



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



**LITOESTRATIGRAFÍA, GEOCROLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE
IGNIMBRITAS NEÓGENAS Y CUATERNARIAS EN LOS
CAÑONES OCOÑA-COTAHUASI-MARÁN. IMPLICANCIAS EN
ESTRATIGRAFÍA VOLCÁNICA DEL SUR DE PERÚ.**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. SHELYDA CRISH CCAMA MACHACA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

*A Dios, porque me dió fortaleza,
confianza y valor.*

*A mis padres Hilaria y Jesús,
quienes con mucha paciencia me
apoyaron en mis estudios.*

*A mis hermanos Oliver, Rosel y
Edmer.*

Shelyda Ccama



AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos al Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), que a través de la beca Movilidad Sur-Norte, ha financiado los estudios y análisis de laboratorio. Así también, mis agradecimientos al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET), que ha financiado las salidas de campo. De igual manera, mis agradecimientos a mi alma máter, la Universidad Nacional del Altiplano de Puno y a mis docentes quienes compartieron sus conocimientos en mis años de estudio.

Quiero agradecer profundamente al Dr. Jean-Claude Thouret, por sus consejos y dirección de este proyecto de investigación. A Jean-Louis Paquette, por compartir sus conocimientos, en cuanto al análisis e interpretación de datos geocronológicos. A Pierre Boivin por sus consejos y guía en los estudios petromineralógicos de secciones delgadas. A Etienne Médard, por su asesoramiento en el procesamiento de datos geoquímicos. De la misma manera, agradecer a John Cervantes y Maryuri Nole por sus comentarios y guía durante los trabajos de campo. Agradecer también a mi docente y asesor Ing. Miguel Calcina por sus comentarios y guía durante este proyecto.

Así mismo, agradecer a Constantin Christophe del Laboratorio de Magmas y Volcanes (LMV) quien realizó las secciones delgadas de rocas. Mi reconocimiento también a Claire Fronquernie, quien hizo la separación de cristales de circón y preparó muestras para el análisis químico. Finalmente mi reconocimiento a Mhammed Benbakkar, quien hizo el análisis de elementos mayores en el LMV.

Shelyda Ccama



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 13

ABSTRACT..... 14

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES 15

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 19

1.3. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN 23

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. TERMINOLOGÍA GENERAL 24

2.1.1. Corrientes Densas de Piroclastos (CDP) 24

2.1.2. Grado de soldadura en ignimbritas 27

2.1.3. Unidades de flujo y de enfriamiento en ignimbritas..... 28

2.1.4. Zonas de cristalización tardía en ignimbritas 29

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN..... 31

3.2. TRABAJOS DE CAMPO Y OBSERVACIONES 32

3.2.1. Estudio de afloramientos 32



3.3. TRABAJO ANALÍTICO DE LABORATORIO.....	33
3.3.1. Estudio litológico, petrológico y microscópico de muestras	33
3.3.2. Geocronología basada en el método U-Pb.....	34
3.3.3. Datación de circones con el método U-Pb.....	39
3.3.4. Métodos de análisis geoquímicos y mineralógicos.....	45

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. MARCO GEOGRÁFICO	51
4.1.1. Ubicación del área de estudio	51
4.1.2. Accesibilidad al área de estudio.....	53
4.2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	53
4.2.1. Vulcanismo Neógeno y Cuaternario en la región de Ocoña-Cotahuasi-Maran (OCM).....	56

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. LITOESTRATIGRAFÍA EN EL NORTE DE LA REGIÓN OCM	63
5.1.1. Estratigrafía y cronoestratigrafía	63
5.1.2. Litofacies, petrografía y petrología de ignimbritas y depósitos de CDP ..	95
5.2 GEOCRONOLOGÍA U-Pb.....	124
5.2.1. Nuevas edades U-Pb	124
5.2.2. Diagramas Tera – Wasserburg (T-W) de ignimbritas en la región OCM	125
5.3. GEOQUÍMICA	131
5.3.1. Elementos mayores	131
5.3.2. Química mineral	135
5.4. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIONES	140
5.4.1. Correlación de ignimbritas y depósitos de CDP en la región de los cañones de OCM y en el sur del Perú.....	141



5.4.2.	Recurrencia de erupciones de ignimbritas y depósitos de CDP	143
5.4.3.	Geoquímica de las ignimbritas y depósitos de CDP en la región OCM y en la ZVC.....	145
VI.	CONCLUSIONES	146
VII.	RECOMENDACIONES	148
VIII.	REFERENCIAS	149
ANEXOS.....		159

Área: Ingeniería Geológica.

