lagunas y glaciares, formados

principalmente por la erosión glacial y fluvial; y estructuras volcánicas, que son elementos agradacionales originados principalmente por la actividad volcánica cuaternaria.

3.2 Control estructural

A nivel regional, la distribución espacial de calderas y estratovolcanes estaría controlada por estructuras de orientación NW-SE y NE-SW (Stern et al., 2007). Estas estructuras se desarrollan en el sistema estructural de la faja plegada y corrida de Malargüe. En la zona de estudio, este sistema tiene un comportamiento predominante de piel gruesa caracterizada por una serie de bloques de basamento que limitan zonas internas de deformación de piel delgada (Silvestro et al., 2005; Dicarlo & Cristallini, 2007).

El mecanismo de deformación ha sido interpretado como el desarrollo de corrimientos de bajo ángulo y la inversión de fallas normales de alto ángulo. Las primeras son estructuras más jóvenes con una orientación NS a NNE, mientras que las segundas corresponden a estructuras que se han formado durante la extensión mesozoica y luego invertirse durante la compresión cenozoica, con una orientación NNW a NW (Giambiagi et al., 2009; Piquer et al., 2023).

El acortamiento disminuye gradualmente de norte a sur, pasando de 25 km a $35^{\circ}30'S$ hasta 10 km a $36^{\circ}17'S$ (Giambiagi et al., 2009) donde este cambio se aprecia en la disminución de la elevación de la cadena montañosa.

A lo largo de la zona de estudio, se evidencia que los estratovolcanes se desarrollan sobre fallas inversas que discurren de manera paralela al margen. Estas fallas se desarrollan tanto dentro de las unidades Mesozoicas como en el contacto Meso-Cenozoico (Cembrano & Lara, 2009). En base a esto se evidencia la estrecha relación entre la tectónica y el volcanismo en la región. El primer orden de esta relación es la creación de espacio para la ascensión de los magmas a través de estructuras generadas como consecuencia de la actividad tectónica. En este contexto, el magma se emplaza y/o transporta a través de estas estructuras; además, el calor y la sobrepresión magmática debilitan la roca circundante, lo que a su vez facilita la propagación de estas estructuras (Cembrano et al., 2007).

En la región que abarca el Grupo Descabezados, se encuentran sistemas de fallas que muestran tres direcciones predominantes: NW, NE-ENE y N-NNE. Estos sistemas de fallas desempeñan un papel

crucial en la ubicación de diferentes productos magmáticos, como cuerpos plutónicos, enjambres de diques y alineaciones volcánicas (Piquer et al., 2023).

Un ejemplo es el caso de los respiraderos máficos de Los Hornitos y La Resolana, que se ubican en el extremo suroeste del Grupo Descabezados. Estos respiraderos se encuentran en el límite entre los dominios basales del Mesozoico y el Cenozoico. En la región, este límite se interpreta como el límite oriental de la cuenca extensional de la Formación Abanico (Piquer et al., 2010; Charrier et al., 2002). A nivel local, estos respiraderos máficos marcan el contacto entre las rocas volcánicas y sedimentarias fuertemente plegadas de la Formación Abanico y el Plutón de la Invernada (Hildreth & Drake, 1992; Astaburuaga 2014). Esto sugiere que los centros de emisión se encuentran en una zona tectónicamente débil que permitió su emplazamiento. Este lineamiento tiene una orientación NNW (Figura 3.2; Giambiagi et al., 2015).

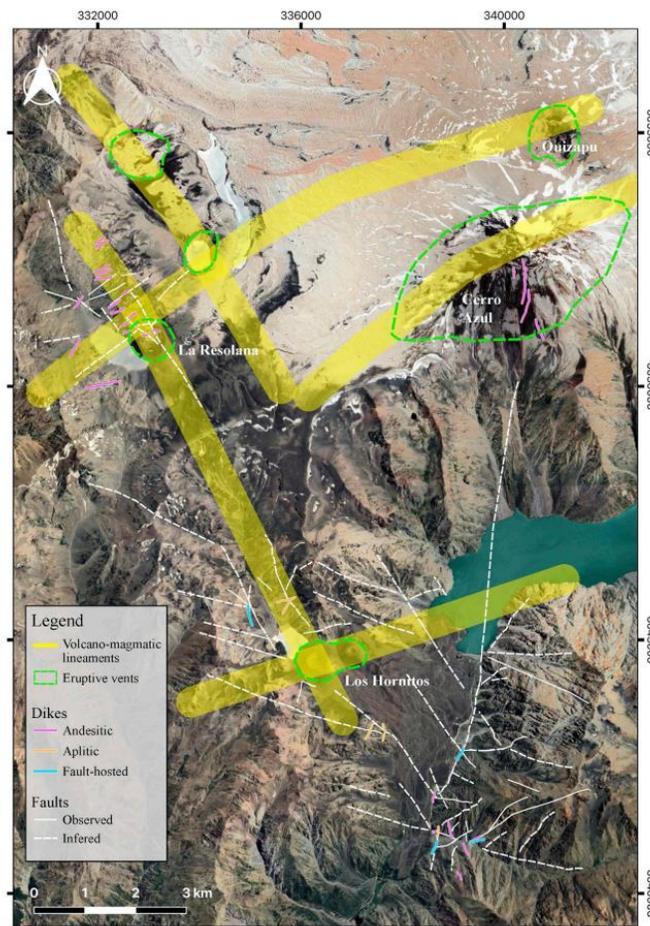


Figura 3.2. Estructuras volcánicas y alineamientos en zona sur Grupo Descabezados. Extraído de Piquer et al. (2023)

En el área de La Resolana, se ha identificado una relación con la orientación de conjuntos de diques. Estos diques muestran una notable coincidencia en su dirección de elongación con el volcán Cerro Azul y el cráter del volcán Quizapu. Esta coincidencia sugiere la posibilidad de una relación genética entre estos centros de emisión, lo que sugiere que podrían compartir una fuente magmática común o formar parte de un mismo sistema magmático. La deformación dextral y las fallas con orientación NE a ENE, podrían haber tenido un papel influyente en el emplazamiento y la orientación tanto de La Resolana como del Quizapu (Figura 3.2; Piquer et al., 2023).

3.3 Grupo Volcánico Descabezados

El Grupo Descabezados comprende al menos 18 centros eruptivos de actividad volcánica entre el Pleistoceno y el Holoceno. Entre estos centros volcánicos, destacan, en términos de dimensión, el Descabezado Grande, Cerro Azul y Quizapu. Además de estos volcanes, se incluyen centros eruptivos de menor volumen como La Resolana, Los Hornitos, Cerro Colorado, Reformados, Mondaca y Alto Las Mulas. También se incorporan centros aledaños que, aunque no forman parte del complejo volcánico Quizapu-Descabezado Grande-Cerro Azul, son relevantes en la zona, como Caldera Calabozos, Descabezado Chico y Cerro del Medio (Figura 3.4). Dentro de esta diversidad de centros volcánicos, se observa una amplia variedad de depósitos y composiciones químicas (Hildreth & Drake, 1992). Vera et al. (2022) hace una descripción geológica detallada de cada uno de los centros eruptivos, las cuales se señalan a continuación:

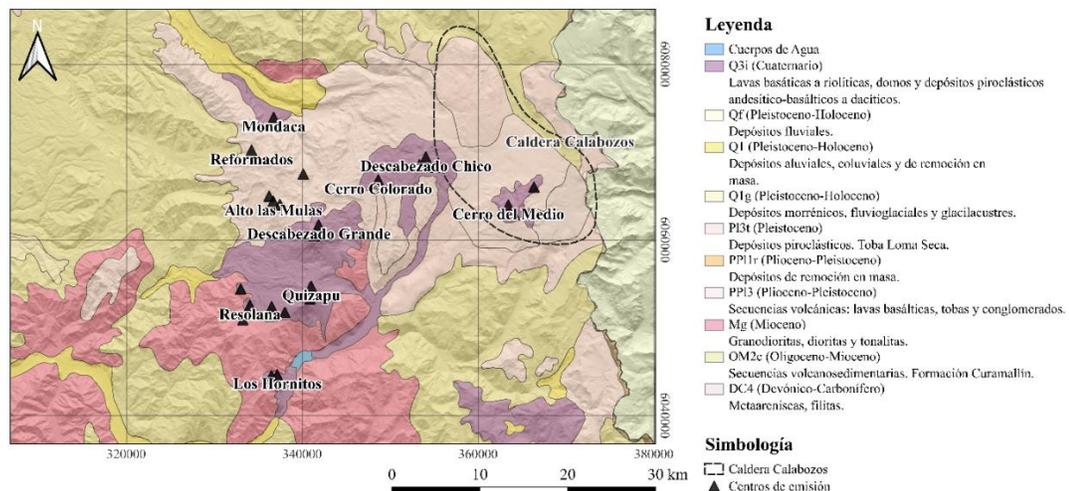


Figura 3.3. Mapa de ubicación de los principales centros de emisión del Grupo Descabezados. Geología obtenida de Mapa geológico de Chile 1:1.000.000.

3.3.1 Volcán Descabezado Grande

Estratovolcán compuesto de edad Pleistocena-Reciente, formado por una sucesión de lavas andesíticas a riódacíticas, aglomerados y depósitos piroclásticos de flujo y de caída. Este volcán cubre un área aproximada de 65 km² (González-Ferrán, 1994). Se caracteriza por presentar un edificio principal y un cráter asimétrico de menor tamaño al noreste del cráter principal, creado durante la última erupción entre 1932 y 1935, denominado como “cráter Respiradero”. El cráter principal tiene la cima truncada, con un diámetro basal de aproximadamente 11 km y un volumen estimado de alrededor de 30 km³. Por su parte, el cráter Respiradero tiene un diámetro basal de 1,5 km el cual está cubierto por hielo (Hildreth & Drake, 1992).

Las laderas del volcán presentan evidencia de erosión parcial por efecto de procesos glaciares, lo que ha dado a lugar a la formación de circos glaciares distribuidos de manera radial alrededor del edificio volcánico. En cuanto a su actividad, ésta se remonta del Pleistoceno Medio, comenzando con la construcción de la estructura volcánica mediante la emisión de flujos de lava, los que posiblemente provienen desde centros de emisión cuyos cuellos volcánicos erosionados se encuentran en el flanco oriental (Drake, 1976). Durante el Pleistoceno Superior, la construcción del edificio principal continuó con la emisión de flujos de lava predominantemente riolítica. En términos de actividad Reciente, esta se caracteriza principalmente por la formación de domos de lava adventicios, flujos de lava de corto alcance los cuales fluyeron hacia el norte desde el cráter principal, la presencia de corrientes de densidad piroclásticas y caídas de piroclastos asociados a erupciones plinianas. Además, se ha registrado material piroclástico efecto de explosiones freatomagmáticas menores ocurridas en el cráter Respiradero. Los valles al este y sureste del cráter principal se encuentran parcialmente rellenos por extensos depósitos de avalanchas de detritos (Hildreth & Drake, 1992).

3.3.2 Volcán Cerro Azul

Estratovolcán de edad Pleistocena con una cima asimétrica y laderas parcialmente erosionadas. Este volcán está compuesto principalmente por flujos de lava andesítico-basáltico, además flujos dacíticos a riódacíticos y aglomerados volcánicos en menor proporción. Este edificio volcánico cubre un área aproximada de 36 km² y un volumen estimado de 11 km³. El cráter central se encuentra abierto hacia el noroeste y está relleno con piroclastos provenientes de la erupción del

Quizapu de 1932. Hacia el flanco suroeste, se localizan dos centros de emisión adventicios. Uno de estos centros presenta una morfología de cono de piroclastos, mientras que el otro es un centro de emisión al cual está asociado a una colada de lava que se extiende a lo largo de 1,5 km de longitud (González-Ferrán, 1994; Hildreth & Drake, 1992).

La construcción de este edificio volcánico comenzó en el Pleistoceno Superior con la emisión de lavas basálticas de textura afanítica. Estas lavas habrían cubierto lo que antes era un volcán ancestral denominado como “Casitas” (Wulff, 2003). En cuanto a la actividad reciente del Cerro Azul, se han identificado depósitos de corrientes de densidad piroclásticas en las quebradas que desembocan en la laguna de la Invernada. Además, se han reconocido depósitos de caída de piroclastos escoriáceos en las proximidades del cráter principal.

3.3.3 Volcán Quizapu

Centro eruptivo adventicio localizado en el flanco norte del estratovolcán Cerro Azul, este ha dado lugar a la formación de un cráter de explosión de aproximadamente 700 m de diámetro en su borde superior y alrededor de 300 m en su conducto interior. Al borde de este cráter se ha desarrollado un pequeño cono con alturas que varían entre los 150 y 300 m. Este cono refleja una compleja estructura compuesta por lavas dacíticas, aglomerados, flujos de piroclastos y depósitos de tefra. La composición de sus productos varía desde basaltos a riolitas (González-Ferrán, 1994).

El volcán Quizapu ha sido responsable de dos de las erupciones históricas más voluminosas registradas en Sudamérica, documentadas en 1846 y 1932. Estos eventos se caracterizaron por su gran magnitud la cual generó productos derivados tanto de una actividad efusiva como de una actividad explosiva. La actividad volcánica de estos eventos comprende una amplia gama de depósitos volcánicos, como flujos de lavas de gran alcance, corrientes de densidad piroclásticas formadoras de ignimbritas, dispersión y caída de piroclastos, así como la formación de lahares. Además de estas erupciones mayores, el volcán experimentó una actividad explosiva intermitente de baja magnitud registrada entre los eventos mencionados. Como resultado, en el interior de su cráter se encuentra una compleja asociación de lavas, aglomerados, depósitos de caída y de corrientes piroclásticas con diferentes grados de soldamiento (Hildreth & Drake, 1992).

Este centro eruptivo habría comenzado a formarse en 1846, con la emisión de 16 flujos de lavas que se extendieron tanto hacia el oeste como hacia este del volcán, cubriendo un área de

aproximadamente 50 km² (Domeyko, 1850). Sin embargo, es posible que su actividad eruptiva haya comenzado antes ya que, aunque la mayoría de los flujos de lava se atribuyen a la erupción de 1846-1848, el que se extendió con una mayor longitud hacia el oeste (18 km) muestra signos de una mayor erosión vertical, por lo que se infiere podría haberse emplazado durante un evento anterior a esta erupción. Además, se reconoce para la erupción de 1932 una amplia capa de pómez de color blanquecino que cubre gran parte del área de estudio. (Hildreth & Drake, 1992; Ruprecht et al., 2012).

3.3.4 Centros Eruptivos Menores Básicos

Este subgrupo está compuesto por cuatro conos piroclásticos y tres maares de dimensiones menores. Comparten similitudes tanto en su composición basáltica a andesítica-basáltica como en sus características eruptivas. Los conos piroclásticos que conforman este grupo son Los Hornitos (cono este y oeste), Cerro Colorado y Reformados. Los maares forman parte de La Resolana (norte, centro y sur).

3.3.4.1 Los Hornitos

Corresponde a dos conos gemelos formados por la acumulación de material piroclástico de caída de composición andesítico-basáltico. Estos conos tienen diámetros basales de 770 m y 420 m, respectivamente, y están dispuestos en una orientación este-oeste, separados por aproximadamente un kilómetro. Su edad se estima Holoceno-Reciente. Sin embargo, se han obtenido edades más tempranas para el cono este, gracias a consideraciones estratigráficas y el estado de conservación (González-Ferrán, 1994).

La actividad eruptiva del cono este comenzó con una etapa altamente explosiva, la cual generó un amplio depósito piroclástico con proporciones variables de lapilli y ceniza, dando a lugar a corrientes de densidad piroclástica que alcanzaron una distancia de hasta 2,6 km. Con el tiempo, la explosividad fue disminuyendo gradualmente durante la formación del cono piroclástico. Posteriormente, se produjo un vigoroso flujo de lava aa, que se extendió hasta una longitud de 5,1 km y tuvo un espesor de aproximadamente 10 m a través de su base. Este flujo de lava avanzó aguas abajo, llegando hasta el río Cipreses e inundando las aguas que dieron origen a la Laguna la Invernada (Salas et al., 2015).

La química de toda la roca indica un cambio en su composición desde basáltica en las etapas iniciales hasta andesita basáltica en las etapas posteriores de la erupción. Los análisis geoquímicos efectuados en los depósitos de estos conos volcánicos han relevado valores anómalos de MgO, Cr, y Ni, lo que sugiere la presencia de un magma primitivo como fuente de origen (Salas et al., 2017).

3.3.4.2 Cerro Colorado

Cono piroclástico que se compone de flujos de lavas y piroclastos basálticos de edad Pleistoceno Superior-Holoceno. Este centro eruptivo se levanta sobre un extenso campo de lavas basálticas, cuyos flujos son principalmente de composición andesítica basáltica y se extienden al oeste y suroeste. La estructura volcánica se encuentra en un excelente estado de conservación, lo que infiere una actividad durante el período post-glacial. La última erupción documentada habría ocurrido en 1835, aunque no se dispone de mayores detalles al respecto (González-Ferrán, 1994; Petit-Breuilh, 2004).

3.3.4.3 Reformados

Cono piroclástico de composición andesítica-basáltica de edad Pleistocena-Holocena. Este volcán presenta extensos flujos de lava andesíticas que descienden hacia el oeste y se caracterizan por la presencia de depósitos de caída de escorias y proyectiles balísticos. Al igual que el Cerro Colorado, se puede inferir que este volcán estuvo activo durante el período post-glacial, dado su buen estado de conservación en términos de su estructura volcánica (González-Ferrán, 1994).

3.3.4.4 La Resolana

Los centros de emisión La Resolana conforman un conjunto de tres maares situados al oeste del Cerro Azul, compuestos principalmente por lavas y escorias andesíticas-basálticas de edad Holocena-Reciente. En primer lugar, La Resolana Norte consiste en un cráter con un diámetro de 950 m, el cual está relleno por una colada de aproximadamente 2,8 km de extensión. A continuación, se encuentra La Resolana Centro, un maar con un diámetro de 900 m, que alberga en su interior una laguna intracrática. Por último, La Resolana Sur es otro maar de este conjunto, con un diámetro de 600 m aproximadamente (González-Ferrán, 1994).

En las paredes de estos centros de emisión, se pueden identificar acumulaciones de material piroclástico altamente fragmentado, resultado de actividad freatomagmática, así como

aglutinaciones de lava asociadas con actividad estromboliana. Entre sus productos volcánicos se encuentran bloques, bombas y lavas que se caracterizan por tener una baja proporción de fenocristales.

Las andesitas basálticas pertenecientes a este centro de emisión tienen una composición común en comparación a la escoria terminal del volcán Quizapú, pero muestran contenidos más bajos en MgO, lo que indica que están en un estado menos evolucionado (Salas et al., 2017).

3.3.5 Centros Eruptivos Menores Ácidos

Este subgrupo está compuesto por cinco centros de emisión que comparten similitudes en su composición química dacítica-riolítica y condiciones eruptivas. Estos centros eruptivos incluyen Mondaca, Alto Las Mulas (dos centros de emisión), Domo Estero del Volcán y Domo Torta.

3.3.5.1 Mondaca

El volcán Mondaca consiste en un domo de lava de aproximadamente 350 m de altura y está compuesto por coladas de lava de composición riolítica. Estas coladas se formaron durante una erupción monogenética, compuesta por dos lóbulos lávicos diferentes. El primero se extiende hacia el oeste alcanzando una longitud máxima de 7,7 km y anchos variables que oscilan entre 0,5 y 2 km, el espesor máximo que alcanza es de hasta 120 m. El segundo lóbulo, por su parte, sobrepone al primero y fluye aguas arriba, rellenando el valle y alcanzando aproximadamente 3 km de longitud desde el centro de emisión. Este segundo lóbulo también contribuye a la formación de la Laguna de Mondaca, ya que esta embalsa las aguas (Brüggen, 1950; González-Ferrán, 1994).

Este centro de emisión está asociado con una sucesión piroclástica de 20 m de espesor. Esta sucesión se encuentra al sur y al este del centro eruptivo y se compone por una alternancia de depósitos de caída y oleadas piroclásticas. Además, en la parte superior de la sucesión, se identifica un depósito de flujo de bloques y cenizas.

Los elementos mayores de sus depósitos permiten clasificar las rocas de este volcán como riolitas calcoalcalinas con un alto contenido de K con afinidad subalcalina. Sin embargo, en algunos casos, se presentan ligeramente alcalinas. La alta dispersión de K es una característica que permite distintiva que diferencia estas rocas de las pómez provenientes de los volcanes Descabezado Grande y Quizapu (Naranjo et al., 2021).

3.3.5.2 Alto Las Mulas

Estrato-cono formado por gruesos flujos de lava riódacítica que avanzaron hacia el oeste-suroeste del volcán Descabezado Grande. Se estima que este volcán es de edad Holocena. Este se caracteriza por una colada de lava que se extiende a lo largo de 3,6 km aproximadamente, con ancho variable que oscila entre 0,8 y 1,8 km, alcanzando un espesor máximo de 60 m (González-Ferrán, 1994)..

3.3.5.3 Domo Estero y Domo Torta

Dentro del Grupo Descabezados se han identificado dos domos de obsidiana con una coloración negra característica y composición dacítica. El primero de ellos, conocido como Domo Estero del Volcán, presenta una composición con un 67% de SiO₂, mientras que el segundo, denominado Domo Torta, exhibe una composición de un 69% de SiO₂.

3.3.6 Centros Eruptivos Aledaños

Al referirse a centros eruptivos aledaños del Grupo Descabezados, son aquellos que en la bibliografía no forman parte del Complejo Volcánico Quizapu- Descabezado Grande-Cerro Azul.

3.3.6.1 Caldera Calabozos

Corresponde a una caldera compuesta que se formó durante el Pleistoceno tardío. En lo que respecta a su composición, las rocas expuestas en el lado norte y este de la caldera están compuestas de rocas sedimentarias volcanoclásticas, intercaladas con calizas, yeso y capas delgadas de lavas y tobas. Estas capas se encuentran cubiertas de manera discordante por capas de lavas de andesita que se extienden de manera relativamente plana o con una ligera inclinación hacia el oeste. Por otro lado, en las rocas expuestas al sur y al oeste de la caldera, predominan lavas y tobas de la formación Campanario, que también están cubiertas por capas lavas de andesita con una disposición subhorizontal. A lo largo de toda la región de la caldera, están expuestas intrusiones locales de granitoides (Grunder & Mahood, 1988).

Hace aproximadamente 0,30 y 0,15 Ma, la caldera Calabozos experimentó la emisión de al menos dos considerables flujos de ceniza, conocidos como la Unidad V y la Unidad S, respectivamente. La Unidad V se encuentra sobre un flujo de cenizas denominado como unidad L, la cual data de hace unos 0,8 Ma y se localiza en las proximidades del margen sur y este de la caldera. A pesar de que la Unidad L posee una composición y mineralogía similares a las Unidades V y S, todavía no

se ha establecido de manera concluyente su relación con la caldera Calabozos. Estas unidades forman parte de la denominada Toba Loma Seca, que representa un volumen estimado de magma de entre 200 y 300 km³. Esta masa magmática exhibe una variación composicional zonificada que abarca desde la riodacita hasta la dacita (Grunder & Mahood, 1988).

En la caldera, se registra un colapso causado por la erupción de las Unidades V y S, específicamente en los flancos norte y este de la caldera. Mientras que el margen occidental de la caldera está en su mayoría cubierto por lavas y conos del Holoceno. Tras el colapso de la caldera, se produjo un fenómeno de resurgimiento magmático que afectó principalmente la mitad norte de la misma. Similar al proceso de colapso, el resurgimiento de la caldera exhibió un carácter asimétrico, manifestándose con un levantamiento máximo en el lado este de la cúpula y un foso asimétrico en el lado occidental (Grunder & Mahood, 1988).

En lo que respecta a las composiciones de los depósitos volcánicos, se observa una variación que abarca desde andesitas basálticas hasta riodacitas. Esta diversidad en la composición indica un proceso de diferenciación en el sistema magmático, que a su vez se refleja en los productos volcánicos resultantes. A medida que el magma se va diferenciando, se observa en sus depósitos una disminución en los niveles de concentración de elementos como el CaO, Al₂O₃, FeO, MgO, TiO₂, MnO, P₂O₅ y Sr, al mismo tiempo que se registra un aumento en los valores de Na₂O, K₂O, Rb, Ba, Zr y la relación Rb/Sr (Hildreth et al., 1984).

3.3.6.2 Volcán Descabezado Chico

Corresponde a un centro eruptivo múltiple perteneciente al complejo volcánico Caldera Calabozos, que alberga un conjunto de 13 cráteres abiertos distribuidos en un área de aproximadamente 6 km². Estos cráteres están asociados a la emisión de flujos de lavas con composiciones andesítico-basálticas y andesítico-dacíticas, que han escurrido de manera radial descendiendo hacia las nacientes del Estero Barroso y el Cajón de Los Calabozos. Para este centro eruptivo múltiple se estima una edad Holoceno-Reciente (Fuenzalida, 1941; González-Ferrán, 1994).