Línea: Geología Regional.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 14 de enero de 2022



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Trabajo de Campo y Recolección de Muestras -----	32
Figura 2. Análisis Macroscópico de Muestras de Mano -----	33
Figura 3. Análisis Microscópico de Secciones Delgadas -----	34
Figura 4. Cadenas de desintegración de U-Th-Pb -----	35
Figura 5. Ecuaciones Isócronas Utilizadas en el Método de Datación U-Th-Pb -----	35
Figura 6. Equipo de LA-ICP-MS-----	37
Figura 7. Configuración Esquemática del Instrumento ICP-MS con Sector Magnético -----	38
Figura 8. Diagrama Tera–Wasserburg (T–W)-----	39
Figura 9. Proceso de Corte y Trituración de Muestras -----	40
Figura 10. Separación de Minerales Pesados por Gravedad-----	41
Figura 11. Separación Magnética de Minerales -----	42
Figura 12. Separación por Densidad con Líquidos Pesados -----	43
Figura 13. Selección de Cristales de Circón para Datación -----	44
Figura 14. Preparación de Discos Epoxi conteniendo Circones -----	44
Figura 15. Equipo de Análisis de Microsonda Electrónica (EPMA)-----	45
Figura 16. Análisis de Componentes con EPMA -----	47
Figura 17. Preparación de Muestras para Análisis de Elementos Mayores -----	48
Figura 18. Equipos para Análisis de Elementos Mayores -----	49
Figura 19. Proceso de Disolución de Muestras por Fusión Alcalina-----	50
Figura 20. Ubicación Geográfica del Proyecto-----	51
Figura 21. Imagen Satelital del Área de Estudio-----	52
Figura 22. Estratigrafía Generalizada de las Áreas de Cotahuasi y Chuquibamba-----	55
Figura 23. Estratigrafía de la Región OCM-----	56
Figura 24. Estratigrafía del Área Coracora-Pacapausa -----	58



Figura 25. Ubicación de Columnas Estratigráficas y Principales Poblados en el Norte de la Región OCM -----	64
Figura 26. Afloramiento de las Ignimbritas Alpabamba -----	65
Figura 27. Afloramientos de las Ignimbritas Chuquibamba-----	68
Figura 28. Columna Estratigráfica de la Sección de SJA -----	69
Figura 29. Columna Estratigráfica de la Sección Corculla - Charcana -----	70
Figura 30. Afloramientos de las Ignimbritas Huarcaya -----	72
Figura 31. Afloramientos de las Ignimbritas Caraveli -----	74
Figura 32. Columna Estratigráfica de la Sección de Salamanca-----	75
Figura 33. Afloramientos de los depósitos CDP Arma -----	77
Figura 34. Secuencias Estratigráficas en el SE del Río Arma-----	78
Figura 35. Afloramientos de las Ignimbritas Sencca en las Secciones SJA y Corculla – Charcana -----	83
Figura 36. Afloramientos de las Ignimbritas Sencca en las Secciones de Huaynacotas y Pampamarca -----	84
Figura 37. Afloramientos de las Ignimbritas Sencca en la Sección Cotahuasi-Quillumsa -----	85
Figura 38. Afloramientos de las Ignimbritas Sencca en la Sección Salamanca -----	86
Figura 39. Columna Estratigráfica de la Sección de Pampamarca -----	87
Figura 40. Columna Estratigráfica de la Sección Huaynacotas -----	88
Figura 41. Columna Estratigráfica de la Sección Cotahuasi - Quillumsa -----	89
Figura 42. Columna Estratigráfica de la Sección Chigchipampa - Pomacocha -----	90
Figura 43. Afloramientos de las Ignimbritas Lomas -----	92
Figura 44. Afloramientos de los Depósitos CDP Capilla -----	94
Figura 45. Litofacies de las Ignimbritas Alpabamba -----	97
Figura 46. Litofacies de las Ignimbritas Chuquibamba -----	101
Figura 47. Litofacies de las Ignimbritas Huarcaya -----	103
Figura 48. Litofacies de las Ignimbritas Caraveli -----	105
Figura 49. Litofacies de las Ignimbritas Sencca Inferior -----	109



Figura 50. Litofacies de las Ignimbritas Sencca Superior -----	113
Figura 51. Litofacies de las Ignimbritas Lomas -----	114
Figura 52. Litofacies de los Depósitos CDP Capilla -----	116
Figura 53. Diagramas Tera-Wasserburg de Muestras de Ignimbritas-----	129
Figura 54. Diagrama TAS para Clasificación de Rocas Volcánicas -----	131
Figura 55. Diagrama K ₂ O vs SiO ₂ para Clasificación de Rocas Sub-alcaldas -----	132
Figura 56. Diagramas de Variación Harker para Ignimbritas y depósitos de CDP en el Norte de la Región OCM -----	134
Figura 57. Clasificación y Nomenclatura de Cristales de Tres Ignimbritas en el Norte de la Región OCM -----	137
Figura 58. Composición de los Cristales de Biotitas de Tres Ignimbritas en el Norte de la Región OCM -----	138
Figura 59. Nomenclatura de Anfíboles de Tres Ignimbritas en el Norte de la Región OCM -----	139
Figura 60. Secuencia Estratigráfica Generalizada del Cañón de Cotahuasi, Vista al NW -----	140
Figura 61. Estratigrafía de Ignimbritas y depósitos de CDP en el norte de la Región OCM, y Correlación con Unidades a lo Largo del Piedemonte Pacífico, áreas de Arequipa, Ayacucho y en el Sur del Perú-----	144