3.3.6.3 Cerro del Medio

Corresponde a un centro eruptivo múltiple con siete cráteres en su parte central, que han dado origen a flujos de lava de composición andesítica-dacítica. Estos flujos separan las nacientes de los ríos Colorado del Estero Monsalve y el Cajón Grande. La edad de este centro eruptivo múltiple se

estima Pleistoceno-Holocena. En el área sur, las lavas se superponen a las Tobas de Loma Seca, cuya edad potasio-argón es de $0,79 \pm 0,15$ Ma (Fuenzalida, 1941; González-Ferrán, 1994).

3.4 Historial Eruptivo

En relación con el registro eruptivo reciente del Grupo Descabezados, es importante destacar que la atención se centra en la actividad continua que ha presentado el volcán Quizapu desde 1846 hasta 1960, Vera et al. (2022) realiza una compilación bibliográfica de los eventos eruptivos que han ocurrido en el Grupo Descabezados. Durante este periodo, el volcán experimentó erupciones de grandes volúmenes de material volcánico, convirtiéndose así en uno de los sistemas de mayor producción magmática en los Andes en tiempos históricos (Domeyko, 1850; Hildreth & Drake, 1992). Una característica distintiva de este volcán es su variabilidad en el estilo eruptivo a lo largo del periodo entre 1846 y 1960. Inicialmente, exhibió actividad efusiva, pero más tarde experimentó una transición hacia una actividad explosiva (Hildreth & Drake, 1992; Ruprecht et al., 2012).

Además de la actividad del volcán Quizapu, se registra de manera secundaria a la actividad eruptiva del Grupo Descabezados un evento reportado para el volcán Cerro Colorado, así como la formación del cráter Respiradero entre 1932 y 1935. Estos eventos secundarios complementan el panorama eruptivo reciente del Grupo Descabezados (Petit-Breuilh, 2004)

1835 Actividad explosiva del volcán Cerro Colorado, sin mayor antecedentes (Petit-Breuilh, 2004).

1846-1848 Erupción efusiva del volcán Quizapu, desde noviembre de 1846 hasta 1848, con algunas manifestaciones menores posterior a la fecha (Fuenzalida, 1943; González-Ferrán, 1994). Durante este periodo, se formó un centro de emisión en el flanco norte del volcán Cerro Azul, en el sector denominado Portezuelo del Viento. A partir de este centro, se emitieron alrededor de 15 flujos de lava, estimándose un volumen total que alcanzó los 5 km^3 (Hildreth & Drake, 1992). Estas coladas de lava se extendieron hacia el este, alcanzaron al valle del río Barroso, y hacia el oeste, rellenaron la cabecera del valle del río Blanquillo. Además, cubrieron tierras ganaderas en el sector de las Vegas del Blanquillo. Se cree que esta erupción fue desencadenada por una inyección de magma andesítico en una cámara magmática dacítica, lo que provocó un recalentamiento del sistema y, como consecuencia la

disminución de la viscosidad y la liberación de volátiles del magma (Ruprecht & Bachmann, 2010).

1906-1907 Actividad explosiva del volcán Quizapu, con generación de columnas de vapor y cenizas sobre el centro de emisión de 1846-1848 (Fuenzalida, 1943; Brüggén, 1950; Casertano, 1963; González-Ferrán, 1994).

1914-1915 Erupción explosiva del volcán Quizapu, con generación de columna eruptiva de 6 a 7 km por sobre el nivel del cráter (Fuenzalida, 1943; Casertano, 1963; González-Ferrán, 1994)

1916-1932 Actividad explosiva intermitente del volcán Quizapu, caracterizada por la constante emisión de gases y eyección de tefra, cuya acumulación formó un cono de piroclastos (Fuenzalida, 1943). Durante este periodo se registraron columnas de hasta 4 km de altura (González-Ferrán, 1994), y columnas débiles con 1 a 2 km de altura que se mantuvieron de manera intermitente hasta 1932 (Casertano, 1963; González-Ferrán, 1994).

1932 La erupción explosiva más significativa del volcán Quizapu, ocurrida entre el 10 y 11 de abril, se caracterizó por su estilo pliniano y se cree fue responsable de la morfología actual del cráter. Durante este evento, una gran columna se elevó y habría alcanzado aproximadamente los 26 km de altura sobre el nivel del cráter, manteniéndose constante por al menos un día (Robillier, 1934; Hildreth & Drake, 1992). La dispersión de tefra se produjo principalmente hacia el este, aunque también se registraron caídas de ceniza en dirección al noroeste, afectando particularmente a las localidades de Quintero y Curicó. El impacto de esta erupción fue de carácter global, ya que sus cenizas viajaron por todo el hemisferio sur, alcanzando a países tan lejanos como Australia y Sudáfrica, además de afectar a ciudades sudamericanas como Buenos Aires y Río de Janeiro en Sudamérica (Fuenzalida, 1943).

Hacia el final de la fase pliniana, se produjeron colapsos parciales de la columna eruptiva, dando lugar a corrientes de densidad piroclástica que formaron depósitos ignimbríticos hacia el valle del río Barroso. También se observaron depósitos de

corrientes de densidad piroclásticas en el lado oeste del cráter, aunque en menor extensión y volumen. Se ha estimado que el volumen total productos expulsados durante esta erupción fue de aproximadamente 10 km³ (Hildreth & Drake, 1992).

En términos de condiciones preeruptivas, durante este episodio, la recarga de magma andesítico no habría alcanzado a calentar lo suficiente la cámara dacítica, a diferencia de lo que ocurrió en la erupción de 1846-1848. Esta falta de calentamiento no provocó una reducción en la viscosidad ni una pérdida de volátiles, lo que, en última instancia, desencadenó la erupción explosiva (Ruprecht & Bachmann, 2010).

1932-1935 La actividad explosiva del volcán Descabezado Grande, que resultó en la formación del cráter Respiradero, se registró aproximadamente 20 días después de la erupción pliniana del volcán Quizapu. Esta actividad se caracterizó por explosiones intermitentes que expulsaron material fragmentado, algunos de los cuales llegaron hasta la provincia de Catamarca, en Argentina. Vale destacar que no se observó la presencia de material juvenil durante estas explosiones (Robillier, 1934; Fuenzalida, 1942; Petit-Breuilh, 2004).

Los eventos eruptivos que tuvieron lugar entre 1932 y la década de 1960 carecen de una documentación detallada, pero se cree que se limitaron a actividad fumarólica en el volcán Descabezado Grande y a explosiones freáticas en el volcán Quizapu (González-Ferrán, 1994).

A pesar de que solo se han registrado erupciones recientes en tres de los centros eruptivos del Grupo Descabezados, el registro geológico indica que ha habido erupciones tanto explosivas como efusivas en los últimos 20.000 años. Estas erupciones han dado a lugar a diversos procesos, incluyendo caídas de piroclastos, corrientes de densidad piroclásticas, flujos de lava, lahares y piroclastos de eyección. Además, se han documentado una serie de eventos eruptivos atribuidos a los centros Mondaca, La Resolana y Los Hornitos, lo que subraya la relativa juventud de estos volcanes en la zona.

4 METODOLOGÍA

4.1 Recopilación de datos y bibliografía

Para el trabajo, se emplearon datos geoquímicos de elementos mayores, elementos traza y tierras raras en depósitos de tefra y lava pertenecientes al Grupo Descabezados (Anexo 1; Anexo 2). Estos datos fueron extraídos de Vera et al. (2022).

Los datos químicos de las muestras se analizaron en roca total en los laboratorio del SERNAGEOMIN, de la Universidad Estatal de Washington, Estados Unidos y del laboratorio ACME, Canadá, utilizando la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX) para determinar las concentraciones de óxidos mayores y elementos traza. Además, las concentraciones de tierras raras y elementos traza especiales se analizaron mediante la técnica de Espectrometría de Acoplamiento Inductivo con Detector Masa (ICP-MS).

Estas muestras se distribuyen en el área que abarca el Grupo Descabezados, y algunas de ellas están directamente relacionadas con centros eruptivos, mientras que otras tienen una procedencia desconocida (Figura 4.1).

Para complementar estos datos, se han agregado datos bibliográficos publicados por diferentes otros autores que han llevado a cabo investigaciones en centros eruptivos específicos pertenecientes al Grupo Descabezados. Estos centros incluyen el volcán Quizapu, Mondaca y la Caldera Calabozos. Los datos bibliográficos sobre el volcán Quizapu se obtuvieron a partir de estudios realizados por Hildreth & Drake (1992); Ruprecht et al. (2012) y Higgins et al. (2015). Estos datos abarcan concentraciones químicas sobre elementos mayores y trazas presentes en los depósitos de lava y tefra generados durante las erupciones de 1846-47 y 1932, y se analizaron utilizando la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Los datos obtenidos por otro autor de Mondaca provienen de un estudio llevado a cabo por Naranjo (2021), que se centra en los datos de elementos mayores que se obtuvieron en diversos flujos de lava y pómez asociados a este centro eruptivo. Para el análisis de datos, se empleó la técnica de Espectrometría de Absorción Atómica (AAS).

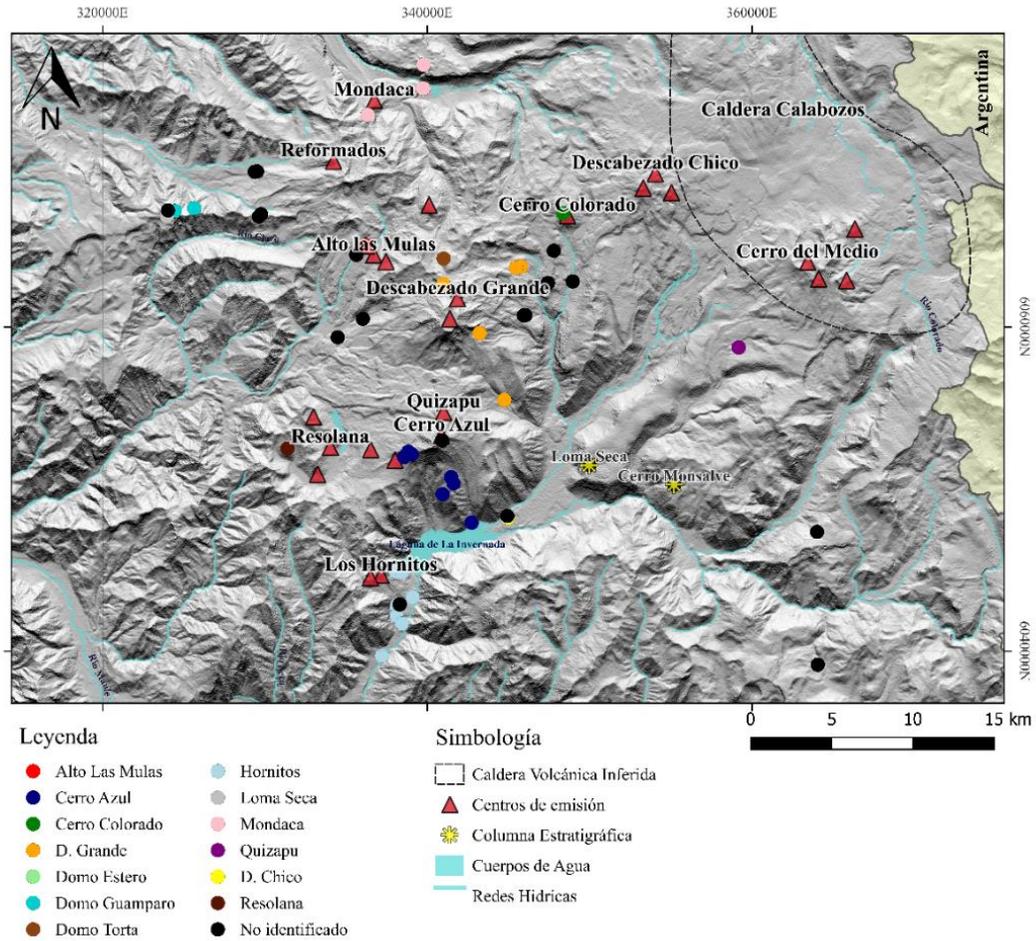


Figura 4.1. Mapa de ubicación de muestras recopiladas y columnas estratigráficas extraídas de Vera et al. (2022). Se marcan los centros eruptivos provenientes de estas muestras.

En cuanto a la Caldera Calabozos se recopilaron datos publicados en el estudio realizado por Grunder & Mahood (1988), que se enfocó en los elementos mayores de los depósitos de tefra provenientes de este centro eruptivo, y se analizaron utilizando la técnica de FRX.

Para la compilación de estos datos, se creó una base de datos en Microsoft Excel. Esta base de datos complementa los datos químicos con la descripción de los diferentes depósitos analizados y su proveniencia. Además, se distinguen aquellas muestras que carecen de un origen definido.

Con el propósito de analizar la relación temporal entre los depósitos de tefra, se utilizarán muestras de dos columnas estratigráficas obtenidas de Vera et al. (2022), donde no tienen una proveniencia conocida. Estas columnas estratigráficas se denominaron “Columna Cerro Monsalve” y “Columna Loma Seca” (Anexo 4; Anexo 5).

4.2 Preprocesamiento de la base de datos

Para el preprocesamiento de los datos recopilados en la base de datos, se utilizó la biblioteca *Geochem* en el lenguaje de programación *Python* (Anexo 6). Se aplicó la función *gc.preproc* a la base de datos para limpiar y preparar los datos. Esta función incluye la eliminación de espacios en blanco en los nombres de las columnas, la conversión de datos geoquímicos en valores numéricos. En los casos en los que los valores estaban representados como bajo el límite de detección, se reemplazaron por la mitad del valor numérico, eliminando el signo “<” cuando era aplicable. Además, se realizó el cálculo del contenido de óxido de hierro total (FeOT) en el caso de ser necesario con la siguiente fórmula:

$$\text{FeOT} = 0.8998 * \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$$

El valor del porcentaje del Fe_2O_3 se debe a que el hierro ferroso (FeO) y el hierro férrico (Fe_2O_3) se comportan como dos elementos diferentes, el Fe_2O_3 se encuentra en la titanomagnetita y el hierro ferroso en olivinos y piroxenos. Con el más mínimo grado de meteorización de estos minerales, su hierro se oxida hasta el estado de férrico.

Se debe tener en consideración que el cálculo de FeOT realizado por la función se basó en los datos proporcionados por Vera et al. (2022), mientras que los otros datos bibliográficos ya incluían este valor. Los cálculos de FeOT utilizados en los diferentes estudios varían significativamente. Por ejemplo, Hildreth & Drake (1992) hacen la suposición de que el 25% del hierro en el magma es férrico (Fe_2O_3). Higgins et al. (2015) calcula este valor asumiendo un único uso de hierro férrico. Grunder & Mahood (1988) asumen que 45% del hierro del magma es férrico en función de los radios de hierro representativos. En cambio, Naranjo (2021) y Ruprecht et al. (2012) no especifican el método utilizado para calcular el valor de FeOT. Estos cambios en el cálculo del FeOT se debe a la petrografía de las muestras que se analizaron, ya que cuando se asume un porcentaje alto de hierro férrico en el magma corresponden a rocas de composición ricas en hierro como andesitas basálticas o andesitas de bajo contenido de SiO_2 , como es el caso del 45%, a diferencia de rocas empobrecidas en hierro como una riolita donde se estima un porcentaje bajo de hierro férrico. Para el caso de este estudio la influencia de la variación en el cálculo del hierro no es una variable principal, por lo cual estas diferencias de FeOT no tiene un impacto significativo.

En el proceso de preprocesamiento de datos, se empleó otra función de la biblioteca *Geochem* conocida como *gc.closure*. Esta función se encarga de normalizar los datos, enfocándose en las columnas seleccionadas para la normalización dentro de la base de datos, en este caso las relacionadas con elementos mayores. Para la normalización de elementos mayores, se utilizó una constante de cierre igual a 100. Por otro lado, para la normalización de elementos traza y tierras raras, con el fin de que se encuentren en el espacio del *Simplex*, se propuso que la suma de estos debe ser igual a 0,1 wt% o 1000 ppm, siendo esta la constante de cierre.

Como parte del último paso en el preprocesamiento de la base de datos, se aplicó un método para la eliminación de valores faltantes, utilizando la función *'dropna'* de la biblioteca *pandas* en *Python*. Este método posibilita la eliminación de filas que contienen al menos un valor faltante en la base de datos, los cuales están representados con la sigla "NaN". La eliminación de datos faltantes se realiza porque para utilizar algunas funciones como la transformación log-cociente o los algoritmos de *decision tree* y *random forest* requieren un conjunto de datos completo para funcionar correctamente. La presencia de valores faltantes puede causar errores o un rendimiento deficiente (Anexo 3).

4.3 Caracterización Geoquímica

Para llevar a cabo la caracterización de los centros eruptivos del Grupo Descabezados en base a sus datos químicos, se emplearon diferentes tipos de diagramas de descripción geoquímica con el objetivo de obtener una comprensión integral de los centros eruptivos a estudiar (Anexo 7).

En primer lugar, para la confección de los diagramas de TAS (Total Alkali-Silica) se utilizó la función *gc.tas* de la biblioteca *Geochem* en *Python*. Esta función genera un diagrama TAS de Le Maitre et al. (1989) automáticamente, representando los valores de SiO₂ (sílice) y Na₂O + K₂O (álcalis). El diagrama que genera la función indica las separaciones litológicas y diferencia las series alcalinas y calcoalcalinas. El resultado final es la disposición de los centros eruptivos en un rango composicional litológico, con el fin de clasificar los depósitos de cada uno de estos.

Para los diagramas de Harker, se visualiza la relación entre el contenido de sílice y los óxidos de elementos mayores de cada centro eruptivo utilizando un gráfico de dispersión. Esto se realizó a través de la función *sns.scatterplot*, la cual forma parte de la biblioteca *seaborn*. Estos diagramas se realizaron con la finalidad de visualizar variaciones químicas en el Grupo Descabezados y sus

respectivos centro eruptivos a medida que el magma sufre una diferenciación en su proceso evolutivo.

Para la elaboración de los diagramas AFM (Alkali-Fe-Mg), se utilizó la función *gc.AFM* de la biblioteca *Geochem*. Esta función crea un diagrama AFM y traza los datos proporcionados en un dataframe de Pandas. En este diagrama se incluye la curva que separa las series calcoalcalinas de las toleíticas según los datos de Irvine & Baragar (1971). El objetivo de estos diagramas es distinguir la tendencia de los centros eruptivos del Grupo Descabezados.

Para la confección de los diagramas de Spider, se utilizó la función *gc.spider* de la biblioteca *Geochem*. Esta función permite generar diagramas de Spider a partir de las columnas de un dataframe de Pandas, para este estudio se utilizaron específicamente dos grupos, elementos traza y tierras raras. La función ofrece diferentes opciones de normalización basados en los datos publicados por Sun & McDonough (1989), incluyendo el condrito carbonáceo, el manto primitivo y el N-MORB. Para este caso, se seleccionó el manto primitivo para normalizar los elementos traza y el condrito carbonáceo para las tierras raras. El propósito de estos diagramas es facilitar la visualización de diferencias en la composición química de los elementos traza y tierras raras.

4.3.1 Centro y perturbación de datos geoquímicos.

Para calcular el centro de los datos composicionales se utilizó la función *coda.centrec* de la biblioteca *Geochem* en *Python*. Esta función recibe como entrada un *array* de *Numpy* que representa un conjunto de datos composicionales, donde cada fila es una muestra y cada columna corresponde a un componente de esa muestra. El resultado es una composición cuya suma total es igual a la de las muestras originales, asegurando que se mantiene la coherencia en el contexto de los datos composicionales. Tras determinar el centro composicional, se empleó la función *coda.pertur* de la misma biblioteca para realizar una perturbación positiva en las composiciones químicas. Esta función requiere dos argumentos: el *array* que representa el conjunto de datos composicionales y el inverso del centro previamente calculado. Adicionalmente, la función también acepta un argumento opcional 'k', que representa una constante de cierre. El resultado de esta operación son composiciones ajustadas mediante una perturbación positiva, seguidas de un reajuste para mantener la constante de cierre específica. Esto se utiliza con el fin de observar de mejor manera las variaciones en diagramas.

4.4 Estadística Multivariable

4.4.1 Transformación de datos

Para la estadística multivariable es necesario realizar una transformación de los datos para que sean más adecuados para el análisis estadístico. Esta transformación permite pasar de datos proporcionales en un espacio del *simplex* a un espacio de valores reales en el que las variables sean independientes entre sí.

Para este caso, se utilizó la transformación log-cociente centrada (clr) en lugar de otras transformaciones como la transformación log-cociente aditiva (alr) o la transformación log-cociente simétrica (ilr). La transformación clr es preferida debido a su simplicidad y su capacidad de preservar la información relativa entre las variables, lo que facilita la comparación proporcional entre ellas. Esta transformación ayuda a centrar los datos al eliminar los sesgos logarítmicos, lo que permite realizar comparaciones más significativas entre las partes de la composición.

Para realizar la transformación clr en *Python* (Anexo 6), se utilizó la función *coda.clr* de la biblioteca *Geochem*. Esta función acepta como entrada un *array* de *Numpy* que representa datos composicionales, en los cuales cada fila corresponde a una muestra y cada columna a un componente de dicha muestra. La función procesa estos datos y devuelve un *array* de *Numpy* con los datos ya transformados de forma automática .

4.4.2 Correlación lineal

Para la correlación lineal es necesario realizar los diagramas de *pairplot*, para este se utilizó la función *sns.pairplot* de la biblioteca *Seaborn* en *Python*. Esta función crea una matriz de gráficos de dispersión que muestran las relaciones entre las variables en un conjunto de datos. Adicionalmente para la matriz de correlación de Pearson se utilizó la función *.corr()* de la biblioteca *Pandas* el cual calcula el valor del coeficiente de correlación de Pearson entre variables. Para mejorar la visualización de la matriz se utiliza la función *sns.heatmap* de la biblioteca *Seaborn* (Anexo 8).

4.4.3 Análisis de componentes principales (PCA)

Para realizar un análisis de componentes principales (PCA) en *Python*, se utilizó la biblioteca *scikit-learn* (Anexo 8). Al emplear la función *pca.fit_transform*, se aplican dos pasos fundamentales a la base de datos:

1. **Ajustar el modelo PCA a los datos entregados:** En esta etapa, el modelo PCA calcula las direcciones principales en las que la información en los datos varía de manera más significativa. Estas direcciones principales son las componentes principales que explican la mayor parte de la variabilidad de los datos.
2. **Transformar los datos en un nuevo conjunto de datos:** En este paso, las columnas de la base de datos originales, que representan elementos químicos, se reemplazan por las nuevas columnas que representan las componentes principales. Este nuevo conjunto de datos se deriva de las componentes principales encontradas en el paso anterior.

Para complementar el análisis de componentes principales (PCA), que se ha realizado de manera automática, se utilizó la función *explained_variance_ratio_*, la cual calcula la proporción de la varianza explicada por cada componente principal. Esta función indica cuánta varianza en los datos originales es explicada por la componente principal correspondiente. La primera componente principal tiene el valor más alto, y este valor va disminuyendo a medida que aumenta el número de la componente principal.

Otra función útil es la función *.cumsum* de la biblioteca *Numpy*, que permite calcular la suma acumulativa de las proporciones de la varianza explicada por las componentes principales. Esta es una herramienta útil para determinar cuántas componentes principales seleccionar con el fin de mantener la cantidad deseada de varianza explicada en el conjunto de datos.

Finalmente, otra biblioteca que complementa el cálculo del PCA es *Matplotlib*. Esta biblioteca mediante la función *plt.scatter* permite crear un gráfico de dispersión (*scatter plot*) utilizando las dos primeras componentes principales obtenidos en el PCA como ejes del gráfico y ploteando cada muestra en su ubicación espacial dentro de estos ejes, distinguiéndose en función del centro eruptivo de donde proviene la muestra analizada. Además, este gráfico se acompaña con flechas que representan la contribución de cada elemento químico a las dos primeras componentes a través

de la función *plt.arrow*. Las dimensiones y orientación de estos vectores son aproximadamente proporcional a la varianza de ese componente transformado *clr*.

El análisis estadístico se debe llevar a cabo a los grupos de elementos mayores y el de elementos traza y tierras raras por separado, debido a que su proceso de normalización es diferente.

4.4.4 Análisis de clúster jerárquico

Para realizar un clustering jerárquico se utilizó la función *linkage* de la biblioteca *SciPy* (Anexo 8). Esta función acepta un conjunto de datos o una matriz de distancias que contienen las observaciones a agrupar. El resultado es una matriz de enlace, 'Z', la cual detalla la secuencia de fusiones en el proceso de clustering jerárquico. La función admite diversos métodos de enlace, donde se utilizó el método completo (completo) ya que este permite un grupo de muestras desbalanceados, donde hay un número de muestras considerablemente diferente para cada centro eruptivo. Estos métodos determinan cómo se calcula la distancia entre los conjuntos de observaciones durante la construcción del árbol de clustering. La matriz 'Z' proporciona la información jerárquica necesaria para posteriormente visualizar los clústeres mediante un dendrograma.

Para facilitar los cálculos que se obtuvieron del clustering jerárquico y observarlos de manera gráfica, se realizó un dendrograma. Para esto se utilizó función *dendrogram* de *SciPy*. Esta función utiliza una matriz de enlace como entrada, la cual contiene información sobre el clustering jerárquico. Además, esta función ofrece opciones de personalización para el dendrograma, incluyendo la adición de etiquetas y la modificación de su orientación, entre otras características. Esto se utiliza para ver de manera visual las similitudes entre los datos.