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de Intensidad de Soldadura Según Características Petrográficas	27
Tabla 2. Etapas de Trabajo.....	31
Tabla 3. Accesibilidad al Área de Estudio.....	53
Tabla 4. Texturas y Principales Características de las Ignimbritas en la Región OCM	117
Tabla 5. Texturas y Características del Componente Juvenil (pómez y vidrio) en Muestras de Ignimbritas.....	120
Tabla 6. Texturas y Características de los Componentes Cristalinos y Líticos en Muestras de Ignimbritas	122
Tabla 7. Edades U-Pb de Ignimbritas en la Región OCM.....	124



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

anf: anfíbol

ASFE: Annite-Siderofilita-Flogopita-Eastonita

bt: biotita

cb: carbonatos

CDP: Corrientes Densas de Piroclastos

et. al.: y otros

etc.: etcétera

EPMA: Microanalizador de sonda de electrones ó Microsonda electrónica

Fd: feldespatos

ICP-AES: Espectrómetro de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente

i.e.: esto es

INGEMMET: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico

LA-ICP-MS: Espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente con ablación láser

Ma: Millones de años

Nm-al: Ignimbritas Alfabamba

Nm-ar: CDP Arma

Nm-ca: Ignimbritas Caraveli

Nm-chu: Ignimbritas Chuquibamba

Nm-hu: Ignimbritas Huarcaya

Np-se: Ignimbritas Sencca inferior

OCM: Ocoña – Cotahuasi – Maran

ox: óxidos



p. ej.: por ejemplo

plg: plagioclasa

px: piroxeno

qz: cuarzo

Qp-ca: CDP capilla

Qp-lo: Ignimbritas Lomas

Qp-se: Ignimbritas Sencca superior

SJA: San Javier de Alpbamba

TAS: Diagrama de álcalis totales vs sílice

T-W: Diagrama Tera - Wasserburg

U-Pb: Uranio – Plomo

zeo: zeolita

ZVC: Zona Volcánica Central



RESUMEN

El área de estudio abarca el norte del territorio de los cañones de Ocoña-Cotahuasi-Maran (OCM), que ocupan los departamentos de Arequipa y Ayacucho en el sur del Perú, entre la Cordillera Occidental y el Altiplano. El presente trabajo se centra en la caracterización de la litoestratigrafía, geocronología y geoquímica de rocas volcánicas explosivas (principalmente ignimbritas), para contribuir al entendimiento del vulcanismo explosivo en el sur del Perú. La metodología consistió en el mapeo de rocas volcánicas, análisis de litofacies de rocas en muestras de mano y en secciones delgadas. Posteriormente, se ha obtenido edades de cristales de circón con el método de datación U-Pb empleando LA-ICP-MS. Así mismo, se ha realizado la geoquímica de elementos mayores y la química mineral en muestras de ignimbritas, empleando los equipos de ICP-AES y EPMA. Con los resultados de los análisis de litofacies y los datos geocronológicos, se ha identificado y definido siete capas de ignimbritas (Alpabamba, Chuquibamba, Huarcaya, Caravelí, Sencca inferior, Sencca superior, Lomas) y dos depósitos de Corrientes Densas de Piroclastos (CDP) (Arma y Capilla). Las edades U-Pb obtenidas para las diversas capas de ignimbritas y los depósitos de CDP, abarcan edades desde el Mioceno (19 Ma) hasta el Pleistoceno (1.6 Ma). Además, la existencia de cristales de circón heredados en muestras de las Ignimbritas Alpabamba y Chuquibamba, muestran que la actividad volcánica explosiva en el norte de la región OCM, inició hace al menos 26 Ma. Geoquímicamente, el vulcanismo en la región OCM es principalmente de características de alto-K (calco-alcalino) y está relacionado a procesos de cristalización fraccionada. Así mismo, las rocas analizadas son principalmente de composiciones riolíticas con variaciones de dacitas-riolitas y traquidacitas-riolitas. Finalmente, en base a los resultados obtenidos se ha logrado redefinir la litoestratigrafía volcánica explosiva del Neógeno y Cuaternario en el norte de la región OCM.

Palabras clave: Litoestratigrafía, Ignimbritas, Geocronología, Geoquímica, Neógeno-Cuaternario.



ABSTRACT

The study area is located in the territory of the Ocoña-Cotahuasi-Maran canyons (OCM) that straddle the departments of Arequipa and Ayacucho in southern Peru, between the Western Cordillera and the Altiplano. The present research work focuses on the characterization of the lithostratigraphy, geochronology and geochemistry of explosive volcanic rocks (mainly ignimbrites), for contribute to the understanding of explosive volcanism in southern Peru. The methodology has consisted in mapping of volcanic rocks, the analysis of lithofacies in hand samples and in thin sections of rocks. Then, ages of crystals of zircon have obtained with the U-Pb dating method, using LA-IPC-MS. Likewise, the geochemistry of major elements and mineral chemistry have carried out on ignimbrite samples, using the equipment ICP-AES and EPMA. With the results of the lithofacies analysis and the geochronological data, have identified and described seven layers of ignimbrites (Alpabamba, Chuquibamba, Huarcaya, Caravelí, Sencca inferior, Sencca superior, Lomas) and two deposits of of Piroclastic Density Currents (PDC) (Arma and Capilla). The U-Pb ages obtained for the variety of Ignimbrite sheets and PDCs deposits, encompasses ages from Miocene as 19 Ma to Pleistocene ages as 1.6 Ma. Furthermore, the existence of inherited crystals of zircon in samples of the Alpabamba and Chuquibamba Ignimbrites, demonstrate that the explosive volcanic activity in the OCM region began at least 26 Ma ago. Geochemically, the volcanism in the north of the OCM region is mainly of high-K (calc-alkaline) characteristics and is related to fractional crystallization processes. Likewise, the analyzed rocks are mainly of rhyolitic compositions with variations of dacites-rhyolites and trachydacites-rhyolites. Finally, based on the results obtained, it has been possible to redefine the explosive volcanic lithostratigraphy of the Neogene and Quaternary in the north of the OCM region.

Keywords: Lithostratigraphy, Ignimbrites, Geochronology, Geochemistry, Neogene-Quaternary



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Se desarrollaron varios estudios iniciales a nivel regional, para la elaboración de la Carta Geológica Nacional, estos estudios sentaron las bases para la comprensión de la estratigrafía volcánica en el sur del Perú. Algunos autores y las áreas donde trabajaron son: Wilson y Garcia (1962) en las áreas de Pachia y Palca; Wilson (1963b) en el área de Huaylillas; Mendivil (1965) en las áreas de Maure y Antajave; Guevara y Dávila (1983) en las áreas de Cora Cora y Pacapausa; Pecho Gutierrez (1983) en las áreas de Pausa y Caraveli; Olchauski y Dávila (1994) en las áreas de Chuquibamba y Cotahuasi; y Swanson *et al.* (2004) en el área de Orcopampa.

Se menciona también, otros trabajos de investigación en regiones cercanas a la región OCM. Estos trabajos, están enfocados en el estudio sobre la litoestratigrafía, cronología, petrología y geoquímica del vulcanismo Cenozoico en el sur del Perú, y su repercusión con el levantamiento de los Andes Centrales.

- Noble *et al.* (1974), reportaron dataciones radiométricas, y documentaron importantes actividades ígneas durante el Mioceno temprano y medio, proporcionando una mejor comprensión de la evolución de los Andes del sur del Perú durante el Cenozoico.
- Noble *et al.* (1979), estudiaron el Grupo Nazca en el SO de Perú, al este de la ciudad de Nazca. Describieron al grupo Nazca como secuencias de conglomerados, areniscas, y toba de flujo de ceniza que sobreyacen de manera discordante al batolito de la costa. Además reportaron edades K-Ar entre 22



- Ma y 18 Ma, para las secuencias de toba de ceniza denominándolas como “Nazca tuff”.
- Sébrier *et al.* (1979), en el piedemonte pacífico de los Andes del sur del Perú, estudiaron y presentaron una estratigrafía que incluye depósitos marinos, depósitos continentales, y depósitos volcánicos durante el Paleógeno, Neógeno y Cuaternario.
 - Tosdal *et al.* (1981), reportaron 24 edades radiométricas K-Ar, para establecer una estratigrafía de las rocas volcánicas del Cenozoico tardío, ubicado en la Cordillera Occidental en el extremo sur del Perú (16°30' - 18°00'S).
 - Vatin-Perignon *et al.* (1996), proporcionaron nuevas edades de huellas de fisión (fission track en inglés), realizadas en obsidianas del sillar de Arequipa. También estudiaron los elementos traza y elementos de tierras raras de las capas de tobas que se ubican entre el sur del Perú y el norte de Bolivia.
 - Paquereau *et al.* (2005, 2006 y 2008), estudiaron cuatro ignimbritas Neógenas y Cuaternarias, en el área de Arequipa. El proyecto de investigación se basó en correlacionar la estratigrafía, petrología, edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, y análisis de elementos traza. Así mismo, desarrollaron pruebas de Anisotropía de Suceptibilidad Magnética (ASM), y analizaron 2 principales ignimbritas de edad Plioceno y Pleistoceno, a lo largo del valle del río Chili y en la cuenca de Arequipa.
 - Schildgen *et al.* (2007, 2009), entre la costa y el margen occidental del altiplano de los Andes Centrales del sur del Perú, proporcionaron conocimientos sobre la historia de la deformación de los Andes y su relación con el levantamiento. Para ello utilizaron termo-cronómetros (U-Th)/He, en



cristales de apatitos y zircones, para determinar el historial de incision de los cañones de Ocoña, Majes, Camaná y Sihuas.

- Mamani *et al.* (2010), presentaron más de 1500 datos de elementos mayores y traza. Así mismo, presentaron análisis isotópicos (^{650}Sr , ^{610}Nd y ^{570}Nd) de rocas magmáticas de edad Mesozoico y Cenozoico, ubicados en el sur del Perú y norte de Chile. También documentaron variaciones en la composición de los magmas con edades desde el Jurásico hasta el Pleistoceno, en particular durante el Neógeno, cuando el mayor engrosamiento de la corteza tuvo lugar debido a muchos factores, uno de los cuales se debe a que grandes volúmenes de ignimbritas se han emplazado desde hace 30 Ma.
- Brandmeier *et al.* (2014), reportaron 31 edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, y ellos llevaron a cabo análisis de drenajes y de Modelos de Elevación Digital (DEM, siglas en inglés), para obtener una mejor comprensión de la historia del levantamiento y de la erosión durante el Mioceno tardío, en la región de Ayacucho ubicado en la parte norte de los Andes Centrales.
- Freymuth *et al.* (2015), entre el sur del Perú y norte de Chile, realizaron modelos geoquímicos utilizando isótopos de O y Sr, para comprender el origen de magmas que generaron estratovolcanes, ignimbritas dacíticas a riodacíticas de gran volumen, e ignimbritas riolíticas de bajo volumen. Explicando su relación con la evolución de la corteza Andina.
- Brandmeier y Wörner (2016), en el extremo sur del Perú y norte de Chile, aplicaron métodos de estadística multivariable (p. ej. análisis de conglomerados, análisis de discriminación lineal). Ellos analizaron la composición de elementos mayores y traza, e investigaron los procesos que