4.4.5 Análisis Discriminante Lineal (LDA)

Para llevar a cabo un LDA (Anexo 8), se sigue varios pasos esenciales. Inicialmente, se seleccionaron las clases o categorías de interés para el estudio. Este proceso implica filtrar un dataframe que contiene todos los datos, seleccionando específicamente las filas que corresponden a la categoría deseada, en este caso, la proveniencia de las muestras. Estos datos filtrados son almacenados en un nuevo dataframe. Con este dataframe ya establecido, se procede a seleccionar un conjunto de columnas, las cuales se asignan a una variable denominada '*features*'. Estas columnas representan las variables de entrada y son cruciales para la discriminación entre las clases

seleccionadas, basándose en técnicas previamente utilizadas. Asimismo, se define una variable 'y' que contiene las etiquetas correspondientes a cada muestra.

El siguiente paso implica la creación de una instancia de *LinearDiscriminantAnalysis* de la biblioteca *scikit-learn*, el cual es un método que busca encontrar una combinación lineal de características que mejor difiere dos o más clases de categorías. En esta instancia, se especifica el número de componentes con el objetivo de reducir las dimensiones. Esto facilita la visualización de los datos y disminuye la complejidad del modelo. Posteriormente, se aplica el método LDA a las variables previamente definidas, transformando las características originales en un nuevo espacio que maximiza la separación entre las diferentes categorías.

Para la visualización de los datos transformados mediante LDA, es necesario codificar las variables categóricas, en este caso, las etiquetas de la variable 'y'. Esto se logra mediante *LabelEncoder* de *scikit-learn*, que convierte las etiquetas en valores numéricos. Finalmente, utilizando la biblioteca *Matplotlib* se crea un gráfico de dispersión, utilizando las componentes del LDA como ejes y las etiquetas codificadas para determinar el color de los puntos en el gráfico.

4.5 Aprendizaje automático supervisado

Para crear los modelos de aprendizaje automático supervisado es necesario realizar los siguientes pasos (Anexo 9):

- **Generación de nuevos datos**

En el aprendizaje automático supervisado, es crucial equilibrar las clases, especialmente cuando algunas de ellas presentan muy pocas muestras. Una clase con un única muestra puede llevar a un sobreajuste durante el entrenamiento, provocando que el modelo favorezca las clases con un mayor tamaño de muestras. Para contrarrestar esto y mejorar la robustez del modelo, se aconseja incrementar la cantidad de muestras en las clases minoritarias. Una técnica para lograr esto es la creación. Este método enriquece la diversidad de datos en las clases menos representadas, generando nuevas filas de datos mediante la adición de pequeñas variaciones aleatorias a las características numéricas de los datos existentes.

El proceso comienza almacenando en un dataframe aquellas clases que requieren un aumento de muestras, siguiendo un procedimiento similar al utilizado en el LDA. Posteriormente, se establece una magnitud de perturbación el cual controlará el grado de alteración aleatoria aplicada a los datos.

Para el proceso de perturbación, se ejecuta un bucle que recorre cada grupo de datos del nuevo dataframe. Dentro de este bucle, se itera la cantidad de muestras que se requiera pedir para cada grupo. En cada iteración, se seleccionan las columnas numéricas, excluyendo las categóricas. A estas columnas numéricas, se les aplica una perturbación aleatoria, sumando un valor generado a partir de una distribución normal con media cero y desviación estándar definida por la magnitud de perturbación establecida.

Estos datos perturbados, mantienen la estructura y proveniencia del dato original. Finalmente, se incorporan al dataframe que contiene todos los datos, contribuyendo así a un mejor balance entre clases y potenciando la eficacia del modelo de aprendizaje automático.

- **División de conjuntos de entrenamiento y prueba**

Para dividir los conjuntos de datos en entrenamiento y prueba, primero se separan las variables en dos tipos: las de entrada y las de destino, al igual manera a como se procede en un LDA. Posteriormente, se utiliza la función *train_test_split* de la librería *scikit-learn* para dividir los datos. Se definió para esta división un 70% de los datos al conjunto de entrenamiento, que se encarga de general el modelo, y un 30% al conjunto de prueba, que se encarga de evaluar el rendimiento del modelo desarrollado. Para este caso se definió que para cada ejecución se realicen divisiones diferentes de los datos para promover la variabilidad en modelo y evitar sesgos en el aprendizaje.

4.5.1 Decision tree y random forest

Para los generar los modelos de *decision tree* y *random forest* se utiliza la librería *scikit-learn*. Se inicia creando instancias para cada algoritmo: *DecisionTreeClassifier* para los *decision tree* y *RandomForestClassifier* para *random forest*. Ambos se configuran para ejecutarse de manera diferente cada vez que se ejecute, con el objetivo de incrementar la variabilidad de los resultados. Adicionalmente, se establece un balance de pesos para las clases, asignando un mayor peso a aquellas con menos muestras para contrarrestar el desequilibrio en el modelo. En el caso de los *random forest*, se especifica también el número de *decision tree* a generar.

Los modelos se entrenan con conjuntos de datos etiquetados utilizando la función *fit* de *scikit-learn*, permitiendo que el modelo ajuste sus parámetros y aprenda a clasificar nuevas instancias con precisión.

Posteriormente, se realiza una iteración sobre estos modelos para evaluar la variabilidad en su precisión. Los modelos obtenidos se almacenan, facilitando la selección del más preciso para cada caso. Esta fase incluye la determinación de la matriz de confusión y la evaluación de la importancia de cada característica en la construcción del modelo.

Dado que el *random forest* es un modelo más robusto en comparación con el *decision tree*, se utiliza para la predicción de muestras cuya proveniencia es desconocida de las cuales algunas corresponden a las columnas estudiadas.

Para procesar las muestras sin proveniencia conocida, se aplica el mismo preprocesamiento de datos empleado en el modelo. Luego mediante la función *predict* de *scikit-learn* el modelo asigna automáticamente la proveniencia a las muestras. Los resultados se almacenan en un dataframe, permitiendo comparar las predicciones del modelo con las que definiciones proporcionadas por Vera et al. (2022) en las columnas estratigráficas.

5 RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los procesos de caracterización geoquímica, estadística multivariable y aprendizaje automático supervisado para las muestras provenientes del área que abarca el Grupo Descabezados, a partir de la base de datos de datos geoquímicos de los depósitos de tefra y lava (Anexo 1).

5.1 Caracterización geoquímica

Para la caracterización geoquímica del Grupo Descabezados, se elaboraron diagramas de descripción geoquímica que abarcan todos los centros eruptivos de actividad reciente en la zona de estudio.

En cuanto al diagrama de TAS (Total Alkali-Silica), se observa una amplia variedad composicional en el Grupo Descabezados, abarcando composiciones basálticas, basálticas-andesíticas, andesíticas, traquiandesíticas, traquidacíticas-traquíticas (dependiendo del contenido de cuarzo) a riolíticas. La mayoría de las muestras forman parte de la serie subalcalina, con la excepción de algunas muestras más ácidas que se incluyen en la serie alcalina (Figura 5.1).

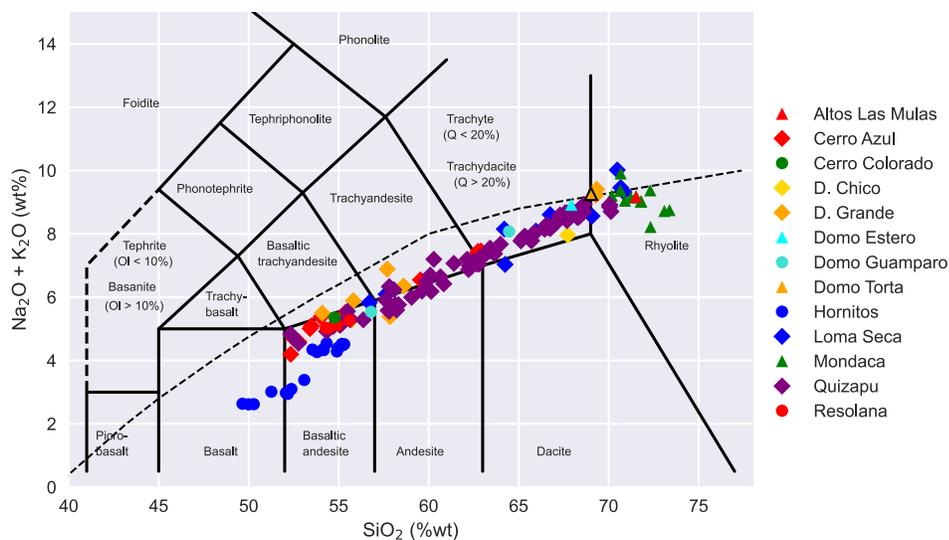


Figura 5.1. Diagrama de TAS para el Grupo Descabezados. Las muestras se encuentran rotuladas en base a su proveniencia.

Algunos centros eruptivos presentan una composición bastante homogénea, como es el caso de Hornitos y Resolana, que se caracterizan por composiciones básicas. En contraste, otros centros eruptivos, como Mondaca, Descabezado Chico, Domo Estero, Domo Torta y Alto las Mulas

muestran composiciones más ácidas. Además, algunos centros eruptivos como Quizapu, Cerro Azul, Loma Seca, Domo Guamparo y Descabezado Grande muestran una gran variabilidad en su evolución composicional en los depósitos que han generado (Figura 5.1).

El diagrama AFM indica que los centros eruptivos del Grupo Descabezados pertenecen a la serie calco-alcalina. Entre ellos, se observa que parte de las muestras provenientes al centro eruptivo Hornitos tienen una composición con alto contenido magnesio y bajo contenido de álcalis comparado con los otros centros eruptivos. Esto sugiere que Hornitos representa al centro menos diferenciado del Grupo Descabezados. A diferencia de los centros eruptivos Mondaca, Alto Las Mulas y Domo Torta, que se caracterizan por tener un bajo contenido de hierro y magnesio y un alto contenido de álcalis, estos corresponden a los centros eruptivos más diferenciados (Figura 5.2).

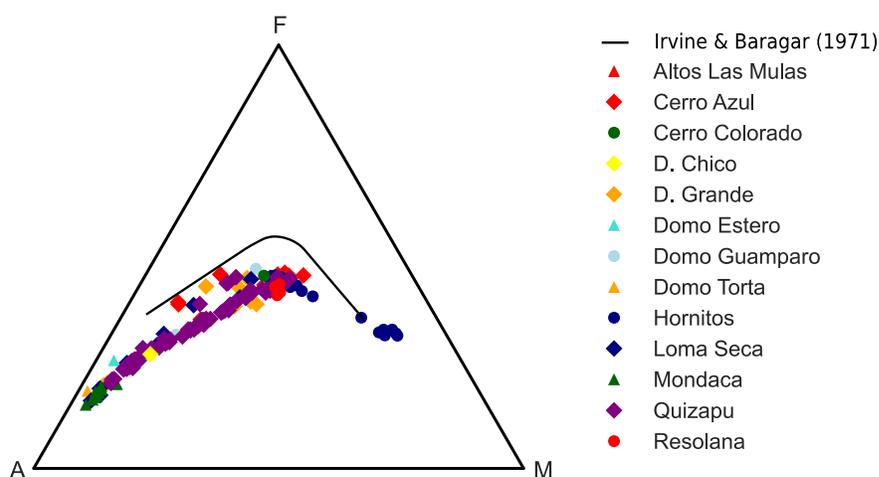


Figura 5.2. Diagrama AFM para el Grupo Descabezados. Las muestras se encuentran rotuladas en base a su proveniencia.

Los diagramas de Harker proporcionan información sobre el comportamiento de los elementos a medida que el magma evoluciona. Elementos como el Na_2O y el K_2O aumentan su contenido a medida que aumentan las concentraciones de SiO_2 , eso quiere decir que a medida que sus concentraciones aumentan a medida que el magma se va diferenciando. Mientras que elementos como el CaO , FeO , MgO , Al_2O_3 y TiO_2 disminuyen su contenido a medida que la concentración de sílice aumenta, eso quiere decir que sus concentraciones disminuyen a medida que el magma se diferencia. Sin embargo, elementos como el MnO y el P_2O_5 no muestran un comportamiento claro a medida que el magma se diferencia (Figura 5.3). No se puede determinar si estos elementos

presentan alguna correlación debido a que se está analizando datos composicionales, los cuales se encuentran en un espacio muestral del Simplex, lo que podría indicar correlaciones espurias.

El comportamiento observado en los elementos de FeO, TiO₂ y MgO indican la cristalización de minerales máficos, como el olivino, en composiciones menos diferenciadas. Por otro lado, del Al₂O₃ muestra una tendencia diferente: inicialmente aumenta y luego disminuye. Este patrón es diferente al del CaO que muestra una disminución constante. Esto se explica por una cristalización temprana de piroxenos, evidenciadas por la disminución del CaO, seguida de una cristalización más tardía de plagioclasas, la provoca la disminución observada en el Al₂O₃ (Figura 5.3).

La tendencia ascendente en los elementos Na₂O y el K₂O sugiere que el contenido de albita en las plagioclasas era bajo. Además, indica que el feldespato potásico no se formó o su formación fue poco significativa. Aunque la tendencia general indica un aumento progresivo de álcalis, esto no se debe necesariamente a una diferenciación del magma. Otros procesos, como la asimilación o la mezcla de magmas, también pueden influir en este aumento (Winter, 2010).

Para el caso de Los Hornitos, este centro eruptivo presenta un conjunto de muestras que se desvían de la tendencia general en las composiciones más básicas. Este grupo se caracteriza por ser depósitos de tefra de este centro eruptivo, el cual muestran comportamientos que indican características de ser un magma primitivo, como lo indica Salas et al, (2017).

Para el caso del Descabezado Grande, se observa que un conjunto de muestras se desvía de la tendencia general del Grupo Descabezados en cuanto a elementos como el Na₂O y el K₂O. Esto podría indicar una característica distintiva que sugiere un proceso diferente, ya sea en la evolución de su formación o en algún tipo de alteración en la roca.

El centro eruptivo Quizapu presenta características notables en el diagrama de Harker. La mayoría de los elementos muestran una diferenciación que se representa mediante una línea recta, en lugar de líneas suavizadas que representan una variación gradual en las concentraciones a medida que el magma se diferencia. Este patrón sugiere un proceso de mezcla de magmas (Ruprecht et al., 2012; Higgins et al., 2015). Cabe destacar que, aunque algunos experimentos sugieren que este proceso no necesariamente produce tales variaciones simples (Perugini et al., 2012). Además, es importante mencionar que en el Quizapu no solo ocurre procesos de mezcla de magmas, sino que también se da una combinación con procesos de cristalización fraccionada.

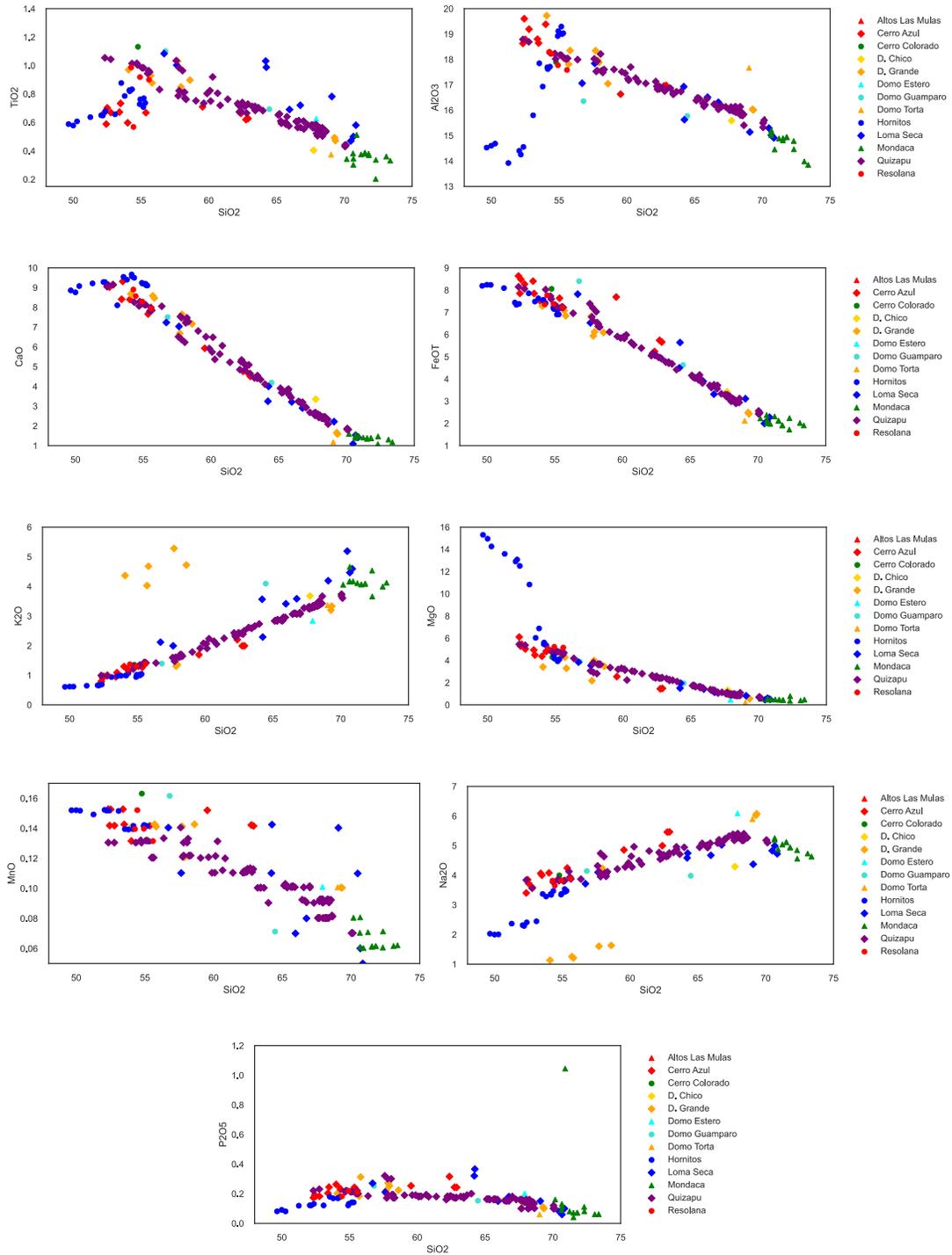


Figura 5.3. Diagramas de Harker de elementos mayores para el Grupo Descabezados. Las muestras se encuentran rotuladas en base a su proveniencia.

Los centros eruptivos generalmente siguen una tendencia principal. Sin embargo, existen excepciones como la Caldera Calabozo, donde las muestras de Loma Seca muestran desviaciones

significativas de esta tendencia principal. Específicamente, se observan valores más elevados en elementos como TiO_2 , MnO , K_2O , P_2O_5 y FeOT . Estas desviaciones pueden estar relacionadas a procesos de asimilación que ha experimentado este centro eruptivo (Grunder & Mahood, 1988)

La caracterización geoquímica del Grupo Descabezados muestra una notable diversidad composicional en los centros eruptivos. Esta diversidad se debe a diferencias en la evolución y en la cristalización de minerales a lo largo de la diferenciación del magma. Aunque el proceso principal es la cristalización fraccionada, también se observan otros procesos significativos, como la mezcla de magmas en el caso del Quizapu y la asimilación en el caso de la Caldera Calabozos.

En el diagrama de Spider para elementos traza, se observa una tendencia similar en los patrones de centros eruptivos como Cerro Azul, Quizapu y Loma Seca. Sin embargo, los demás no presentan esta similitud. Es importante destacar que, a medida que el magma se diferencia, se observa un aumento en los valores de la mayoría de sus elementos. Esto sugiere que el magma se enriquece en elementos incompatibles a medida que se diferencia (Figura 5.4).

La anomalía observada en el Sr, que muestra una disminución de su valor a medida que el magma se diferencia, es particularmente evidente en los centros eruptivos de Quizapu, Loma Seca y Descabezado. Esto indica un comportamiento compatible de este elemento, el cual se debe a la cristalización de las plagioclasas (Figura 5.4).

Los bajos valores de Nb y Hf sugieren una posible cristalización de rutilo y anfíboles, mientras que los valores bajos de Y indicarían la cristalización de granates (Zhou et al., 2006). En el caso de Descabezado Grande, se observa una anomalía negativa de Zr, la cual podría estar asociada con la mineralización de circón (Figura 5.4).

Los altos valores de los elementos incompatible Zr, Ba y Rb son indicativos de asimilación en el caso de Caldera Calabozos. Sin embargo, dado que las rocas encajantes son predominantemente andesitas basálticas a andesitas, la asimilación de elementos incompatibles es mínima (Grunder & Mahood, 1988).

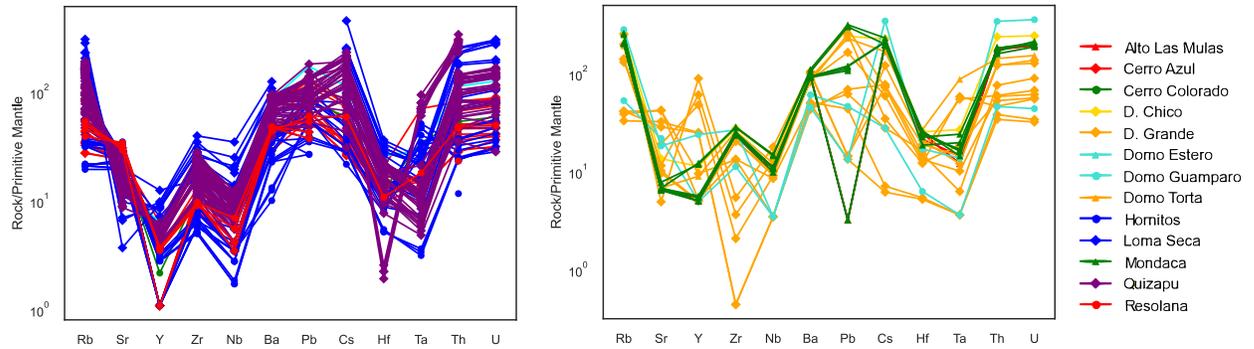


Figura 5.4. Diagrama de Spider para elementos traza para Grupo Descabezados. Las muestras se normalizaron al manto primitivo y encuentran rotuladas en base a su proveniencia.

El diagrama de Spider para tierras raras revela que los centros eruptivos presentan un patrón similar entre estos. Además, se observa que a medida que la composición de los centros eruptivos es más diferenciada, hay un enriquecimiento progresivo en elementos incompatibles. Esto contrasta con aquellos centros eruptivos de composición menos diferenciada o básica, que tienden a tener menores concentraciones de estos elementos (Figura 5.5).

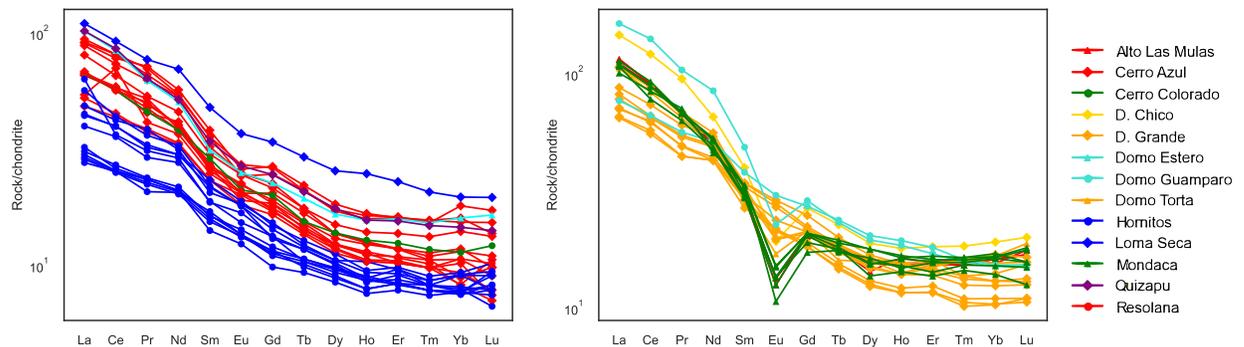


Figura 5.5. Diagrama de Spider para tierras raras para Grupo Descabezados. Las muestras se normalizaron al condrito carbonáceo y encuentran rotuladas en base a su proveniencia.

La anomalía negativa del europio observada en centros eruptivos como Cerro Colorado, Domo Guamparo, Descabezado Chico y Descabezado Grande es principalmente indicativa de cristalización de plagioclasas (Figura 5.5). Sin embargo, el hecho de que en diagramas previos se asocie la cristalización de plagioclasas a otros centros eruptivos y no presenten esta anomalía, puede ser indicativo de que podría estar ocurriendo otro proceso además de la cristalización fraccionada, como lo puede ser la mezcla de magmas o la asimilación.

5.2 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico, los datos fueron transformados mediante la transformación clr para evitar la dependencia entre las variables. En este caso, para llevar a cabo las transformaciones y los análisis correspondientes, se divide la base de datos en dos grupos principales: elementos mayores y elementos traza junto a tierras raras. La normalización toma un rol importante ya que al pertenecer a diferentes fuentes, trabajando los datos de manera directa las proporciones son diferentes en base a la cantidad de variables que se analizaron, por lo cual se busca una distribución homogénea para todas las muestras.