causan cambios en la composición de los magmas ignimbríticos de los Andes Centrales a través del tiempo y espacio.

- Wörner *et al.* (2018), describieron la variación de las composiciones químicas e isotópicas, las cuales han sido afectados por la interacción con la corteza gruesa de los Andes Centrales. Además mencionaron, que se han producido grandes volúmenes de ignimbritas por la erupción de magmas silícicos, y que estos magmas son producto de una fuerte diferenciación y de la mezcla con material de la corteza.

En referencia a estudios realizados localmente dentro de la región OCM, se menciona a Thouret *et al.* (2007, 2016 y 2017), quienes han estudiado las ignimbritas en la región de los cañones OCM, y basados en la litoestratigrafía, geocronología, geoquímica, análisis de litofacies y características geomorfológicas, identificaron 12 capas de ignimbritas y depósitos de Corrientes Densas de Piroclastos (CDP), para las cuales reportaron edades entre 24 Ma y 1 Ma.

Se menciona también, algunas tesis de maestría, acerca del vulcanismo en la región OCM:

- De la Rupelle (2013), estudió el vulcanismo ignimbrítico en los cañones OCM, aportó nuevos conocimientos para la comprensión de la cronoestratigrafía de ignimbritas, localización de fuentes de ignimbritas, y su relación con el levantamiento de los Andes.
- Sabidussi (2014), en su tesis de maestría realizó pruebas de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM), para determinar las direcciones de flujo de ignimbritas del Mioceno (Huaylillas y Alpabamba) ubicadas en la región OCM. Además sugirió dos principales fuentes geográficas para las



ignimbritas Huaylillas: 1) una ocupada por el complejo Nevado Coropuna; y 2) otra ubicada en el este de la localidad de San Javier de Alpbamba. De esta manera sugiere que la fuente de las Ignimbritas Alpbamba podría estar localizada en el norte del Cañón de Cotahuasi (Lago Ecma).

- Cuellar (2019), estudió la geología, geocronología, y la geoquímica de las rocas volcánicas que afloran en la mina Inmaculada. Así mismo, propuso una estratigrafía, y reportó edades de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ para ignimbritas y flujos de lava.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A pesar de la existencia de muchos estudios previos, varias unidades de ignimbritas en el SO de los Andes Centrales peruanos, no han sido bien identificadas y sus posiciones crono-estratigráficas no se han definido bien. En el norte de la región OCM, donde las ignimbritas están bien expuestas gracias a la incisión de los valles ultraprofundos, las ignimbritas de edad Mioceno son menos conocidas en comparación con sus contrapartes del Plioceno y Cuaternario. Por ejemplo, una ignimbrita del Mioceno denominada durante los últimos 40 años por los geólogos peruanos como “Formación Alpbamba”, merece más estudios para definir sus características, su cronología y procesos de emplazamiento.

La Formación Alpbamba, fue descrita por primera vez por Guevara y Dávila (1983) en las inmediaciones del pueblo de San Javier de Alpbamba (SJA), donde describieron una gruesa secuencia de casi 1000 m, de tobas dacíticas a riodacíticas de color blanco amarillento. Sin embargo, en el estudio realizado por Thouret *et al.* (2016), mencionan que el grosor de toda la columna estratigráfica en el pueblo de SJA pudo ser sobreestimado, porque la parte superior de la Formación Alpbamba correspondería a



flujos de tobas blanquecinas de pómez y ceniza correspondientes a las Ignimbritas del Sencca Inferior.

Así también, los mapas geológicos del norte de la región OCM, publicados por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET), muestran que muchos afloramientos de ignimbritas fueron mapeados y asignados como Formación Alpbamba (Pecho Gutierrez, 1983; Olchanski y Dávila, 1994; Martínez y Cervantes, 2001; Muñoz *et al.* 2014). Sin embargo, los rangos de edades U/Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y K/Ar publicados hasta el año 2016 (Swanson *et al.*, 2004; Schildgen *et al.*, 2007, 2009; Thouret *et al.*, 2007, 2016; y otros) abarcan edades antiguas del Mioceno inferior como 22 Ma hasta edades jóvenes del Plioceno superior como 5 Ma (p. ej. en el área de Cotahuasi). Este registro cronológico indica que no se trata de las mismas ignimbritas de la Formación Alpbamba.

Por lo tanto, en esta investigación se ha estudiado las Ignimbritas del norte de la región OCM. Para ello, se ha escogido localidades estratégicas (p. ej. San Javier de Alpbamba, Corculla, Charcana, Cotahuasi, Quillumsa, Huaynacotas, Pampamarca y Salamanca), que están ubicadas a lo largo de los ríos Huanca Huanca, Oyolo, Cotahuasi y Arma. Con el fin de aportar al conocimiento de la litoestratigrafía y litofacies de las Ignimbritas en el norte de la región OCM, se ha realizado el levantamiento de columnas estratigráficas, también se describieron las estructuras y la litología en campo. Así mismo, se realizó el muestreo de ignimbritas para el posterior análisis de litofacies, a través de estudios petromineralógicos en laboratorio.

Se han publicado varias edades para las ignimbritas del Mioceno al Pleistoceno en el sur del Perú (Tosdal *et al.*, 1981; Sébrier *et al.*, 1988; Vatin-Perignon *et al.*, 1996; Swanson *et al.*, 2004; Paquereau *et al.*, 2005, 2006, 2008; Schildgen *et al.*, 2009; Thouret *et al.*, 2007, 2016; y otros), sin embargo estas edades están dispersas y a veces son



confusas. Por lo tanto, no siempre existe un buen control de la cronoestratigrafía de las ignimbritas Neógenas y Cuaternarias en el sur del Perú. Esto puede llevar a cometer errores en la estimación de la edad de algunas capas de ignimbritas, las cuales son definidas en base a edades publicadas de unidades subyacentes y sobreyacentes, o basado en sus relaciones estratigráficas y tectónicas con otras unidades de lugares cercanos. Es el caso de la Formación Alpbamba, el cual se supone que sobreyace al Grupo Tacaza y subyace a las ignimbritas Sencca del Plioceno y Cuaternario como se muestra en muchos mapas geológicos (Pecho Gutiérrez, 1983; Olchanski y Dávila, 1994; Martínez y Cervantes, 2001; Muñoz *et al.*, 2014). Otra fuente de incertidumbre se ha relacionado con los métodos de datación, debido a que se han utilizado varios métodos, como K/Ar, U/Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, etc. Así mismo, algunas edades se acercan a los 40 años de antigüedad desde su publicación (Tosdal *et al.*, 1981; Sébrier *et al.*, 1988; y Vatin-Perignon *et al.*, 1996), cuando los métodos de datación no eran tan eficaces como ahora. Por tanto, se propone realizar la datación radiométrica de cristales de zircón utilizando el método U/Pb con el fin de contribuir al conocimiento de la cronología de las unidades de ignimbritas del Mioceno y Cuaternario e incluso comparar con otras edades de ignimbritas que fueron datadas por otros métodos.

Muchos autores han estudiado las variaciones de la composición de las ignimbritas de los Andes centrales (Paquereau *et al.*, 2005; Mamani *et al.*, 2010; Freymuth *et al.*, 2015; Brandmeier y Wörner, 2016; Wörner *et al.*, 2018). Principalmente de aquellas ignimbritas que se desarrollaron durante el Neógeno, cuando ocurrió el mayor engrosamiento de la corteza (Tosdal *et al.*, 1984; Sébrier *et al.*, 1988; Garziona *et al.*, 2008). Sin embargo, las ignimbritas Neógenas y Cuaternarias del norte de la región de OCM no se han estudiado detalladamente respecto a su geoquímica. En este trabajo, se propone realizar análisis químicos de elementos mayores en material juvenil (piedra



pómez y vidrio) y en componentes minerales, para contribuir al conocimiento de la geoquímica de las ignimbritas en el norte de la región OCM.

El conocimiento de las características petrológicas, litoestratigráficas, geoquímicas y geocronológicas de las ignimbritas del norte de la región OCM, enriquecerá el conocimiento que se tiene hasta la actualidad sobre la estratigrafía volcánica en ésta región. Así mismo ayudará a comprender la evolución del vulcanismo ignimbrítico Neógeno y Cuaternario en el sur del Perú.

Para desarrollar este proyecto nos formulamos las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las principales litofacies de las ignimbritas en la región OCM y cómo se correlacionan litoestratigráficamente con otras ignimbritas Neógenas y Cuaternarias en el norte de la región OCM y en el sur del Perú?
- ¿Qué edades U/Pb tienen las ignimbritas mapeadas como ignimbritas del Mioceno, y en qué medida podemos correlacionarlas con la cronología existente del vulcanismo ignimbrítico en la región OCM?
- ¿Cuál es la composición química de las ignimbritas neógenas y cuaternarias en la región OCM?



1.3. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo se centra en el estudio de las ignimbritas Neógenas y Cuaternaris del norte de la región OCM en el sur del Perú. Para ello se plantea un objetivo general, el cual es:

- Caracterizar la litoestratigrafía, geocronología y geoquímica de las ignimbritas neógenas y cuaternarias en el norte de la región de los cañones de Ocoña-Cotahuasi-Maran (OCM).