5.2.1 Correlación Lineal



Figura 5.6. Diagrama de Pairplot para el Grupo Descabezados. Enfocado en el grupo de elementos mayores. Las muestras se encuentran rotuladas en base a su proveniencia.

A través del diagrama de *pairplot* (Figura 5.6), apoyado de la matriz de correlación de Pearson (Anexo), se pueden identificar las correlaciones más notables entre el sílice y los diferentes óxidos. En particular, se observan correlaciones positivas entre el SiO_2 y el Na_2O , Al_2O_5 y K_2O , mientras que existe una correlaciones negativas notables con el FeOT , CaO y el MgO . Además, al analizar las relaciones entre estos óxidos, se perciben correlaciones positivas claras entre MgO , CaO y FeOT . Estos valores coinciden con lo observado en los diagramas de Harker, a diferencia de que se puede hacer una diferenciación entre variables que tienen mayor influencia en la diferenciación magmática. Este tipo de relación entre el sílice y los óxidos podría indicar la cristalización de fases minerales a medida que el magma se va diferenciando.

Elementos como el P_2O_5 , TiO_2 y MnO no se observa una correlación clara con otros elementos. Por otro lado, el Al_2O_3 , que mostraba una variación en su tendencia de concentración en el diagrama de Harker (inicialmente aumentando y luego disminuyendo), presenta en el *pairplot* una correlación positiva con el SiO_2 pero de menor valor en comparación con elementos como el Na_2O y el K_2O_5 (Figura 5.6).

Es importante destacar que existen desviaciones significativas entre los distintos centros eruptivos en cuanto a la concentración de ciertos elementos. Por ejemplo, en el Descabezado Grande se observan variaciones notables de Na_2O y K_2O , mientras que en Hornitos estas desviaciones son evidentes en TiO_2 , MgO y Al_2O_3 . Estas desviaciones dificultan el establecimiento de una correlación clara entre los elementos.

5.2.2 Análisis de componentes principales

5.2.2.1 Elementos mayores

Las dos primeras componentes principales explican una variabilidad acumulativa cerca del 90% de los datos (Figura 5.7A). La distribución de los elementos en el espacio definido por estas dos componentes principales indica qué elementos tienen una mayor influencia en cada componente. Por ejemplo, en el primer componente, se observa una mayor influencia de K_2O , Na_2O y SiO_2 , mientras que en el segundo componente, el P tiene una influencia significativa. Además, el Mg, FeOT , TiO_2 , MnO y CaO muestran una variabilidad negativa en la primera componente en comparación con los otros elementos, lo que indica un comportamiento diferente (Figura 5.7B; Anexo 10). Las diferencias en la dirección de los vectores de las variables indican la correlación

que tienen entre estos, por ejemplo, para el caso del MgO y el Al₂O₃ estos tienen una dirección opuesta, por lo cual su correlación es negativa, lo cual se respalda con lo que se ha observado en los diagramas de Harker y el diagrama pairplot.

Al calcular la distancia euclidiana en el espacio entre los elementos, se observa que K₂O, P₂O₅ y MgO presentan mayores diferencias y variabilidades. Al plotear las muestras de los centros eruptivos junto con los depósitos que no tienen una procedencia definida en el espacio definido por las dos primeras componentes principales, se observa una posible diferenciación espacial entre los centros eruptivos. Las muestras sin origen definido se distribuyen en todo el espacio y no se agrupan específicamente alrededor de un centro eruptivo en particular (Figura 5.8).

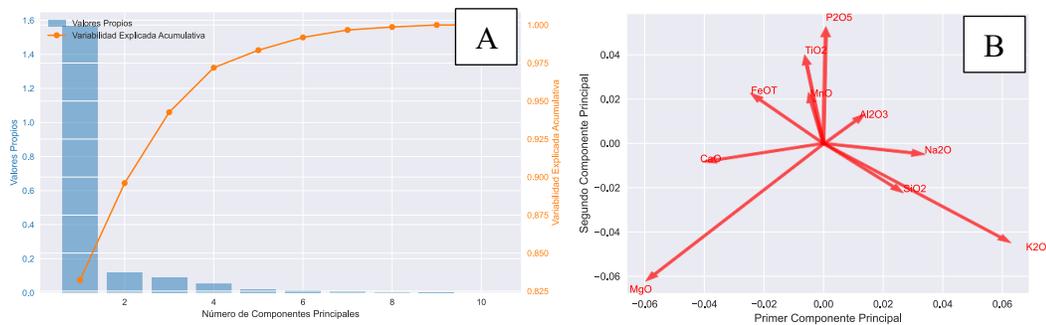


Figura 5.7. Análisis de componentes principales para elementos mayores del Grupo Descabezados. (A) gráficos de valores propios y variabilidad acumulada (B) Biplot en el espacio transformado clr con elementos como vectores.

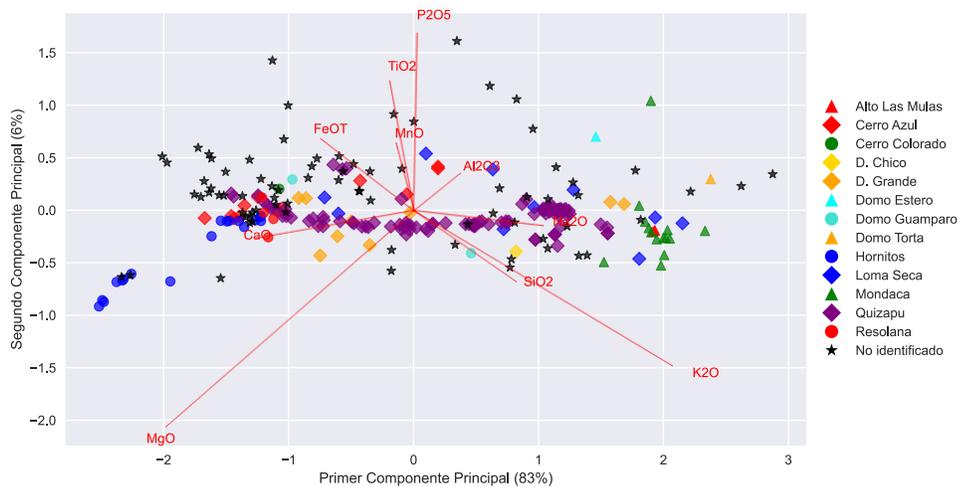


Figura 5.8. Biplot para elementos mayores del Grupo Descabezados. Espacio transformado clr con muestras rotuladas en base a la procedencia.

En el caso de las muestras obtenidas en las columnas estratigráficas, cuando se representan en el espacio de los componentes principales, el PCA proporciona en algunos casos información valiosa. Esta información puede ser crucial para identificar a qué centro eruptivo podrían pertenecer dichas muestras. Sin embargo, la claridad de esta asociación varía según los casos. En la mayoría de las muestras, las características sugieren que podrían estar relacionadas con más de un centro eruptivo, añadiendo complejidad a la interpretación de estos datos (Figura 5.9).

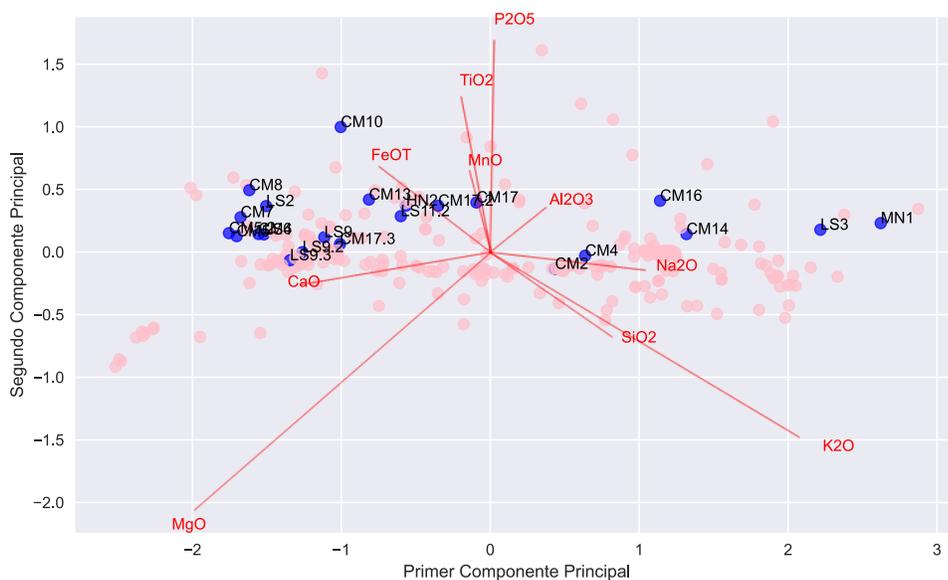


Figura 5.9. Biplot elementos mayores de muestras desconocidas. Espacio transformado clr con muestras rotuladas en base a la su extracción de las columnas estratigráficas.

5.2.2.2 Elementos traza y tierras raras

Las dos primeras componentes principales explican una variabilidad acumulativa del 70% de los datos (Figura 5.10A). La distribución de los elementos en el espacio definido por estas dos componentes principales indica qué elementos tienen una mayor influencia en cada componente. Por ejemplo, en el primer componente, se observa una mayor influencia del Zr, Nb, Ba, La, Rb y Th, mientras que en el segundo componente el Zn, Y, Ni y V tienen una influencia significativa. Además, el grupo que está conformado por el Ni, Cu, V, Se y Sr muestran una variabilidad negativa en comparación con los de Rb y Th, lo que indica un comportamiento diferente (Figura 5.10B; Anexo 11). En este caso los elementos trazas indican una mayor variabilidad en las muestras en comparación a las tierras raras.

Al calcular la distancia euclidiana en el espacio entre los elementos, se observa que Ni, Rb y V presentan mayores diferencias y variabilidades. Al plotear las muestras de los centros eruptivos junto con los depósitos que no tienen una procedencia definida en el espacio definido por las dos primeras componentes principales, se observa una posible diferenciación espacial entre los centros eruptivos diferente al caso de los elementos mayores (figura 5.11). En este caso centros eruptivos como Mondaca y Cerro Azul están aislados espacialmente de los otros centros eruptivos, caso que no ocurría en el caso de los elementos mayores. Las muestras sin origen definido se distribuyen en todo el espacio y no se agrupan específicamente alrededor de un centro eruptivo en particular (Figura 5.11).

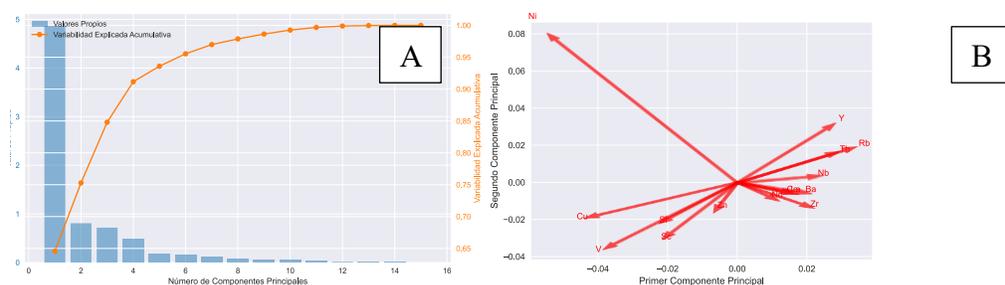


Figura 5.10. Análisis de componentes principales para elementos traza y tierras raras del Grupo Descabezados. (A) gráficos de valores propios y variabilidad acumulada (B) Biplot en el espacio transformado clr con elementos como vectores.

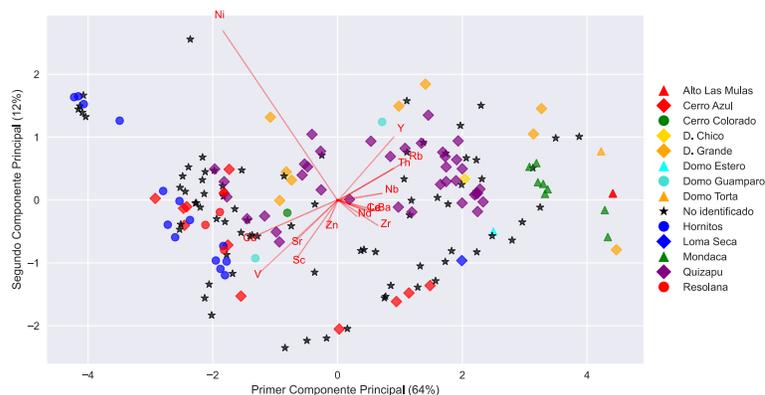


Figura 5.11. Biplot para elementos traza y tierras raras del Grupo Descabezados. Espacio transformado clr con muestras rotuladas en base a la proveniencia.

Este diagrama, a diferencia del realizado para elementos mayores, proporciona información valiosa para identificar a qué centro eruptivo pueden pertenecer algunas muestras. Estas muestras, en el diagrama de elementos mayores, se ubicaban en áreas correspondientes a más de un centro eruptivo. Sin embargo, la asociación puede ser más clara en algunos casos que en otros. Un ejemplo

iteración para identificar el mejor modelo. Las precisiones en los distintos modelos siguieron una distribución log-normal (Figura 5.13). La precisión más baja registrada fue del 0,75, la más alta alcanzó un valor perfecto de 1 (prediciendo con éxito todos los centros eruptivos), y el valor promedio fue de 0,92, siendo además el más frecuente. Esto indica que, a pesar de la variabilidad observada, el modelo muestra en general una alta precisión, la cual depende significativamente de cómo se seleccionaron los datos en cada modelo.

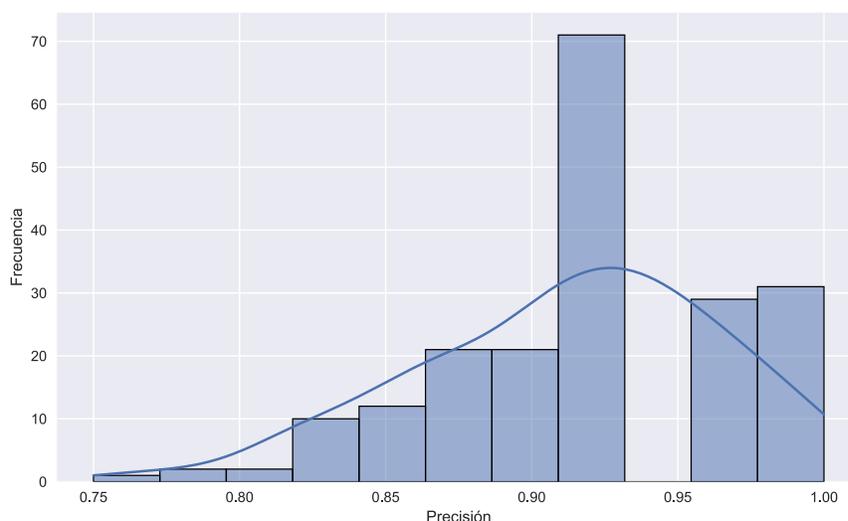


Figura 5.13. Histograma de precisión de los modelos de random forest.

Las diferencias de los valores de precisión en la elección de datos pueden deberse a aquellas muestras que comparte características similares a otro centro eruptivo. Si estos datos son incluidos en el conjunto de prueba, existe la posibilidad de que el modelo los confunda, asignándoles erróneamente la proveniencia de otro centro eruptivo.

El modelo de mayor precisión, el cual fue el seleccionado para ser la herramienta discriminante de las muestras sin proveniencia arroja una precisión de 100% para cada clase. Esto significa que, en cada caso en que el modelo identificó una muestra como perteneciente a una determinada clase, esta clasificación fue correcta. La cantidad de muestras reales de cada clase se especifica en la sección *Support* (Tabla 5.1).

En cuanto a su sensibilidad (*Recall*), el hecho de ser también del 100% para cada clase implica que el modelo identificó correctamente todas las instancias reales pertenecientes a dichas clases. Por

su parte el *F1-score*, que se define como el promedio de la precisión y la sensibilidad, también alcanza el 100%, reflejando una perfecta precisión y sensibilidad (Tabla 5.1).

La precisión total (*Accuracy*) del modelo es del 100%, lo que indica que fue capaz de predecir correctamente la clase de muestra en el conjunto de prueba en base a las características de los valores geoquímicos de los centros eruptivos (Tabla 5.1). Sin embargo, en la práctica es muy raro encontrar un modelo con un rendimiento perfecto en datos no vistos previamente. Esto podría sugerir un posible sobreajuste del modelo, especialmente si el conjunto de datos de prueba es pequeño o no representativa adecuadamente el problema real.

Tabla 5.1. Métricas de rendimiento por clase. En base al mejor modelo de random forest.

| | Precision | Recall | F1-score | Support |
|----------------|-----------|--------|----------|---------|
| Cerro Azul | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 5 |
| Cerro Colorado | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1 |
| D. Chico | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1 |
| D. Grande | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 10 |
| Domo Estero | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2 |
| Hornitos | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 3 |
| Loma Seca | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1 |
| Mondaca | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2 |
| Quizapu | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 16 |
| Resolana | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 3 |
| Accuracy | | | 1.00 | 44 |

La influencia de las variables en la formación del modelo no presenta diferencias significativas, lo cual implica que esta puede variar al ejecutar nuevamente otro modelo. Es importante destacar que el grupo de variables con mayor influencia en el modelo son aquellas que mostraron una mayor variabilidad en el análisis de componentes principales (Tabla 5.2). El modelo fue capaz de predecir automáticamente su origen para aquellas muestras distribuidas en la zona de estudio que no tenían un origen conocido, además de las muestras perteneciente a las columnas “Cerro Monsalve” y “Loma Seca”. De manera general su resultados no difieren mucho en cuanto a su ubicación espacial y la del centro eruptivo que se asignó (Tabla 5.3).

Tabla 5.2. Influencias de cada variable. En base al mejor modelo de random forest.

| Elemento | Influencia | Elemento | Influencia | Elemento | Influencia |
|--------------------------------|------------|----------|------------|-------------------|------------|
| Zn | 0.075865 | Sc | 0.043374 | Ba | 0.033571 |
| Al ₂ O ₃ | 0.063578 | Nb | 0.042506 | CaO | 0.032986 |
| TiO ₂ | 0.059956 | V | 0.041041 | Zr | 0.032901 |
| P ₂ O ₅ | 0.059091 | FeOT | 0.038882 | Th | 0.032694 |
| Cu | 0.053217 | MgO | 0.038832 | Nd | 0.028212 |
| K ₂ O | 0.047611 | Rb | 0.038071 | La | 0.026718 |
| MnO | 0.047484 | Ce | 0.036138 | Na ₂ O | 0.02513 |
| SiO ₂ | 0.045957 | Sr | 0.035605 | Ni | 0.020581 |

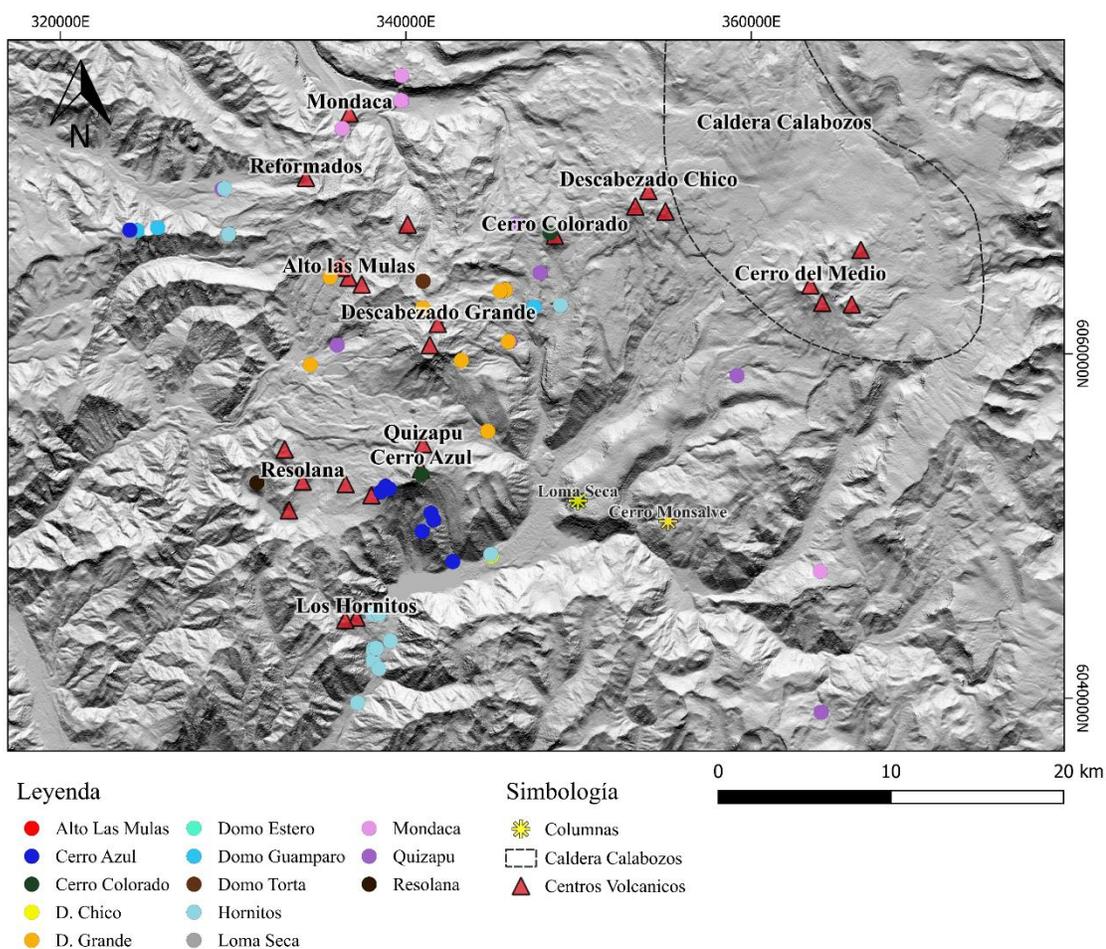


Figura 5.14. Distribución espacial de las muestras estudiadas con las predicciones hechas por el modelo de discriminación.

6 DISCUSIONES

6.1 Modelo de discriminación de muestras mediante random forest

Aunque el modelo demostró una precisión del 100% al reconocer todas las muestras de prueba, esto no garantiza la exactitud de los resultados. Para verificar su exactitud, se hace una comparación de los resultados con las muestras de las columnas estratigráficas publicadas por Vera et al. (2022). En este estudio, se asignó una posible proveniencia para cada estrato, basándose en otros parámetros como la composición mineral, la naturaleza de los depósitos y el historial eruptivo de los centros volcánicos (Fig 6.1)

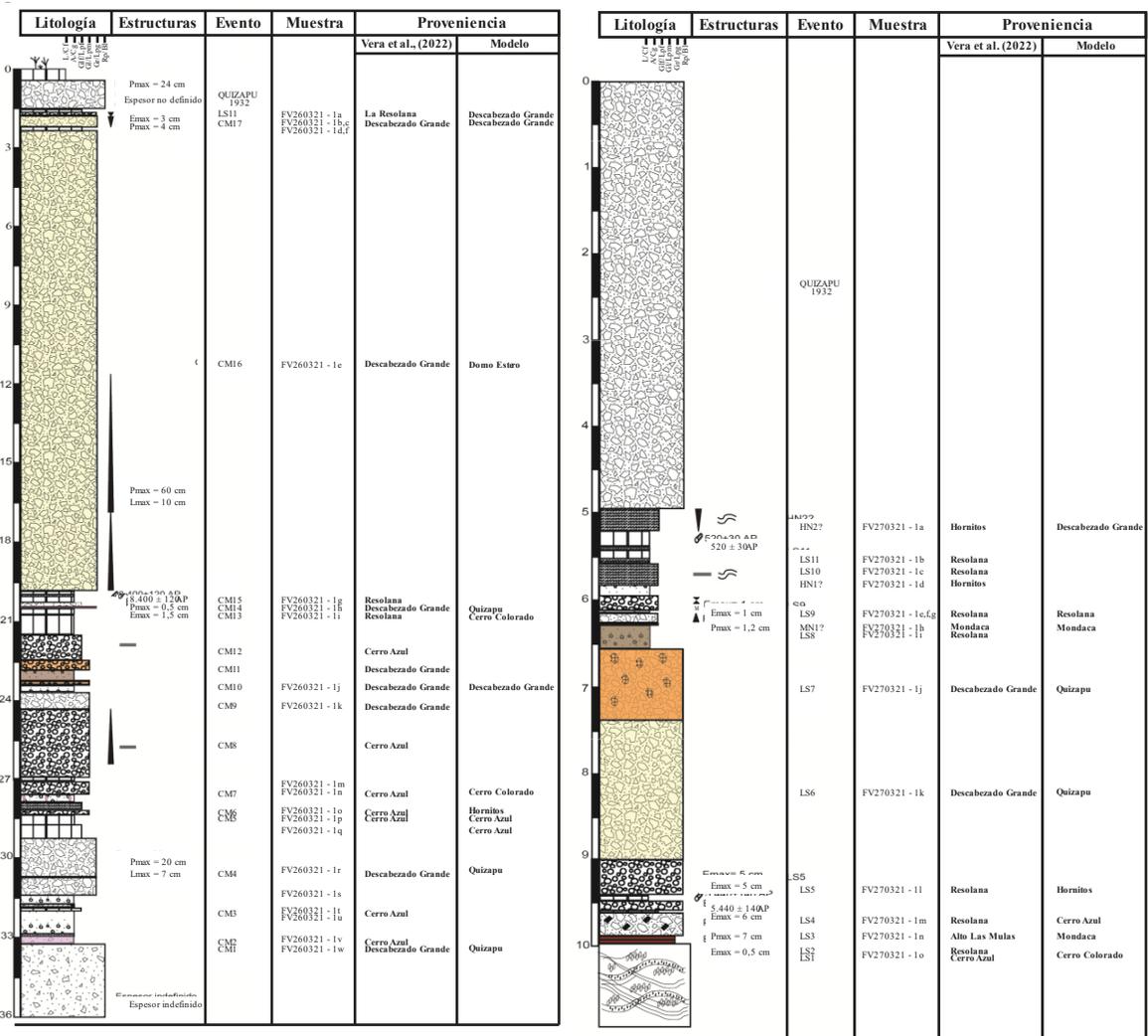


Figura 6.1. Columnas Estratigráficas. (A) Cerro Monsalve (B) Loma Seca. Comparación de resultados del modelo y propuestas de proveniencia de Vera et al. (2022).

Se puede observar que las posibles proveniencias determinadas por Vera et al. (2022) difiere en la mayoría de los estratos de aquellas que identificó el modelo. Para obtener una comprensión más clara de la distribución espacial de las muestras y explicar porqué el modelo eligió otros centros eruptivos, se emplea el análisis discriminante lineal (Anexo 13). Para mejorar el rendimiento de esta herramienta, se complementa con un decision tree que compara los centros eruptivos a analizar, resaltando las variables más influyentes en cada caso (Figura 6.2). Con el fin de aumentar la precisión en la selección de las variables, este algoritmo se aplicó 10 veces en cada caso.

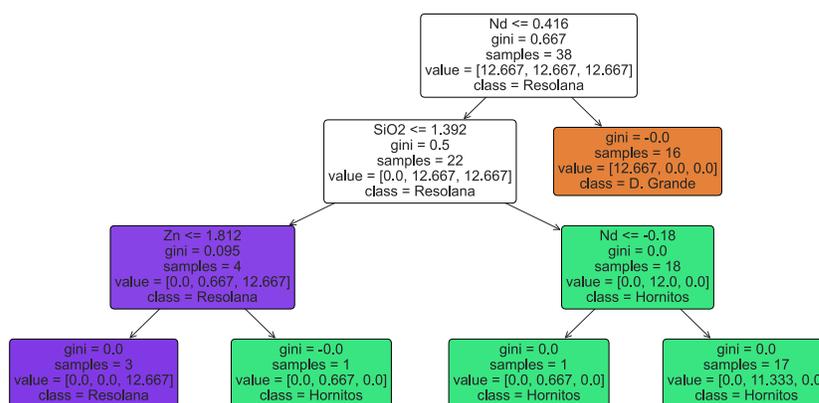


Figura 6.2. Ejemplo decision tree. Gráfico de un modelo de decision tree para el caso de los centros volcánicos Resolana, Hornitos y Descabezado Grande.

6.1.1 Limitantes del modelo

6.1.1.1 Composición mineralógica

Entre los resultados arrojados por el modelo, uno de los más controversiales respecto a su proveniencia es el de la muestra FV 270321-1A asociado al evento HN2 (Figura 6.1B). Mientras que Vera et al. (2022) le asigna a la muestra una proveniencia al centro eruptivo Hornitos, el modelo sugiere su asociación al volcán Descabezado Grande. Este conflicto se evidencia al aplicar el LDA a ambos centros eruptivos, considerando que las variables que más influyen en el gráfico son el Zn, MnO, Nd, Ce y SiO₂ (Anexo 14). La distribución espacial muestra que la ubicación de la muestra coincide completamente con la zona influenciada por el Descabezado Grande (Figura 6.3). Esto indica que los patrones de composición química de la muestra son más similares a los de este centro eruptivo.

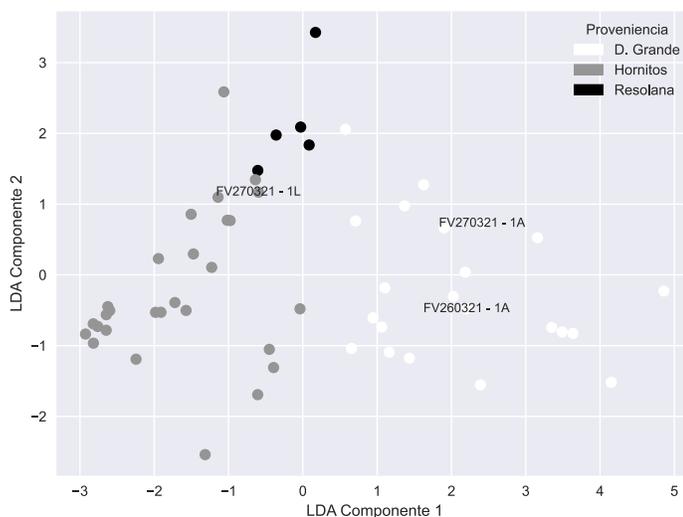


Figura 6.3. Gráfico LDA para el Descabezado Grande, Hornitos y Resolana. En este se etiquetan las muestras que tienen conflicto.

No obstante, la problemática surge en el enfoque petrográfico que utilizó Vera et al. (2022) para definir la proveniencia de la muestra. Según su descripción, la muestra consiste en escorias con un alto contenido de olivino, característica típica de las escorias del centro eruptivo Hornitos. Esta característica no se ha descrito en alguna composición mineralógica de muestras obtenidas en el Descabezado Grande. Por lo cual el modelo no lo pudo reconocer de manera similar ya que esta variable no es contemplada por este.

6.1.1.2 Temporalidad de las muestras

Otra discrepancia significativa que hay entre el modelo y lo estimado por Vera et al. (2022) son depósitos que el asocian al Descabezado Grande y el modelo indica que pertenecen al Quizapu como las muestras FV260321-1H y FV270321-1K, además de la muestras FV270321-1L que asocia a Resolana y el modelo indica que pertenece a Hornitos (Figura 6.1). Para el Quizapu y el Descabezado Grande en el LDA, las variables que más influyen son el CaO, La, Al₂O₃, Zn y P₂O₅ (Anexo 14). En cuanto a la ubicación espacial de las muestras en el LDA, estas se encuentran en el límite entre los centros eruptivos en conflicto, esto se debe a que estos en general tienen patrones similares en la mayoría de sus muestras, siendo algunas características pero otras que comparten patrones (Figura 6.3; Figura 6.4).

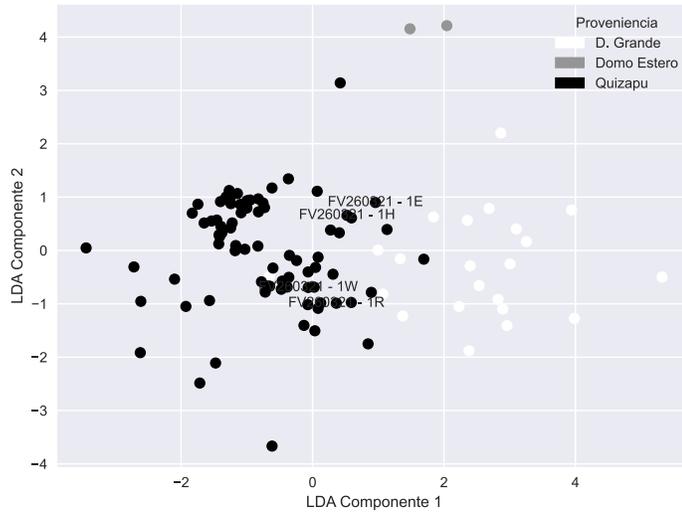


Figura 6.4. . Gráfico LDA para el Descabezado Grande, Domo Estero y Quizapu. En este se etiquetan las muestras que tienen conflicto.

En cuanto a los centros eruptivos analizados por el modelo, se sabe que las edades de la primera actividad registrada en el centro eruptivo Hornitos oscilan entre 790 ± 120 años AP (Vera et al., 2022). En cuanto al centro eruptivo Quizapu, se considera que su formación comenzó con la erupción de 1846 (Domeyko, 1950). Sin embargo, esta datación es controversial, ya que se sugiere la posibilidad de actividad previa a esta erupción (Vera et al., 2022). Por otro lado, las muestras examinadas, de acuerdo con las dataciones de otros estratos pertenecientes a las columnas estratigráficas, indican que las muestras atribuidas al volcán Quizapu se depositaron hace más de 6400 ± 120 años AP en la columna Cerro Monsalve, y hace más de 520 ± 30 años AP en la columna Loma Seca. Además, el estrato asociado a Hornitos se depositó a una edad cercana a 5440 ± 140 AP en la columna Loma Seca (Figura 6.1). Estas dataciones generan una incoherencia con las edades establecidas para cada centro eruptivo. Por lo tanto, es posible que estas muestras pertenezcan a los centros eruptivos Descabezado Grande y Resolana, que tienen un historial de actividad más antiguo y no presentan diferencias significativas en sus patrones de composición química con los centros determinados por el modelo. En consecuencia, el modelo no pudo determinar correctamente la proveniencia de las muestras al no tener en cuenta la cronología de la actividad de los distintos centros eruptivos.

6.1.2 Mejoras para el modelo

Los resultados obtenidos por el modelo no se desviaron significativamente de las expectativas, ya que su capacidad no se limita a identificar un centro eruptivo específico, sino que puede determinar centros eruptivos con características similares. Esto se puede complementar con información adicional más allá de los datos geoquímicos de cada centro. El modelo demuestra habilidad para reconocer características específicas en los datos geoquímicos, resultando en predicciones bastante precisas para los patrones que tienen las composiciones.

Sin embargo, la eficacia del modelo está intrínsecamente ligada a la incertidumbre en la determinación de la proveniencia de las muestras usadas para el entrenamiento de este. No siempre se puede asegurar con certeza que una muestra pertenezca efectivamente al centro eruptivo estudiado, salvo por indicadores como la proximidad a dicho centro. Esta incertidumbre se acentúa en el caso de los depósitos de tefra, debido a su amplia dispersión geográfica y las variadas direcciones en las que pueden depositarse. Por lo tanto, para optimizar la precisión del modelo, es crucial considerar el grado de certeza sobre el origen de las muestras con las que se trabaja. La incorporación de esta variable podría mejorar significativamente la fiabilidad de las predicciones del modelo.

Otro factor crucial para mejorar la precisión del modelo es aumentar el volumen de datos. Una mejor caracterización de cada centro eruptivo es esencial, dado que no resulta representativo basar las conclusiones en un único dato de un centro eruptivo. Disponer de una mayor cantidad de datos, así como de una mayor variabilidad en la información sobre cada centro eruptivo, podría incrementar significativamente la efectividad del modelo. Esta ampliación de la base de datos permitiría una mejor comprensión de las diferencias entre los distintos centros eruptivos, facilitando así una asignación más precisa de la proveniencias por parte del modelo.

6.1.3 Proyección del modelo

El modelo implementado para el Grupo Descabezados demostró ser eficaz en la discriminación de los centros eruptivos y en determinar la proveniencia de distintas muestras. Sin embargo, es importante reconocer que la utilidad de este tipo de modelos de aprendizaje automático puede variar significativamente cuando se aplican a otras zonas volcánicas de interés. Estos modelos son dependientes de los datos disponibles, por lo cual su eficacia está ligada a la calidad y relevancia

de los datos disponibles. Por ello, es crucial realizar una evaluación previa de los datos y comprender los procesos geológicos que ocurren en la zona de estudio antes de aplicar este enfoque de discriminación. Este análisis preliminar asegura que el modelo sea adaptado adecuadamente para reflejar las condiciones y características únicas de cada centro eruptivo.

6.2 Evolución magmática a partir de estadística multivariable

6.2.1 Similitud entre los centros eruptivos

Al asignar una proveniencia a las muestras que no tenían una definida, desde una perspectiva exclusivamente geoquímica, se logra ampliar significativamente la base de datos de gran parte de los centros eruptivos del Grupo Descabezados. Para tener una idea acerca de la similitud que tienen estos centros eruptivos, se emplea un análisis de clúster jerárquico, basado en la similitud determinada por la distancia en un espacio euclidiano entre las muestras. En el caso específico del Grupo Descabezados, la clasificación en función de sus elementos mayores revela la existencia de solo dos grupos principales: centros eruptivos básicos y centros eruptivos ácidos (Figura 6.5). Aquellos centros con una composición más variada, como es el caso del Quizapu y el Descabezado Grande, se ubican dentro de estas dos clasificaciones. Sin embargo, dentro de estos grupos, no se observa una similitud o discriminación clara entre los distintos centros eruptivos.

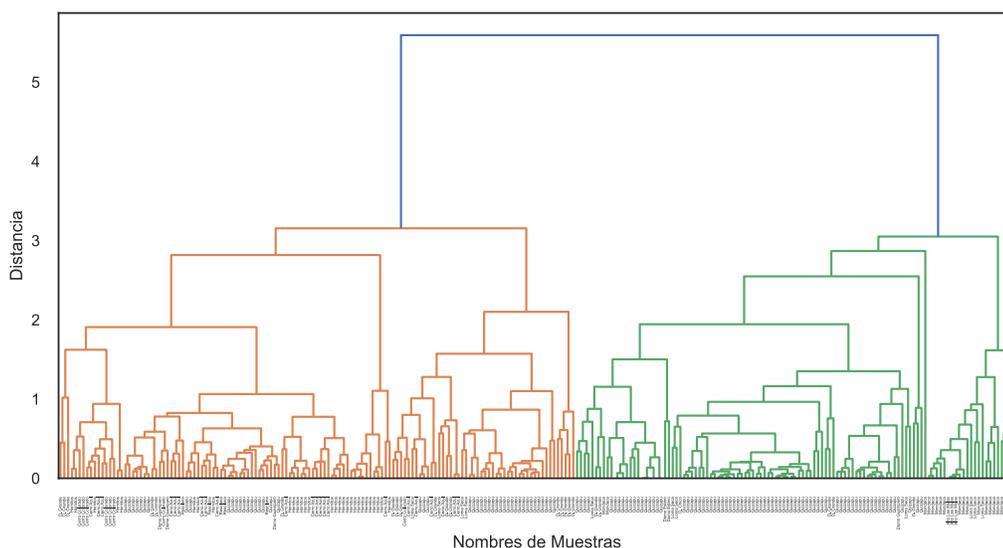


Figura 6.5. Dendrograma elementos mayores Grupos Descabezados. Las etiquetas corresponden al centro eruptivo del que provienen las muestras.

El análisis de clúster jerárquico para elementos mayores no arroja resultados concluyentes sobre similitudes entre los centros eruptivos del Grupo Descabezados. Sin embargo, la situación cambia al analizar los elementos traza. En este caso, no solo se identifican los dos grupos principales determinados en el caso de los elementos mayores, sino que también se distingue un tercer grupo asociado específicamente a muestras del Hornitos (Figura 6.6). Dentro de los dos grupos principales, se observan similitudes notables entre ciertos grupos eruptivos. Por ejemplo, en los centros eruptivos básicos, Hornitos, Resolana, Cerro Colorado, Domo Guamparo y Cerro Azul muestran características comunes. Similarmente, entre los centros eruptivos ácidos, Mondaca, Alto las Mulas y Domo Torta comparten ciertas similitudes.

Es importante destacar que, aunque los centros eruptivos como Descabezado Grande, Loma Seca y Quizapu presentan una composición de depósitos que abarca ambos grupos, no muestran una similitud clara con los centros eruptivos de estos grupos (Figura 6.6). Sugiriendo la posibilidad de que exista algún otro proceso que los diferencie del resto.

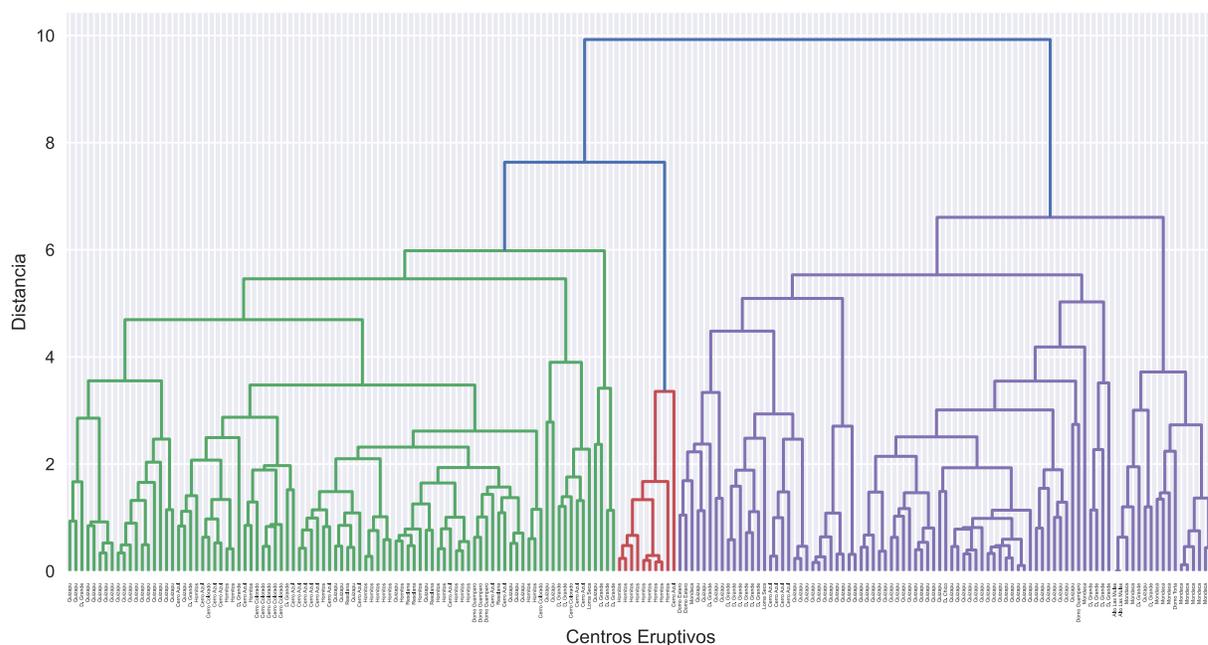


Figura 6.6. Dendrograma elementos traza Grupos Descabezados. Las etiquetas corresponden al centro eruptivo del que provienen las muestras.

6.2.2 Procesos de diferenciación magmática en Grupo Descabezados

Como se observó anteriormente, el análisis de componentes principales (PCA) es una herramienta eficaz para identificar variables que influyen en la similitud y discriminación de centros eruptivos. Para el caso de los elementos principales, en el diagrama de biplot de las dos primeras componentes principales, las variables con mayor influencia en la variabilidad de las muestras son el P_2O_5 , MgO y K_2O . Estos elementos son candidatos óptimos para generar un diagrama ternario que preserve la mayor variabilidad posible.

Para el diagrama ternario de estas variables, se observa claramente la transición en la diferenciación de los centros eruptivos del Grupo Descabezados. Los centros eruptivos básicos o menos diferenciados (Hornitos y Resolana) se caracterizan por altos valores de MgO , que disminuye a medida que el magma se diferencia, aumentando simultáneamente las concentraciones de K_2O , hasta alcanzar los centros eruptivos más diferenciados (Mondaca y Alto las Mulas) con altos valores de este último. Sin embargo, para el P_2O_5 , no se observa una variación clara, lo que impide obtener resultados concluyentes sobre su influencia (Figura 6.7A).

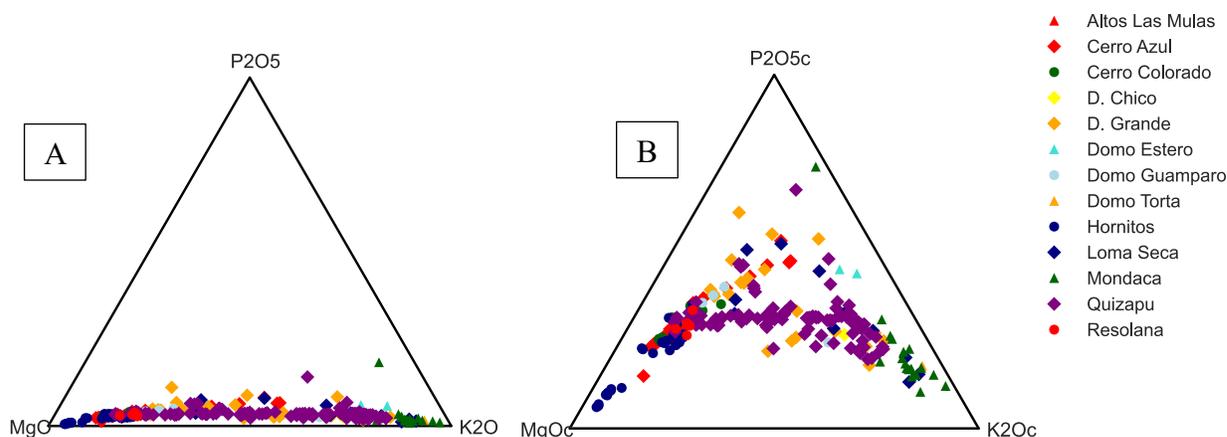


Figura 6.7. Diagramas ternarios $MgO-P_2O_5-K_2O$ Grupo Descabezados. (A) Con datos sin perturbar (B) Con datos perturbados.

Al aplicar una perturbación a los datos para centrarlos en el diagrama ternario, se distinguen dos tendencias principales. Estas se diferencian por las concentraciones de P_2O_5 . La primera tendencia incluye a los centros eruptivos Descabezado Grande, Cerro Azul, Domo Guamparo y Loma Seca, donde se aprecia una variación significativa y concentraciones de P_2O_5 que aumentan conforme el magma se diferencia. Por otro lado, la segunda tendencia, que corresponde principalmente al centro

eruptivo Quizapu, muestra un comportamiento distinto en cuanto a la variación de P_2O_5 . Además del P_2O_5 , elementos como el TiO_2 y el MnO tienen un comportamiento similar (Figura 6.7B)

Estas tendencias indican que la composición de los elementos del Quizapu puede ser un indicador clave de un proceso evolutivo diferente al de otros centros eruptivos del Grupo Descabezados. Según Ruprecht et al. (2012) y Higgins et al. (2015), las variaciones en el tipo de erupción y los depósitos generados por el Quizapu en un corto período de tiempo se deben a una mezcla de magmas en altos niveles de la corteza. En particular, durante la erupción de 1846-47, los depósitos efusivos son el resultado de la interacción entre un magma dacítico y uno andesítico. En contraste, la erupción de 1932 se originó de un magma dacítico más profundo, pero muestra signos de mezcla de magma de composición similar a la fase inicial de la erupción de 1846-47.

Estos estudios, centrados principalmente en aspecto texturales y en la termobarometría, no realizan un análisis detallado de la geoquímica de los depósitos. Sin embargo, la diferencia en los valores relativamente bajos de P_2O_5 , TiO_2 y MnO sugiere la mezcla de magma andesítico con uno dacítico a niveles superficiales para el caso del Quizapu.

Para confirmar el proceso de mezcla de magmas en el caso del Quizapu, Dungan et al. (2001) estudió un flujo de lava andesítico de Quebrada Turbia, proveniente del Complejo Volcánico Tatara-San Pedro- Pellado, situado al sur de la zona de estudio. En este flujo, se observaron valores moderadamente bajos de P_2O_5 , TiO_2 , Nb y Zr, junto con niveles moderadamente altos de Ni, Cr y MgO. Estas características químicas no son consistentes con la cristalización fraccionada de ninguna composición basáltica previamente analizada en la Zona Volcánica Sur. Sin embargo, son compatibles con una mezcla entre un magma basáltico-andesítico y otro dacítico.

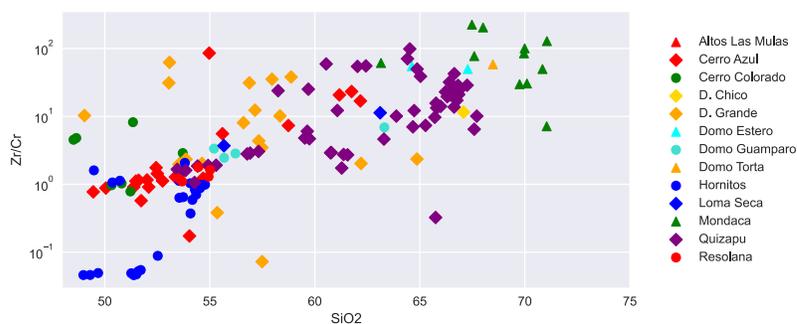


Figura 6.8. Gráfico Zr/Cr vs SiO_2 para el Grupo Descabezados.