Para alcanzar nuestro objetivo principal proponemos tres objetivos específicos:

- Realizar la correlación estratigráfica de las ignimbritas del norte de la región OCM, en base a la elaboración de columnas estratigráficas, el estudio de estructuras y en base al análisis de litofacies en secciones delgadas y muestras de mano.
- Obtener edades de cristales de circón con el método U/Pb y correlacionar las unidades de ignimbritas en función de la cronología.
- Caracterizar geoquímicamente y desarrollar la química mineral de los componentes cristalinos de las muestras de ignimbritas del norte de la región OCM.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. TERMINOLOGÍA GENERAL

2.1.1. Corrientes Densas de Piroclastos (CDP)

Las Corrientes Densas de Piroclastos (CDP) consisten en una mezcla caliente no homogénea de gases y partículas volcánicas (bloques, cenizas, pómez y lapilli), que se desplazan por los flancos de los volcanes, además llenan preferentemente valles y depresiones topográficas (Cas y Wright, 1987; Branney y Kokelaar, 2002; Lockwood y Hazlett, 2010; Sigurdsson *et al.*, 2015).

Los CDP se generan durante el colapso de columnas eruptivas verticales de erupciones volcánicas explosivas, por explosiones laterales inclinadas, o por el colapso de domos de lava inestables (Cas y Wright, 1987; Branney y Kokelaar, 2002; Sigurdsson *et al.*, 2015). Los CDP también son conocidos como nubes ardientes, porque son extremadamente calientes y brillan de manera incandescente (Lockwood y Hazlett, 2010). En los depósitos de CDP, se puede observar conductos de segregación de gas o mejor conocidos en inglés como “gas pipes” (Cas y Wright, 1987).

2.1.1.1. Clasificación de Corrientes Densas de Piroclatos (CDP)

Los CDP, son comúnmente clasificados como flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas. Donde, los flujos piroclásticos, se clasifican en dos categorías como: flujos de bloques y ceniza y los flujos de ceniza (conocidos como ignimbritas) (Lockwood y Hazlett, 2010). Así mismo, en base a características litológicas y de estructuras



sedimentarias, Branney y Kokelaar (2002) categorizan a los CDP como; ignimbritas, depósitos de oleadas piroclásticas y depósitos de flujos de bloques y ceniza.

Las ignimbritas son depósitos de flujos piroclásticos ricos en pómez y ceniza, que son generados durante el emplazamiento de CDP (Branney y Kokelaar, 2002; Wilson y Hildreth, 2003). Así mismo, las ignimbritas pueden contener fragmentos de cristales y cantidades variables de líticos, en una matriz compuesta por fragmentos vítreos conocidos como “shards” (Cas y Wright, 1987; Branney y Kokelaar, 2002; Lockwood y Hazlett, 2010). Algunas ignimbritas muestran evidencia de que se han depositado a altas temperaturas (p. ej. ≥ 550 °C) (Branney y Kokelaar, 2002) y además pueden presentar zonas de soldeamiento. Las ignimbritas pueden poseer volúmenes desde unos pocos miles de metros cúbicos hasta varios miles de kilómetros cúbicos ($>10^3$ Km³) (Branney y Kokelaar, 2002; Wilson y Hildreth, 2003; Paquereau *et al.*, 2005).

Los depósitos de bloques y cenizas, se caracterizan por contener poco o nada de pómez, a su vez contienen una gran cantidad de bloques de lavas vesiculares, que están envueltos en ceniza volcánica (Lockwood y Hazlett, 2010). Se producen por el colapso explosivo de domos en crecimiento, o por la desintegración de los márgenes empinados de flujos silícicos de lavas, además poseen volúmenes menores en comparación con las ignimbritas (Branney y Kokelaar, 2002; Lockwood y Hazlett, 2010).

Los depósitos de oleadas piroclásticas se caracterizan por poseer canales internos de erosión, inconformidades y estratificación cruzada, que sugieren que se depositaron en un flujo turbulento (Lockwood y Hazlett, 2010). Los depósitos de oleadas cubren la topografía, pero también tienden a acumularse en depresiones en donde son más gruesas (Cas y Wright, 1987).



2.1.1.2. Componentes de las Corrientes Densas de Piroclatos (CDP)

Los CDP poseen tres componentes principales; 1) componente juvenil, 2) componente cristalino y 3) componente lítico.

El componente juvenil, se deriva directamente del magma en erupción y lo constituye principalmente la pómez o escoria y los fragmentos de vidrio mejor conocidos en inglés como “glass shards”. La pómez, consiste de vidrio volcánico altamente vesicular, así mismo tienen vesículas en formas tubulares subparalelas y vesículas esféricas. La escoria es pómez de composición básica, y contiene vesículas de formas esferoidales (Fisher y Schmincke, 1984). Así mismo, Cas y Wright (1987) describen que las pómez son generalmente de colores claros, altamente vesiculares y que puede contener cristales. Por otro lado, los fragmentos de vidrio o glass shards, se forman por la ruptura de burbujas que se desarrollan en magmas silícicos (Fisher y Schmincke, 1984).

Los componentes cristalinos en los depósitos piroclásticos suelen ser euhedrales incompletos, así también se pueden presentar pequeñas proporciones de cristales que derivan de las rocas encontradas en el conducto volcánico (McPhie *et al.*, 1993).