En relación con los centros eruptivos del Grupo Descabezados, el comportamiento del Quizapu sigue patrones similares a los flujos de lava descritos por Dungan et al. (2001). Donde el Quizapu está caracterizado por valores moderadamente altos de Ni y Cr, así como valores moderadamente bajos de Y y Zr, a medida que el magma se va diferenciando (Figura 6.8; Figura 6.9). Es importante destacar que el PCA para elementos trazas, estas variables muestran una alta variabilidad en las muestras. Esto fortalece la idea de una mezcla de magma para el Quizapu a niveles superficiales de una magma poco diferenciado, caracterizado por altas concentraciones de Ni y Cr, pero bajas de P_2O_5 y TiO_2 . Esta composición es similar a las muestras obtenidas de un origen de magma primitivo para el centro eruptivo Hornitos (Salas et al., 2017), evidenciando la complejidad y la dinámica del complejo volcánico, donde el proceso de evolución magmática predominante es la cristalización fraccionada pero no es el único presente.

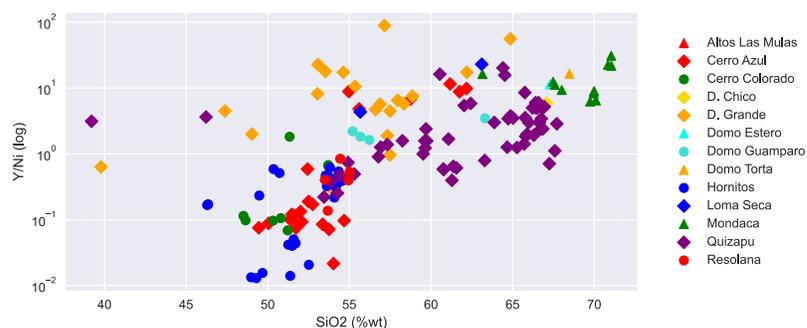


Figura 6.9. Gráfico Y/Ni vs SiO₂ para Grupo Descabezados.

6.2.3 Análisis espacial

El análisis de la distribución de los centros eruptivos revela patrones interesantes, especialmente en los centros eruptivos básicos como Hornitos y Resolana. Según Piquer (2023), estos centros eruptivos comparten composiciones similares y están espacialmente relacionados debido a su ubicación en una zona tectónicamente débil. Esta característica habría facilitado su emplazamiento a lo largo de un lineamiento de orientación NNW. Sin embargo, establecer una relación espacial concreta con otro centro eruptivo básico del Grupo Descabezados, como el Cerro Colorado, sigue siendo incierto.

La investigación de Ruprecht et al. (2012) proporciona una perspectiva interesante al describir las etapas evolutivas del centro eruptivo Quizapu. En dicho estudio se identificó una falla de orientación NS que se extiende desde Cerro Azul, pasando por Quizapu, hasta llegar a Descabezado

Grande. Esta falla habría permitido que el magma ascendiera y se almacenara a altos niveles de la corteza, encontrándose en esta, varios depósitos de magma mezclado con composiciones variables pero relativamente homogéneas.

Esta misma falla NS podría explicar los lineamientos de emplazamiento de otros centros eruptivos con características similares, como los centros eruptivos menores ácidos Alto las Mulas y Mondaca, así como Cerro Azul y Descabezado Grande. En el caso particular de Quizapu, la mezcla de magma parece ser un proceso más localizado en el centro eruptivo, por lo tanto más superficial, ya que su tendencia no se observa en otros centros, donde se evidencia una relación estructural compleja en el ascenso de diferentes fuentes de magmas, tanto profundas como superficiales.

Aunque los lineamientos son coherentes, representan solo una parte del complejo sistema volcánico del Grupo Descabezados. Este sistema se caracteriza por la interacción de fuentes magmáticas en diversos niveles de profundidad y un control estructural complejo, particularmente por encontrarse en la zona de contacto Meso-Cenozoico. Esto subraya la estrecha relación entre la tectónica y el volcanismo en el área de estudio (Cembrano & Lara, 2009).

6.2.4 Análisis temporal

Al examinar las muestras en las columnas estratigráficas, se analiza la variación de los elementos más influyentes, determinados mediante el PCA de elementos mayores. Dentro de estas columnas, algunos estratos fueron datados mediante ^{14}C , obteniendo dataciones de hasta 8400 ± 120 AP. Adicionalmente, se incluye la proveniencia, la cual fue definida según el modelo de discriminación, y estos resultados fueron filtrados según su temporalidad y composición mineralógica (Figura 6.10; Figura 6.11).

El Grupo Descabezados exhibe una amplia variación en su composición a lo largo del tiempo, con productos que varían desde básicos a ácidos. Esto se refleja en los contenidos de SiO_2 (47 – 68 %wt) y MgO (1-5,5 %wt). No se observan patrones consistentes o repetitivos en estas variaciones a lo largo del tiempo. Se observa que los magmas más ácidos tienden a formar estratos de mayor potencia en comparación con otros depósitos. Esto podría deberse a erupciones que expulsan grandes cantidades de material y/o que se extienden por un periodo prolongado de tiempo.

Específicamente, el centro eruptivo Descabezado Grande, presenta una gran cantidad de muestras en las columnas estratigráficas, por lo que permite realizar un análisis detallado de sus depósitos a

lo largo del tiempo. Estas muestran revelan que, en su mayoría, los depósitos eruptivos tienen composiciones ácidas. Sin embargo, se destaca una excepción: en depósitos de edades superiores a 8400 años, se evidencia un producto de composición básica, el cual difiere a su comportamiento más diferenciado que se observa a lo largo de las columnas estratigráficas (Figura 6.10).

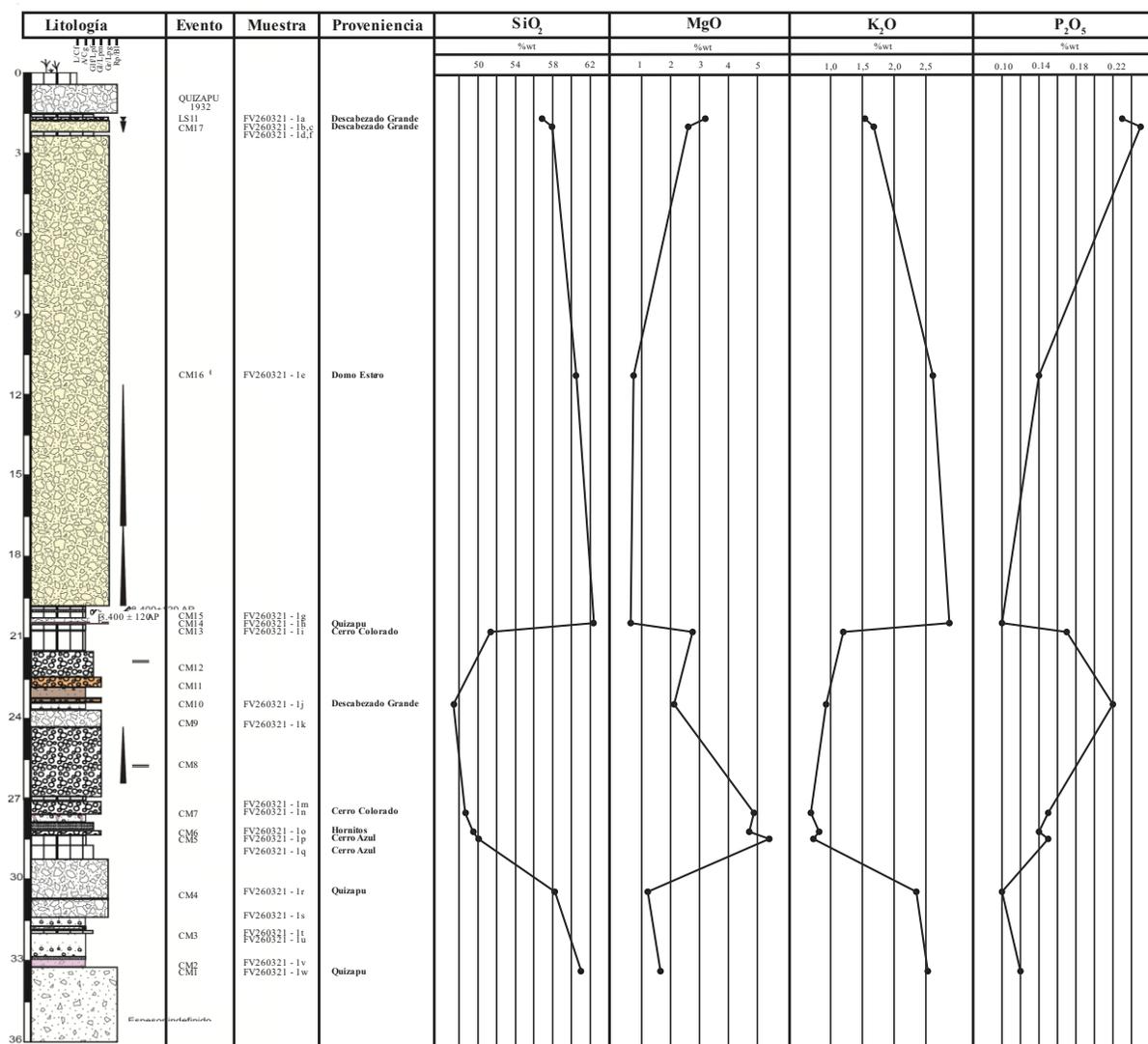


Figura 6.10. Variación elementos a lo largo de la columna Cerro Monsalve. Proveniencia según el modelo y sus correcciones de temporalidad.

Para los centros eruptivos menores de composición básica (Hornitos, Cerro Colorado y Resolana), no se detectan cambios significativos en su composición. Por otro lado, en los centros eruptivos menores de composición ácida, la ausencia de depósitos en las columnas estratigráficas dificulta la

interpretación temporal de estos. A excepción del centro eruptivo Mondaca, el cual presenta una composición similar en el tiempo.

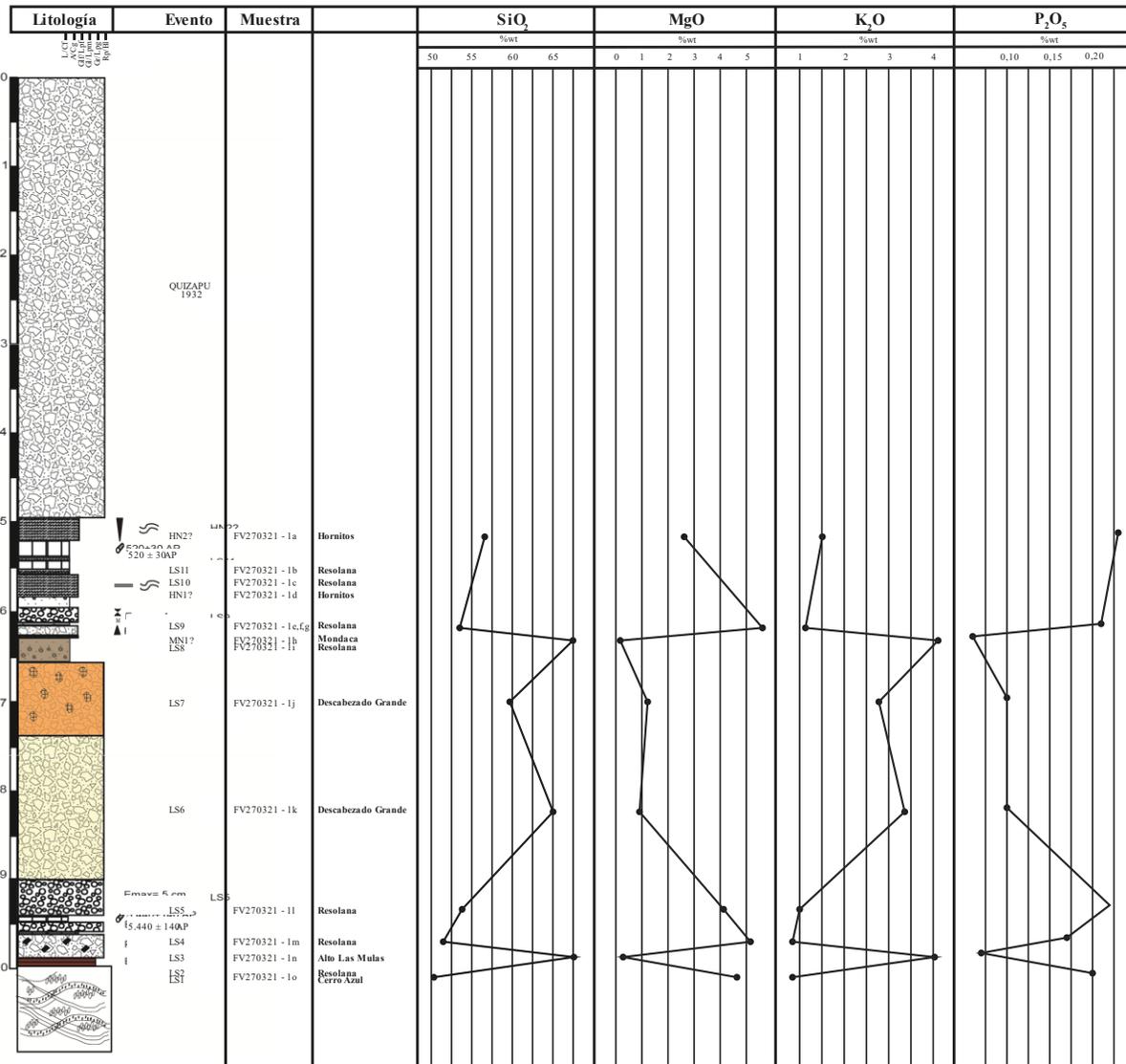


Figura 6.11. Variación elementos a lo largo de la columna Loma Seca. Proveniencia según el modelo y sus correcciones de temporalidad.

Para llevar a cabo una interpretación temporal precisa de los centros eruptivos del Grupo Descabezados, resulta esencial obtener un mayor número de muestras a lo largo de las columnas estratigráficas. Esto permitirá observar con mayor claridad las variaciones y determinar si estos cambios se produjeron de manera gradual o drástica.

7 CONCLUSIONES

El análisis estadístico multivariable, como el análisis de componentes principales (PCA) y el análisis de clúster jerárquico, ha demostrado ser una herramienta valiosa para la discriminación y correlación de centros eruptivos y evaluar procesos de evolución magmática.

Es fundamental realizar un adecuado preprocesamiento de datos y operaciones antes del análisis, incluyendo transformaciones log-cocientes y la gestión adecuada de los datos faltantes (NaN). Estas operaciones son esenciales para obtener resultados fiables y significativos sobre el comportamiento de las distintas variables que se están estudiando.

Para la discriminación de la proveniencia de las muestras, se requiere una herramienta de clasificación de datos más específica, como el aprendizaje automático supervisado. Sin embargo, es crucial realizar un análisis exhaustivo de los datos previos a la implementación de estos modelos, para asegurar resultados precisos y confiables.

El uso exclusivo de datos geoquímicos no proporciona una visión completa de los procesos y las muestras trabajadas. Es imprescindible integrar otros parámetros como la composición mineralógica y textural, así como consideraciones temporales. Además, es necesario un análisis detallado de cada centro eruptivo, ya que aquellos representados por una única muestra pueden no aportar información significativa para el estudio.

Un factor crítico para la validez de los resultados obtenidos con estas herramientas es la certeza sobre la proveniencia de las muestras. La incertidumbre en este aspecto puede conducir conclusiones erróneas o muy diferentes de las esperadas.

Los datos geoquímicos son solo una parte del análisis. Es esencial incorporar una evaluación espacial y temporal más detallada para llegar a conclusiones más robustas sobre el comportamiento del complejo volcánico en su conjunto.

Finalmente, es importante destacar que la aplicabilidad de este tipo de metodologías y el uso de herramientas estadísticas para la discriminación y correlación de centros eruptivos depende en gran medida de la calidad y cantidad de los datos disponibles. Por lo tanto, estos enfoques no siempre pueden ser igualmente efectivos en otros complejos volcánicos que pertenecen al arco volcánico andino.

8 REFERENCIAS

- Aitchison, J. (1984). The statistical analysis of geochemical compositions. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 16, 531-564.
- Aitchison, J. (2005). A concise guide to compositional data analysis. In *Compositional Data Analysis Workshop*.
- Aldenderfer, M. S., & Blashfield, R. K. (1984). *Cluster Analysis* Sage. Thousand Oaks, CA.
- Astaburuaga D (2014) Evolución estructural del límite Mesozoico-Cenozoico de la Cordillera Principal entre los 35°30' y 36° S, Región del Maule, Chile. Master thesis. Universidad de Chile
- Bellie, V., Gopal, M. K., & Venugopal, G. (2020). Using machine learning techniques towards predicting the number of dengue deaths in India—A case study. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 130-135.
- Börgel, R. (1983). *Geomorfología*. Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar.
- Branca, S., Coltelli, M., & Gropelli, G. (2014). Stratigraphic Methodology for the New Geological Map of Etna Volcano. In *STRATI 2013: First International Congress on Stratigraphy At the Cutting Edge of Stratigraphy* (pp. 1217-1221). Springer International Publishing.
- Brüggen, J. (1950). *Fundamentos de la Geología de Chile*. Instituto Geográfico Militar.
- Cas, R. A. F., & Wright, J. V. (1988). *Volcanic Successions Modern and Ancient: A geological approach to processes, products and successions* (1st ed.). Springer Dordrecht.
- Caricchi, L., & Blundy, J. (2015). The temporal evolution of chemical and physical properties of magmatic systems. *Geological Society, London, Special Publications*, 422(1), 1-15.
- Casertano, L. (1963). General characteristics of active Andean volcanoes and a summary of their activities during recent centuries. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(6), 1415-1433.
- Cembrano, J., Tassara, A., & Arancibia, G. (2007). *Apuntes del curso "GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA PARA EXPLORACIONES."* Sociedad Geológica de Chile.
- Cembrano, J., & Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: a review. *Tectonophysics*, 471(1-2), 96-113.
- Charrier R, Baeza O, Elgueta S, Flynn J, Gans P, Kay S, Zurita E (2002) Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33–36 SL). *J South Am Earth Sci* 15(1):117–139
- Cox, K. G., Bell, J. D., & Pankhurst, R. J. (1979). Compositional variation in magmas. In *The interpretation of igneous rocks* (pp. 12-41). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Cutler, A., Cutler, D. R., & Stevens, J. R. (2012). Random forests. *Ensemble machine learning: Methods and applications*, 157-175.

- Dicarlo, D. J., & Cristallini, E. (2007). Estructura de la margen norte del Río Grande, Bardas Blancas, provincia de Mendoza. *Revista de la Asociación geológica Argentina*, 62(2), 187-199.
- Domeyko, I. (1850). Viaje a las cordilleras de Talca i de Chillán: Segunda parte. *Anales De La Universidad De Chile*.
- Dungan, M. A., Wulff, A., & Thompson, R. E. N. (2001). Eruptive stratigraphy of the Tatará–San Pedro complex, 36 S, Southern Volcanic Zone, Chilean Andes: reconstruction method and implications for magma evolution at long-lived arc volcanic centers. *Journal of Petrology*, 42(3), 555-626.
- Drake, R. E. (1976). Chronology of Cenozoic igneous and tectonic events in the central Chilean Andes—Latitudes 35 30' to 36 S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1(3), 265-284.
- Everitt, B. S., Landau, S., & Leese, M. (2001). *Cluster Analysis*, Oxford University Press. New York, New York, USA.
- Farías, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., Cáceres J. & Comte, D. (2008). Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33–35 S). *Tectonics*, 27(1).
- Fuenzalida, H. (1941). Distribución de los volcanes del grupo Descabezados. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural* 19, 19-30.
- Fuenzalida, H. (1943). El Cerro Azul y el Volcán Quizapu. *Bol Museo Nac Hist Nat (Santiago)*, 21, 37-53.
- Gardner, J. E., Carey, S., Sigurdsson, H., & Rutherford, M. J. (1995). Influence of magma composition on the eruptive activity of Mount St. Helens, Washington. *Geology*, 23(6), 523-526.
- Giambiagi, L., Ghiglione, M., Cristallini, E., & Bottesi, G. (2009). Kinematic models of basement/cover interaction: Insights from the Malargüe fold and thrust belt, Mendoza, Argentina. *Journal of Structural Geology*, 31(12), 1443-1457.
- Giambiagi L, Tassara A, Mescua J, Tunik M, Alvarez PP, Godoy E & Tapia F (2015) Evolution of shallow and deep structures along the Maipo–Tunuyán transect (33°40'S): from the Pacific coast to the Andean foreland. *Geol Soc Lond Spec Publ* 399(1):63–82
- Giordano, D., Russell, J. K., & Dingwell, D. B. (2008). Viscosity of magmatic liquids: a model. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1-4), 123-134.
- González-Ferrán, O. (1994). *Volcanes de Chile*, Inst. Geográfico Militar. Santiago de Chile, 640, 294-324.
- Gonzalez-Ferrán, O. (1994). *Volcanes de Chile*, Inst. Geográfico Militar. Santiago de Chile, 640, 294-324.
- González-Ferrán, O. L., & Martínez, M. V. (1962). Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35 y 38 sur. In *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas* (Vol. 19, No. 19, pp. ág-19).

- Greenacre, M. (2018). *Compositional data analysis in practice*. CRC press.
- Grunder, A. L., & Mahood, G. A. (1988). Physical and chemical models of zoned silicic magmas: the Loma Seca Tuff and Calabozos caldera, southern Andes. *Journal of Petrology*, 29(4), 831-867.
- Hildreth, W. E. S., Grunder, A. L., & Drake, R. E. (1984). The Loma Seca Tuff and the Calabozos caldera: A major ash-flow and caldera complex in the southern Andes of central Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 95(1), 45-54.
- Hildreth, W., & Drake, R. E. (1992). Volcán Quizapu, Chilean Andes. *Bulletin of Volcanology*, 54(2), 93-125.
- Irvine, T. N., & Baragar, W. R. A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of earth sciences*, 8(5), 523-548.
- Jackson, J. E. (2005). *A user's guide to principal components*. John Wiley & Sons.
- Jaupart, C., & Allègre, C. J. (1991). Gas content, eruption rate and instabilities of eruption regime in silicic volcanoes. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3-4), 413-429
- Jiang, T., Gradus, J. L., & Rosellini, A. J. (2020). Supervised machine learning: a brief primer. *Behavior Therapy*, 51(5), 675-687.
- Kingsford, C., & Salzberg, S. L. (2008). What are decision trees? *Nature biotechnology*, 26(9), 1011-1013.
- Kuno, H. (1968). Differentiation of basalt magmas. *Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition*, 623-688.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Strekeisen, A., Woolley, A.R. & Zanettin, B. (1989). *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell Scientific Publications, London, 193 pp.
- Martínez García, S. (2022). *Datos Composicionales: Geometría de Aitchison*. Universidad de Salamanca.
- Martín-Fernández, J. A., Daunis-i-Estadella, J., & Tyutyunnik, Y. G. (2004). Experiencia del estudio geoestadístico de composición química de suelos, de los indicadores de factores y de las condiciones geoquímicas. Report de investigación IMA 04-01-RR.
- Martín-Fernández, J. A., Barceló-Vidal, C., Pawlowsky-Glahn, V., Kovács, L. Ó., & Kovács, G. P. (2005). Subcompositional patterns in Cenozoic volcanic rocks of Hungary. *Mathematical geology*, 37, 729-752.
- McBirney, A. R., & Murase, T. (1984). Rheological properties of magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 12(1), 337-357.
- McSween, H. Y. Jr., Richardson, S. M., & Uhle, M. E. (2003). *Geochemistry: Pathways and Processes* (2nd ed.) (pp. 249-261). Columbia University Press.

- Minnitt, R. C. A., & Esbensen, K. H. (2023). Geochemical evolution of magmatic rocks in the Vioolsdrif Domain, Namibia. *South African Journal of Geology* 2023, 126(1), 49-74.
- Nasteski, V. (2017). An overview of the supervised machine learning methods. *Horizons*. b, 4, 51-62.
- Naranjo, J. A., Hevia, F., & Polanco, E. (2021). Mondaca Volcano lahar of December 3, 1762, Maule Region (35° 28'S): one of the largest volcanic disasters in Chilean history. *Andean Geology*, 48(3), 514-528.
- Oesch, S., Ellis, B. S., Cortes-Calderon, E. A., & Bachmann, O. (2022, May). Contrasting styles of compositional zonation in pyroclastic deposits of the Mogán Group, Gran Canaria, Canary Islands. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU22-4350).
- Pan, R., Hou, T., Wang, X., Encarnación, J., & Botcharnikov, R. (2022). Multiple magma storage regions and open system processes revealed by chemistry and textures of the Datong tholeiitic lavas, North China Craton. *Journal of Petrology*, 63(5), egac034.
- Pawlowsky-Glahn, V., & Buccianti, A. (2011). *Compositional data analysis*. Chichester: Wiley.
- Peccerillo, A., & Taylor, S. R. (1976). Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to mineralogy and petrology*, 58, 63-81.
- Perugini, D., De Campos, C. P., Ertel-Ingrisch, W., & Dingwell, D. B. (2012). The space and time complexity of chaotic mixing of silicate melts: Implications for igneous petrology. *Lithos*, 155, 326-340.
- Petit-Breuilh, M. E. (2004). *La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (siglos XVI al XX)*. Servicio de Publicaciones del Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote-Casa de los volcanes.
- Piquer J, Castelli JC, Charrier R, Yáñez G (2010) El Cenozoico del alto río Teno, Cordillera Principal, Chile central: estratigrafía, plutonismo y su relación con estructuras profundas. *Andean Geol* 37(1):32–53
- Piquer, J., Fischer, T., Torres, F., & Plissart, G. (2023). Spatiotemporal variability of magmatic products under a changing structural and tectonic context: a case study in the Andes of southern Central Chile. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1064209.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R., & Dutter, R. (2011). *Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R*. John Wiley & Sons.
- Robillier, M. (1934). Erupciones volcánicas en Chile. *Bulletin volcanologique*, 3(3), 135-138.
- Rollinson, H. R. 1. (1993). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Harlow, Essex, England: New York, Longman Scientific & Technical.
- Ruprecht, P., & Bachmann, O. (2010). Pre-eruptive reheating during magma mixing at Quizapu volcano and the implications for the explosiveness of silicic arc volcanoes. *Geology*, 38(10), 919-922.

- Ruprecht, P., Bergantz, G. W., Cooper, K. M., & Hildreth, W. (2012). The crustal magma storage system of Volcán Quizapu, Chile, and the effects of magma mixing on magma diversity. *Journal of Petrology*, 53(4), 801-840.
- Salas, P., Rabbia, O. M., & Hernández, L. (2015). Compositional evolution of Los Hornitos mafic cones: insights from whole rock chemistry and high-resolution EMPA profiles in high-forsterite olivine phenocrysts. In XIV Congreso Geológico Chileno, At1St3_026.
- Salas, P. A., Rabbia, O. M., Hernández, L. B., & Ruprecht, P. (2017). Mafic monogenetic vents at the Descabezado Grande volcanic field (35.5 S–70.8 W): the northernmost evidence of regional primitive volcanism in the Southern Volcanic Zone of Chile. *International Journal of Earth Sciences*, 106, 1107-1121.
- Seyfried, H., Worrier, G., Uhlig, D., Kohler, I., & Calvo, C. (1998). Introducción a la geología y morfología de los Andes en el norte de Chile. *Chungará (Arica)*, 30(1), 7-39.
- Self, S., & Sparks, R. S. J. (Eds.). (1981). *Tephra Studies: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute "Tephra Studies as a Tool in Quaternary Research," held in Laugarvatn and Reykjavík, Iceland, June 18–29, 1980 (1st ed.)*. Springer Dordrecht.
- SERNAGEOMIN. (2018). Chile: territorio volcánico. Servicio Nacional de Geología y Minería. 139. Santiago.
- Siebert, L., Simkin, T., & Kimberly, P. (2011). *Volcanoes of the World*. Univ of California Press.
- Silvestro, J., Kraemer, P., Achilli, F., & Brinkworth, W. (2005). Evolución de las cuencas sinorogénicas de la Cordillera Principal entre 35-36 S, Malargüe. *Revista de la Asociación Geológica argentina*, 60(4), 627-643.
- Stern, C. R. (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista geológica de Chile*, 31(2), 161-206.
- Stern, H., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J. E., Lara, L. E., Naranjo, J. A., Parada, M. A., & Skewes, M. A. (2007). Chilean Volcanoes. En *The Geology of Chile*. 156-157. Geological Society of Chile.
- Sun, S. S., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313-345.
- Tharwat, A., Gaber, T., Ibrahim, A., & Hassanien, A. E. (2017). Linear discriminant analysis: A detailed tutorial. *AI communications*, 30(2), 169-190.
- Thompson, R. N. (1982). British Tertiary volcanic province. *Scottish Jour. Geol.*, 18, 49-107.
- Tormey, D. R., Hickey-Vargas, R., Frey, F. A., & López-Escobar, L. (1991). Recent lavas from the Andean volcanic front (33 to 42 S); interpretations of along-arc compositional variations. *Geological Society of America special paper*, 265, 57-77.
- Varmuza, K., & Filzmoser, P. (2016). *Introduction to multivariate statistical analysis in chemometrics*. CRC press.

- Valdivia, P., Zandonà, A., Kurnosov, A., Ballaran, T. B., Deubener, J., & Di Genova, D. (2023). Are volcanic melts less viscous than we thought? The case of Stromboli basalt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 178(7), 45.
- Vera, F., Jorquera, C., Amigo, Á., Bertin, L. (2022). Peligros de los volcanes Descabezado Grande, Cerro Azul, Quizapu y centros eruptivos menores, región del Maule. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, 39, 99 p., 1 mapa escala 1:75.000. Santiago.
- White, W.M. (2013). *Geochemistry*. Wiley-Blackwell.
- Winter, J. D. (2010). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Wood, D. A., Joron, J. L., Treuil, M., Norry, M., & Tarney, J. (1979). Elemental and Sr isotope variations in basic lavas from Iceland and the surrounding ocean floor: The nature of mantle source inhomogeneities. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70, 319-339.
- Wulff, A. H. (2003, December). Composite chemostratigraphy of lavas from the Casitas Shield, Descabezado Grande-Cerro Azul Volcanic Complex, Chilean Andes. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2003, pp. V32H-07).
- Xanthopoulos, P., Pardalos, P. M., Trafalis, T. B., Xanthopoulos, P., Pardalos, P. M., & Trafalis, T. B. (2013). Linear discriminant analysis. *Robust data mining*, 27-33.
- Yang, Q., Kang, Q., Huang, Q., Cui, Z., Bai, Y., & Wei, H. (2021, June). Linear correlation analysis of ammunition storage environment based on Pearson correlation analysis. In *Journal of physics: Conference series* (Vol. 1948, No. 1, p. 012064). IOP Publishing.
- Zhou, M. F., Yan, D. P., Wang, C. L., Qi, L., & Kennedy, A. (2006). Subduction-related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1-2), 286-300.
- Zou, K. H., Tuncali, K., & Silverman, S. G. (2003). Correlation and simple linear regression. *Radiology*, 227(3), 617-628.

ANEXOS

Anexo 1. Base de datos de datos químicos de muestras extraídas del Grupo Descabezados. Las concentraciones de elementos mayores están %wt y las de elementos traza y tierras raras están en ppm. Ingresar a base de datos completa para ver la tabla en su totalidad.

| Muestra | Tipo_Depósito | Descripción | Proveniencia | SiO2 | Al2O3 | TiO2 | FeO | Fe2O3 | FeOT | CaO | MgO | MnO | Na2O | K2O | P2O5 | PPC | Suma |
|-------------------|---------------|---|----------------|-------|-------|------|-----|-------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|--------|
| GO060112-3 | Lava | Lava fibrosa Alto Las Mulas | Alto Las Mulas | 70.56 | 14.72 | 0.36 | NaN | 2.50 | NaN | 1.38 | 0.46 | 0.07 | 5.02 | 4.01 | 0.08 | 0.70 | 99.85 |
| GO060112-3 | Lava | Lava fibrosa Alto Las Mulas | Alto Las Mulas | 70.56 | 14.72 | 0.36 | NaN | 2.50 | NaN | 1.38 | 0.46 | 0.07 | 5.02 | 4.01 | 0.08 | 0.70 | 99.85 |
| GO060112-3 | Lava | Lava fibrosa Alto Las Mulas | Alto Las Mulas | 70.53 | 14.69 | 0.36 | NaN | 2.52 | NaN | 1.39 | 0.47 | 0.07 | 5.03 | 4.03 | 0.08 | 0.70 | 99.85 |
| RG121216-1B q | Tefra | F. piroclástico aglomerado | Cerro Azul | 52.44 | 18.46 | 0.66 | NaN | 9.17 | NaN | 8.26 | 4.85 | 0.15 | 3.99 | 0.93 | 0.20 | 0.51 | 99.63 |
| RG121216-1D q | Lava | Lava glaciada | Cerro Azul | 53.36 | 19.15 | 0.59 | NaN | 8.19 | NaN | 8.30 | 4.32 | 0.13 | 4.03 | 1.28 | 0.26 | -0.15 | 99.47 |
| RG121216-1F q | Tefra | Bomba piroclástica en superficie | Cerro Azul | 52.09 | 18.94 | 0.66 | NaN | 9.07 | NaN | 9.02 | 4.97 | 0.14 | 3.54 | 0.99 | 0.18 | -0.12 | 99.48 |
| RG121216-2B q | Tefra | Bomba corteza de pan bajo PF amarillo | Cerro Azul | 51.61 | 18.47 | 0.69 | NaN | 9.27 | NaN | 8.87 | 5.37 | 0.15 | 3.66 | 0.95 | 0.18 | 0.50 | 99.71 |
| RG121216-2C q | Tefra | Escorias PF negro. | Cerro Azul | 51.38 | 18.29 | 0.66 | NaN | 9.42 | NaN | 8.93 | 6.00 | 0.15 | 3.34 | 0.78 | 0.17 | 0.25 | 99.37 |
| RG121216-2D q | Lava | Lavas subglaciar craqueladas | Cerro Azul | 51.73 | 19.34 | 0.58 | NaN | 8.61 | NaN | 9.01 | 5.22 | 0.14 | 3.80 | 0.90 | 0.19 | -0.19 | 99.32 |
| RG131216-2A q | Lava | Lavas | Cerro Azul | 58.74 | 16.41 | 0.70 | NaN | 8.43 | NaN | 5.85 | 2.51 | 0.15 | 4.79 | 1.67 | 0.25 | -0.19 | 99.31 |
| RG131216-2B q | Lava | Lava porfirica | Cerro Azul | 61.75 | 16.69 | 0.61 | NaN | 6.28 | NaN | 4.59 | 1.42 | 0.14 | 5.37 | 1.96 | 0.24 | 0.37 | 99.41 |
| RG131216-2C q | Lava | Lava AA-Pahoehoe | Cerro Azul | 52.50 | 18.30 | 0.72 | NaN | 8.56 | NaN | 9.14 | 4.41 | 0.14 | 3.93 | 1.07 | 0.24 | 0.36 | 99.35 |
| RG131216-2D q | Lava | Lava andesítica 2px | Cerro Azul | 62.17 | 16.78 | 0.62 | NaN | 6.22 | NaN | 4.45 | 1.47 | 0.14 | 5.40 | 1.97 | 0.24 | 0.16 | 99.62 |
| RG131216-4 q | Lava | Cuello volcánico | Cerro Azul | 61.17 | 16.56 | 0.65 | NaN | 5.71 | NaN | 4.67 | 2.41 | 0.11 | 4.90 | 2.16 | 0.31 | 0.85 | 99.50 |
| AA160116-1A q | Lava | Lava parte superior Cerro Azul | Cerro Azul | 54.68 | 17.83 | 0.66 | NaN | 8.38 | NaN | 7.57 | 4.67 | 0.14 | 4.19 | 1.25 | 0.24 | -0.18 | 99.43 |
| FV260321-2B | Tefra | Bomba cráter Co. Colorado | Cerro Colorado | 53.71 | 17.55 | 1.11 | NaN | 8.78 | NaN | 7.95 | 4.21 | 0.16 | 3.92 | 1.33 | 0.22 | 0.58 | 99.51 |
| RG131216-1J q | Lava | Lava valle Invernada | D. Chico | 67.08 | 15.44 | 0.40 | NaN | 3.77 | NaN | 3.32 | 1.30 | 0.08 | 4.25 | 3.64 | 0.14 | 0.18 | 99.59 |
| GO060112-4 | Lava | Lava basal al E del D. Grande | D. Grande | 69.04 | 15.94 | 0.47 | NaN | 2.69 | NaN | 1.58 | 0.55 | 0.10 | 6.05 | 3.32 | 0.10 | 0.00 | 99.85 |
| GO060112-2 | Lava | Lava potente al NW del cráter | D. Grande | 68.90 | 15.95 | 0.49 | NaN | 2.75 | NaN | 1.65 | 0.61 | 0.10 | 5.99 | 3.18 | 0.11 | 0.10 | 99.84 |
| FV291120-5 | Lava | Lava basal glaciada | D. Grande | 55.35 | 18.20 | 0.87 | NaN | 7.54 | NaN | 8.40 | 3.27 | 0.14 | 1.20 | 4.64 | 0.31 | -0.21 | 99.70 |
| FV291120-4 | Lava | Depósito glacial con lavas antiguas | D. Grande | 53.53 | 19.52 | 0.96 | NaN | 8.01 | NaN | 8.59 | 3.38 | 0.14 | 1.12 | 4.32 | 0.20 | 0.11 | 99.88 |
| FV271120-2B | Lava | Lava basal glaciada | D. Grande | 57.15 | 18.17 | 1.02 | NaN | 7.51 | NaN | 6.62 | 2.15 | 0.14 | 1.59 | 5.23 | 0.22 | 0.08 | 99.88 |
| FV271120-1G | Tefra | Escorias juveniles en Pf al Este del D. Grande | D. Grande | 57.49 | 16.72 | 0.88 | NaN | 6.64 | NaN | 7.03 | 3.41 | 0.14 | 1.60 | 4.63 | 0.22 | 0.87 | 99.64 |
| FV271120-1D | Tefra | Ceniza, matriz escoracea del PF al Este del D. Grande | D. Grande | 54.63 | 17.47 | 0.91 | NaN | 7.71 | NaN | 8.42 | 4.20 | 0.14 | 1.23 | 3.95 | 0.18 | 0.86 | 99.70 |
| DCD-112 | Lava | Andesita basáltica de ol gris oscuro | D. Grande | 57.48 | 17.85 | 0.81 | NaN | 6.56 | NaN | 7.60 | 3.97 | 0.12 | 4.05 | 1.30 | 0.27 | 0.04 | 100.06 |
| DCD-113 | Lava | Andesita basáltica de cpx color esmeralda con ol | D. Grande | 57.33 | 17.69 | 0.84 | NaN | 6.73 | NaN | 7.34 | 3.78 | 0.12 | 4.19 | 1.34 | 0.25 | -0.05 | 99.56 |
| RG131219-2D | Lava | Domo Estero del volcán | Domo Estero | 67.28 | 15.88 | 0.62 | NaN | 3.54 | NaN | 2.50 | 0.45 | 0.10 | 6.03 | 2.81 | 0.20 | 0.17 | 99.59 |
| DCD-106 | Lava | Domo con disyunción columnar | Domo Guamparo | 63.31 | 15.49 | 0.68 | NaN | 5.05 | NaN | 4.12 | 1.91 | 0.07 | 3.91 | 4.02 | 0.15 | 0.88 | 99.60 |
| DCD-107 | Lava | Domo andesítico-basáltico de cpx | Domo Guamparo | 56.22 | 16.19 | 1.09 | NaN | 9.24 | NaN | 7.43 | 3.84 | 0.16 | 4.10 | 1.38 | 0.25 | -0.15 | 99.75 |
| FV260321-3B | Lava | Lava Domo Torta | Domo Torta | 68.48 | 17.53 | 0.37 | NaN | 2.34 | NaN | 1.17 | 0.21 | 0.10 | 5.85 | 3.34 | 0.06 | 0.24 | 99.69 |
| AMI RG-131217-1E | Tefra | Escorias angulosas bien seleccionadas tamaño lapilli | Hornitos | 51.71 | 14.37 | 0.67 | NaN | 8.10 | NaN | 9.01 | 12.35 | 0.15 | 2.38 | 0.68 | 0.13 | 0.00 | 99.55 |
| AMI RG-131217-1LV | Tefra | Escorias hornitos | Hornitos | 51.26 | 14.18 | 0.64 | NaN | 8.14 | NaN | 9.14 | 12.71 | 0.15 | 2.28 | 0.65 | 0.12 | 0.00 | 99.25 |
| AMI RG-131217-1LD | Tefra | Escorias hornitos | Hornitos | 51.50 | 14.07 | 0.64 | NaN | 8.05 | NaN | 9.16 | 12.91 | 0.15 | 2.26 | 0.65 | 0.12 | 0.00 | 99.51 |
| RG030217-2A | Tefra | Escoria poco vesiculares angulosas | Hornitos | 52.52 | 15.63 | 0.65 | NaN | 8.64 | NaN | 8.02 | 10.72 | 0.15 | 2.42 | 0.93 | 0.12 | -0.11 | 99.69 |

Anexo 2. Datos totales y referencia. Separado en base a cada centro eruptivo.

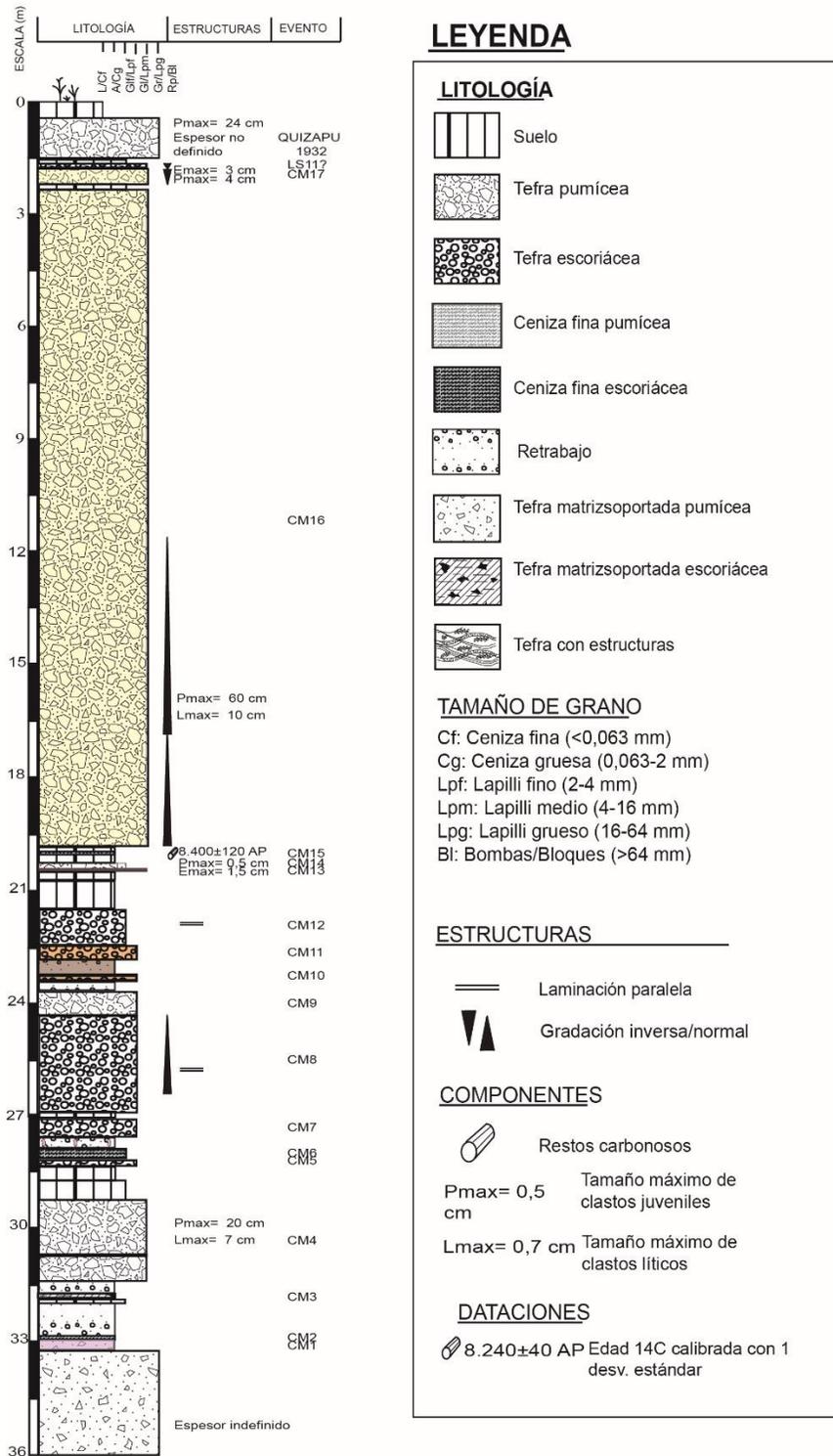
| | Hildreth, 1992 | Naranjo, 2021 | Grunder, 1988 | Higgins, 2015 | Ruprecht, 2012 | SERNA- GEOMIN | Total |
|-----------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|-------|
| Alto Las Mulas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 |
| Cerro Azul | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 12 |
| Cerro Colorado | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| D. Chico | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| D. Grande | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 |
| Domo Estero | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Domo Guamparo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| Domo Torta | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Hornitos | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 9 | 15 |
| Loma Seca | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 | 1 | 10 |
| Mondaca | 0 | 6 | 0 | 0 | 2 | 6 | 14 |
| No identificado | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 | 80 |
| Quizapu | 22 | 0 | 0 | 25 | 49 | 1 | 97 |
| Resolana | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 4 |
| Total | 22 | 6 | 9 | 25 | 60 | 128 | |

Anexo 3. Valores faltantes de cada proveniencia en base a los elementos. Ingresar a datos faltantes para ver la tabla en su totalidad.

| Proveniencia | Total | SiO2 | Al2O3 | TiO2 | FeO | Fe2O3 | FeOT |
|-----------------|-------|------|-------|------|-----|-------|------|
| Alto Las Mulas | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| Cerro Azul | 12 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 |
| Cerro Colorado | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| D. Chico | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| D. Grande | 9 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 |
| Domo Estero | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Domo Guamparo | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| Domo Torta | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Hornitos | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 6 | 0 |
| Loma Seca | 10 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Mondaca | 14 | 0 | 0 | 0 | 14 | 2 | 0 |
| No identificado | 80 | 0 | 0 | 0 | 80 | 0 | 0 |
| Quizapu | 97 | 0 | 0 | 0 | 97 | 71 | 0 |
| Resolana | 4 | 0 | 0 | 0 | 4 | 3 | 0 |

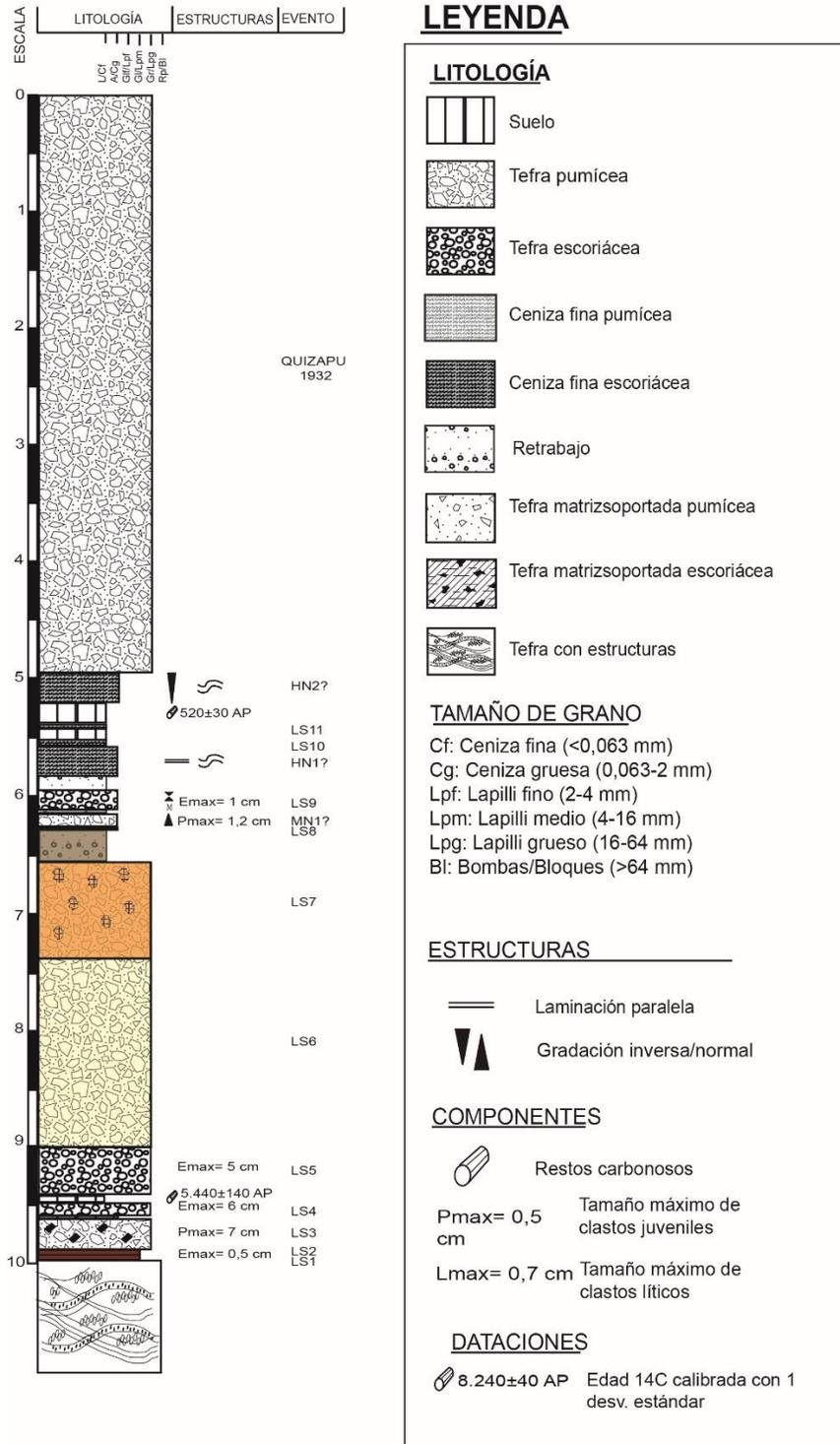
Anexo 4. Columna estratigráfica Cerro Monsalve. Se ilustra la distribución de los depósitos y el código al evento que los generó.

Columna Estratigráfica Cerro Monsalve
(355.212E / 6.050.284N)



Anexo 5. Columna estratigráfica Loma Seca. Se ilustra la distribución de los depósitos y el código al evento que los generó.

Columna Estratigráfica Loma Seca (349.982E / 6.051.500N)



Anexo 6. Metodología de preprocesamiento de datos. Para más detalle descargar archivo en [preprocesamiento para visualización completa](#).

Preprocesamiento de Datos

El preprocesamiento es el primer paso esencial para trabajar con los datos en una base de datos. Su objetivo es mejorar la calidad de los datos para evitar errores futuros y asegurar su óptima utilización.

Para llevar a cabo el preprocesamiento de datos, se utiliza la biblioteca Geochem. Para importar esta biblioteca, es necesario identificar la dirección de la carpeta dentro del computador en el que se está trabajando.

```
[1]: # Se importa La Librería Geochem que está en una ubicación específica en el sistema
import sys
sys.path.append("C:\\Users\\nicoo\\OneDrive\\Documents\\Memoria\\Geochem3\\geochem")
```

Luego de importar la librería, es necesario importar los módulos provenientes de esta librería.

- El módulo *plt* está relacionado con el trabajo y visualización de datos. Este módulo ofrece la opción de realizar diferentes diagramas de descripción geoquímica. Además, proporciona funcionalidades para el preprocesamiento de bases de datos.
- El módulo *coda* proporciona funcionalidades adicionales para el análisis o procesamiento de datos geoquímicos. Entre estas se encuentra la transformación de datos composicionales.

```
[3]: #Importamos Los módulos de La Librería Geochem
import geochem.plt as gc
import geochem.coda as coda
```

Anexo 7. Metodología de descripción geoquímica. Para más detalle descargar archivo en [descripción geoquímica](#) para visualización completa.

Diagramas de Descripción Geoquímica

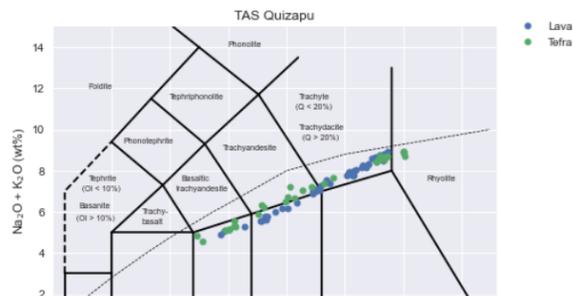
Los diagramas de descripción geoquímica son herramientas utilizadas en geología para clasificar y comparar las composiciones químicas de las rocas, especialmente las ígneas. Estos diagramas permiten interpretar los procesos de formación y evolución y entender mejor la dinámica de la corteza terrestre.

Diagrama TAS (Total Alkali-Silica):

El diagrama TAS se utiliza para clasificar las rocas ígneas volcánicas basándose en su contenido de álcalis totales ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) y sílice (SiO_2).

Para realizar este diagrama se utiliza la librería *Geochem*, específicamente la función *gc.TAS* la cual genera el diagrama calculando los parámetros de manera automática. La función acepta un DataFrame de pandas como entrada, que debe contener los datos químicos de las muestras de roca. La función también permite personalización a través de los diccionarios *fmt* y *opt*. El diccionario *fmt* controla el formato visual del diagrama, como el título, si se abrevian los nombres de las categorías de rocas, el estilo y tamaño de los marcadores, etc. Por otro lado, el diccionario *opt* maneja el comportamiento y procedimiento por defecto de la función, como si se debe aplicar una normalización previa y si se deben omitir valores faltantes.

```
[8]: gc.TAS(df_quizapu, fmt={'title':'TAS Quizapu', 'abbrev': False, 'groupby':'Tipo_Depósito'})
```



Anexo 8. Metodología para el análisis multivariable. Para más detalle descargar archivo en [análisis multivariable](#) para visualización completa.

Analisis multivariable

Para el analisis multivariable se utiliza los datos transformados en `clr`, para trabajar con variables independientes y no haya ninguna confusión al momento de la interpretación de datos

Pairplot

Es una herramienta gráfica que permite visualizar las relaciones entre todas las posibles combinaciones de pares de variables en un conjunto de datos. Se representa en una matriz de gráficos de dispersión, donde cada celda muestra un gráfico de dispersión de dos variables diferentes. Esto facilita la identificación de tendencias y correlaciones entre las variables.

Mediante la librería *Seaborn* con la función `sns.pairplot` se puede generar un pairplot a partir de un DataFrame.

```
[18]: # Define tu paleta de colores personalizada
colores_personalizados = ["#FF0000", "#000080", "#006400", "#FFFF00", "#FFA500", "#00FF00", "#40E0D0", "#A52A2A", "#ADD8E6",
"#D3D3D3", "#FFC0CB", "#800080", "#8B0000", "#000000", "#c49c94"]

# Obtén el número de categorías únicas en la variable "Origin"
num_categorias = df_mayor_clr['Proveniencia'].nunique()

# Generate the palette
paleta_ciclica = colores_personalizados * (num_categorias // len(colores_personalizados)) + colores_personalizados[:num_categorias % len(colores_personalizados)]

# Now create the pairplot
sns.pairplot(df_mayor_clr, hue='Proveniencia', height=1, palette=paleta_ciclica)
```

Anexo 9. Metodología para el aprendizaje automático supervisado. Para más detalle descargar archivo en [aprendizaje automático supervisado para visualización completa.](#)

Aprendizaje Automático Supervisado

El aprendizaje automático supervisado es una rama del aprendizaje automático que se centra en construir modelos capaces de aprender a partir de un conjunto de datos etiquetados. En este caso se proporciona al algoritmo un conjunto de ejemplos de entrada junto con las salidas correspondientes (las etiquetas), y el objetivo es que el modelo aprenda a predecir la salida correcta para nuevas entradas no vistas previamente. Este proceso implica el ajuste de los parámetros del modelo a través de un proceso de entrenamiento, donde el modelo intenta minimizar el error entre sus predicciones y las salidas reales. El aprendizaje automático supervisado se utiliza en una variedad de aplicaciones, como la clasificación y la regresión.

Para la ejecución de las diferentes herramientas de aprendizaje automático supervisado se utiliza el mismo preprocesamiento, comenzando con la generación de nuevas muestras para las clases minoritarias y evitar un desbalanceo en el modelo. Para luego los datos ser normalizados y transformados.

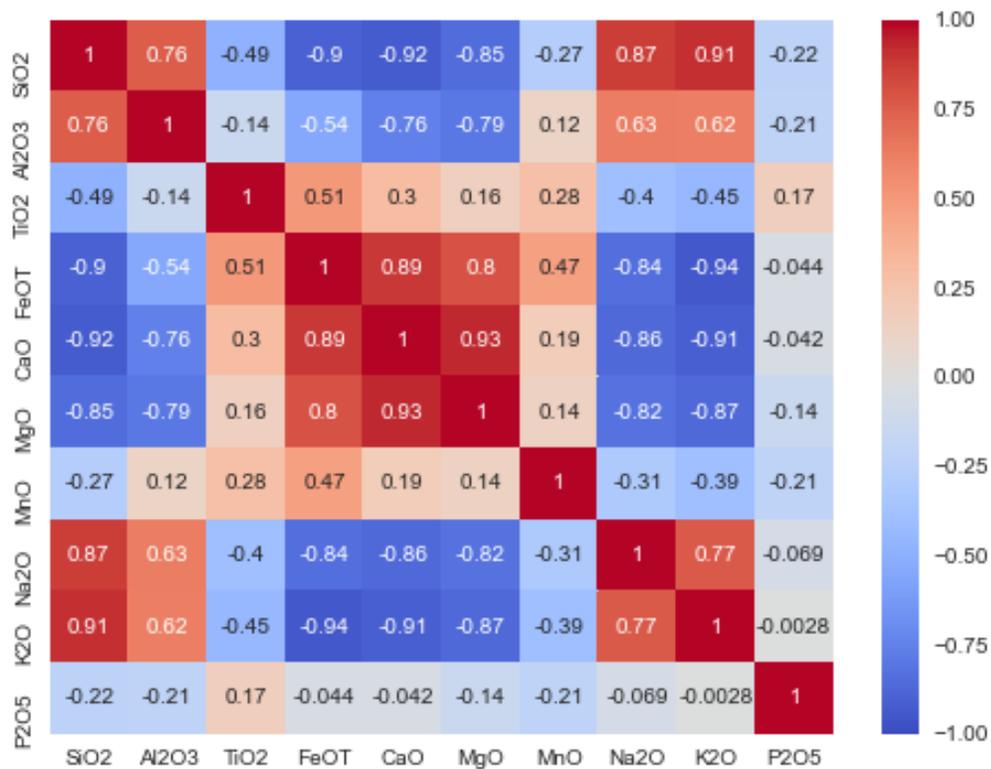
Ya con el preprocesamiento listo, antes de realizar el modelo se comienza con una división de los conjuntos de entrada 'X' y los conjuntos de salida 'y' que corresponden a las etiquetas, para este estudio las etiquetas son la proveniencia de cada muestra. Para esto se utiliza la librería *pandas* donde se seleccionan las columnas que se desea en cada nueva variable.

```
[18]: # Se separaron las columnas en base a características (X) y etiquetas (y)

X = df_mayor[['SiO2', 'Al2O3', 'TiO2', 'FeO', 'CaO', 'MgO', 'MnO', 'Na2O', 'K2O',
'P2O5']]
y = df_mayor['Proveniencia']
```

Con las variables de salida y entrada ya seleccionadas. Se dividen los datos en conjuntos de entrenamiento y de prueba. Para esto se utiliza la librería *Scikit-learn*, específicamente la función `train_test_split`. La función divide estos datos en `X_train` y `X_test` (los subconjuntos de características para entrenamiento y prueba, respectivamente) y en `y_train` y `y_test` (los subconjuntos de etiquetas correspondientes). El parámetro `test_size=0.3` indica que el 30% del conjunto de datos se asignará al conjunto de prueba, mientras que el 70% restante se usará para el conjunto de entrenamiento. El parámetro `random_state=None` significa que la división de los datos se hará de manera aleatoria, lo que implica que cada ejecución del código podría resultar en una división diferente de los datos.

```
[23]: # test_size indica la proporción de datos que se utilizarán
# random_state se establece para garantizar reproducibilidad.
```



Anexo 10. Influencia de variables en elementos mayores. En base al análisis de componentes principales en elementos mayores.

| | Factor 1 | Factor 2 |
|-------|----------|----------|
| SiO2 | 0.23 | -0.19 |
| Al2O3 | 0.11 | 0.10 |
| TiO2 | -0.05 | 0.35 |
| FeOT | -0.21 | 0.19 |
| CaO | -0.36 | -0.07 |
| MgO | -0.57 | -0.59 |
| MnO | -0.04 | 0.18 |
| Na2O | 0.29 | -0.04 |
| K2O | 0.59 | -0.42 |
| P2O5 | 0.01 | 0.48 |

Anexo 11. Influencia de variables en elementos trazas. En base al análisis de componentes principales en elementos trazas.

| | Factor 1 | Factor 2 | | Factor 1 | Factor 2 |
|----|----------|----------|----|----------|----------|
| Cu | -0.40 | -0.17 | Ba | 0.17 | -0.05 |
| V | -0.35 | -0.33 | Sc | -0.19 | -0.27 |
| Ni | -0.52 | 0.77 | Th | 0.26 | 0.14 |
| Zn | -0.05 | -0.12 | La | 0.13 | -0.05 |
| Rb | 0.30 | 0.17 | Ce | 0.12 | -0.05 |
| Sr | -0.19 | -0.19 | Nd | 0.09 | -0.07 |
| Zr | 0.18 | -0.11 | Y | 0.25 | 0.29 |
| Nb | 0.20 | 0.03 | | | |

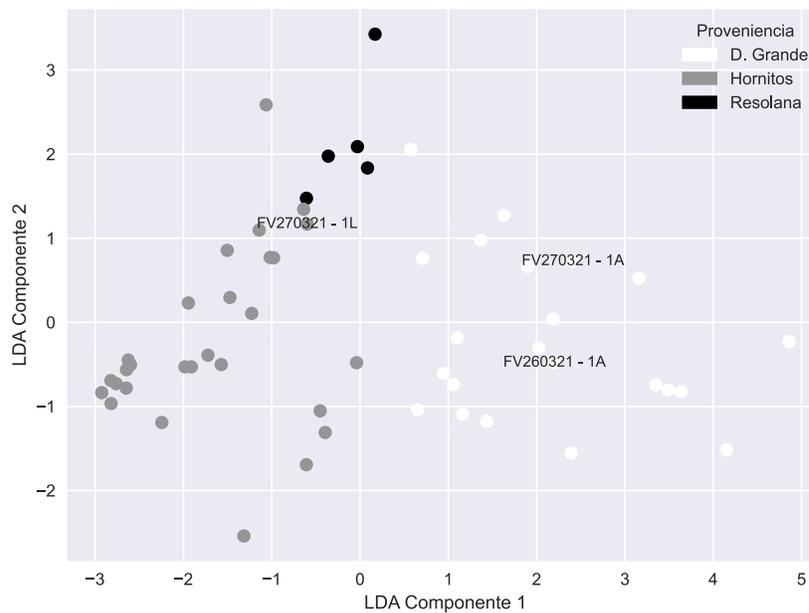
Anexo 12. Resultados entregados por el modelo de discriminación. Para ver tabla completa ingresar a [resultados del modelo](#).

| Muestra | Proveniencia |
|-------------------|---------------------|
| AMI RG-131217-1E | Hornitos |
| AMI RG-131217-1LV | Hornitos |
| AMI RG-131217-1LD | Hornitos |
| AMI RG-151217-1E | Resolana |
| AMI RG-151217-1G | Quizapu |
| AMI RG-151217-1H | Quizapu |
| AMI RG-151217-1I | Hornitos |
| AMI RG-151217-1K | Quizapu |
| AMI RG-151217-1L | Hornitos |
| AMI RG-160218-3B | Hornitos |

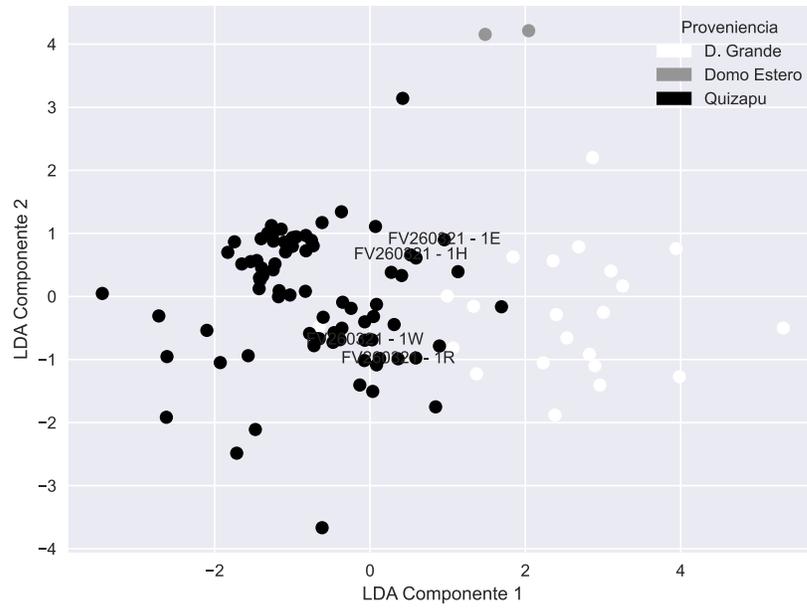
| | |
|------------------|------------|
| AMI RG-160218-3D | Quizapu |
| AA130117-1Aq | Quizapu |
| AA130117-1Bq | Quizapu |
| AA130117-1Cq | Quizapu |
| AA140117-1Cq | Cerro Azul |

Anexo 13. Análisis discriminante lineal para las muestras que no coinciden con las proveniencias. En relación con Vera et al. (2022). para los distintos casos.

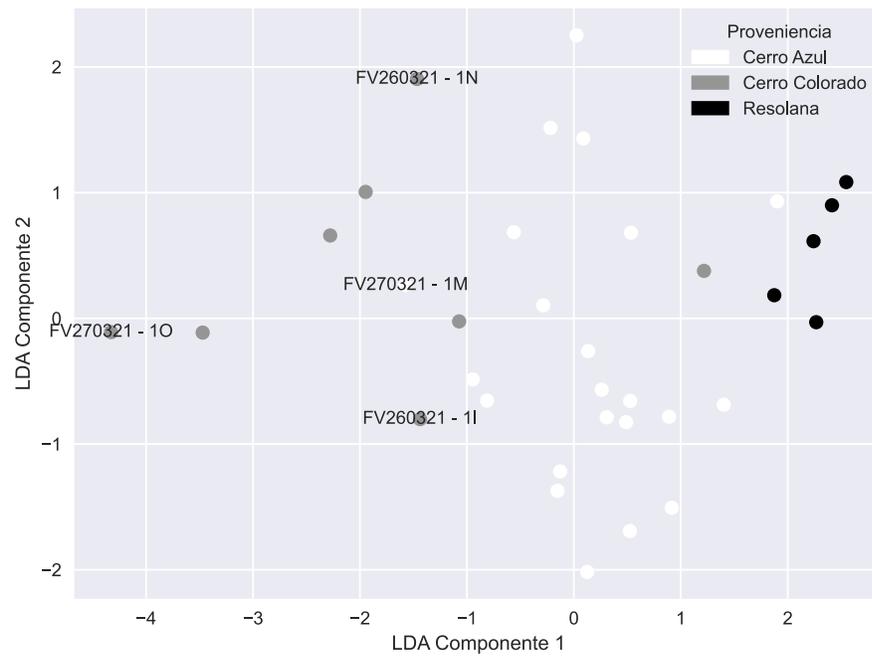
- Caso 1: Hornitos, Resolana y Descabezado Grande.



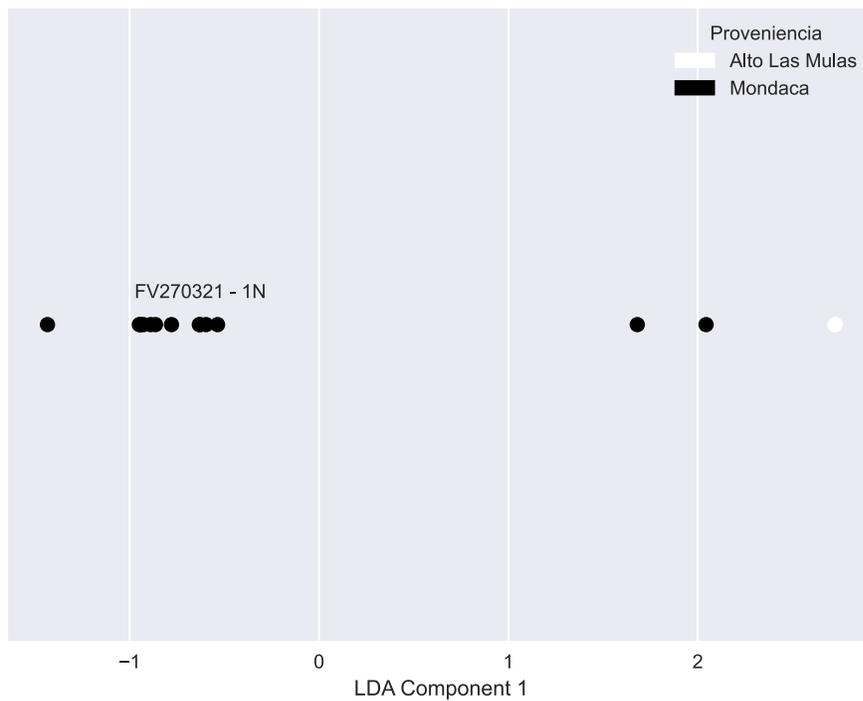
- Caso 2: Domo Estero, Quizapu y Descabezado Grande.



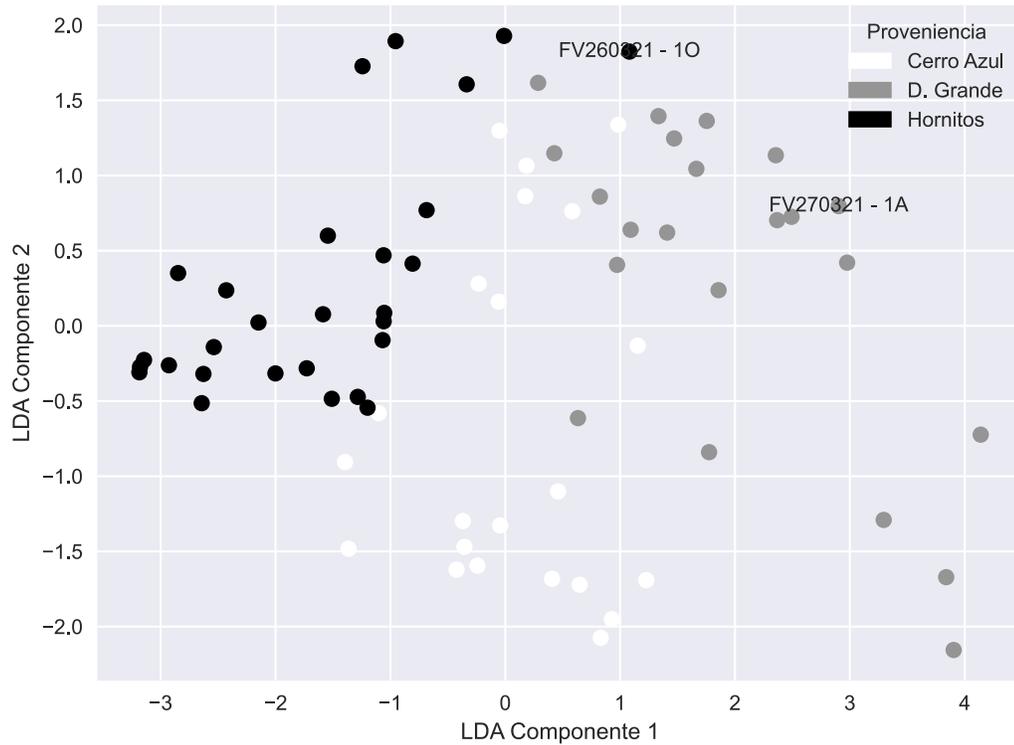
- Caso 3: Cerro Azul, Resolana y Cerro Colorado.



- Caso 4: Ato las Mulas y Mondaca.



- Caso 5: Cerro Azul, Descabezado Grande y Hornitos.



Anexo 14. Importancia de las variables para los análisis discriminantes lineal (LDA) en los distintos casos.

- Caso 1: Hornitos, Resolana y Descabezado Grande.

| Discriminante 1: | Discriminante 2: |
|---------------------------|---------------------------|
| Nd: -1.918 | Nd: -7.718 |
| SiO ₂ : -1.371 | SiO ₂ : -6.669 |
| MnO: -2.154 | MnO: -2.236 |
| Zn: 2.238 | Zn: -1.842 |
| Ce: 2.341 | Ce: 6.074 |
| La: 2.163 | La: 1.662 |
| Cu: -0.703 | Cu: -0.424 |

- Caso 2: Domo Estero, Quizapu y Descabezado Grande.

| Discriminante 1: | Discriminante 2: |
|--|---|
| MgO: -0.429 | MgO: -3.865 |
| Zr: -0.485 | Zr: 0.266 |
| MnO: 1.535 | MnO: 0.480 |
| Zn: 1.991 | Zn: 0.366 |
| CaO: 1.408 | CaO: 3.441 |
| La: 1.040 | La: 0.201 |
| Al ₂ O ₃ : 1.993 | Al ₂ O ₃ : -7.197 |
| P ₂ O ₅ : 1.846 | P ₂ O ₅ : 1.504 |

- Caso 3: Cerro Azul, Resolana y Cerro Colorado.

| Discriminante 1: | Discriminante 2: |
|-------------------------|--------------------------|
| Sc: 1.040 | Sc: -0.431 |
| Sr: 7.029 | Sr: 6.672 |
| K ₂ O: 4.732 | K ₂ O: -0.036 |
| Ba: -2.500 | Ba: 0.152 |

- Caso 4: Ato las Mulas y Mondaca.

| Discriminante 1: |
|---|
| Zn: -1.975 |
| La: 3.842 |
| Ce: 0.238 |
| MnO: 3.246 |
| Al ₂ O ₃ : -3.517 |
| SiO ₂ : -0.719 |

- Caso 5: Cerro Azul, Descabezado Grande y Hornitos.

| Discriminante 1: | Discriminante 2: |
|--------------------------|--------------------------|
| Ce: 4.674 | Ce: -2.044 |
| TiO ₂ : 0.586 | TiO ₂ : 3.208 |
| Ni: 0.190 | Ni: -0.130 |
| Sc: -0.590 | Sc: -0.580 |