Los componentes líticos se pueden derivar de rocas preexistentes, y se producen por procesos eruptivos explosivos y por procesos de erosión de rocas preexistentes (volcánicas y no volcánicas) (McPhie *et al.*, 1993). Los líticos se pueden subdividir en tres: 1) líticos cognatos, que son fragmentos que se han formado del magma en erupción; 2) líticos accesorios, que consisten de líticos que provienen del conducto volcánico y que han sido expulsados durante la erupción; 3) líticos accidentales, son fragmentos recogidos de la superficie durante el flujo de piroclastos o durante el flujo de oleadas piroclásticas (Cas y Wright, 1987).

2.1.2. Grado de soldadura en ignimbritas

Debido al calor retenido en los flujos de ignimbritas, es posible encontrar zonas densamente soldadas, zonas parcialmente soldadas, y zonas no soldadas (Smith, 1960a, 1960b; Ross y Smith, 1961). El proceso de soldadura consiste en la unión, compactación y aplanamiento de fragmentos vítreos (p. ej. pómez, escoria, fragmentos de vidrio o shards), produciendo la textura eutaxítica (Smith, 1960a, 1960b; Fisher y Schmincke, 1984; McPhie *et al.*, 1993). Así mismo, en las zonas densamente soldadas, los fragmentos de pómez se convierten en vidrio negro u obsidiana (Ross y Smith, 1961; Fisher y Schmincke, 1984).

Tabla 1. Rangos de Intensidad de Soldadura Según Características Petrográficas

Petrographic characteristics used to define ranks of welding		
Rank	Ash matrix	Pumice lapilli
I	Unconsolidated ¹ , noncoherent ² , loosely packed ² little to no adhesion between shards ³	Lack deformation ³ , randomly oriented ²
II	Coherent ⁴ , some adhesión between shards ³ , no coalescence of glassy material ³	Randomly oriented ² , no deformation ³ , no eutaxitic texture ⁴ , fracture takes place around rather than through pumice ¹
III	Highly porous and soft ⁴ , dull luster and hackly fracture ¹ , originally spherical bubble shards slightly ellipsoidal ³ , some coalescence of glassy material ³	Incipiently ¹ or slightly ³ flattened ⁴ ; fracture takes place through rather than around pumice ¹
IV	Relatively soft ⁴ , moderately foliated ⁵ but individual shards only slightly deformed ³ , contact area between shards increased ³ and clasts are moderately adhered to one another ³	Foliated into clear eutaxitic texture ⁴ with both moderately deformed pumice and fully collapsed fiamme present ^{3,5}
V	Shards strongly foliated ⁵ , strongly adhered to one another ³ and moderately deformed ³	Foliated into strong eutaxitic texture ⁴ , collapsed to fiamme ³ that are obsidian-like although traces of former vesicles can be seen ¹
VI	Obsidian-like vitrophyre ^{1,3} , shards are thoroughly collapsed ^{1,3} , and completely adhered to one another ³	Eutaxitic texture and obsidian-like fiamme are faintly visible ¹ or difficult to detect ³

¹Smith 1960b; ²Sheridan and Ragan 1972; ³Streck and Grunder 1995; ⁴Wilson and Hildreth 2003; ⁵This study

Fuente: Tomado de “Ranking welding intensity in pyroclastic deposits” (p.138), por Quane and Russell (2004), Bull Volcanol.

Durante el proceso de soldadura, los espacios porosos se cierran y los gases contenidos en la ignimbrita son expulsados, formando estructuras de canales de segregación o “gas pipes” (McPhie *et al.*, 1993; Lockwood y Hazlett, 2010). Para clasificar el grado de soldadura, se adoptará la clasificación de Quane y Russell (2004), quienes basados en observaciones petrográficas, propusieron seis rangos de intensidad de soldadura (tabla 1).



2.1.3. Unidades de flujo y de enfriamiento en ignimbritas

Las ignimbritas presentan unidades de flujo y unidades de enfriamiento, y ambas se pueden distinguir. Las unidades de flujo son unidades deposicionales de flujos piroclásticos, y el espesor de cada unidad de flujo puede variar desde unos pocos centímetros a metros (Fisher y Schmincke, 1984). Smith (1960a) generalmente consideró la unidad de flujo como el producto de una nube ardiente. Los límites de las unidades de flujo, se distinguen por cambios en el tamaño de grano, presencia de zonas de estratificación cruzada, zonas con acumulación de bloques, zonas con acumulación de ceniza fina, zonas con material retrabajado, zonas de disconformidades erosionales, etc (Smith, 1960a; Fisher y Schmincke, 1984; Wilson y Hildreth, 2003).

Las unidades de enfriamiento consisten en un flujo de cenizas o secuencias de flujos de cenizas, depositadas rápidamente uno encima de otro flujo, mostrando un historial de enfriamiento continuo (Smith, 1960a; Fisher y Schmincke, 1984; Lockwood y Hazlett, 2010). Una unidad de enfriamiento simple se forma cuando el gradiente de temperatura en el proceso de enfriamiento permanece ininterrumpido (Smith, 1960a; Smith, 1960b; Fisher y Schmincke, 1984). En un depósito de una unidad de enfriamiento simple, los grados máximos de soldadura están en el centro de los depósitos y las partes con menor grado de soldadura están en la parte superior y en la base de los depósitos (Wilson y Hildreth, 2003). Una unidad de enfriamiento compuesta se forma cuando existe una variación en el gradiente de temperatura que perturba el enfriamiento continuo (Fisher y Schmincke, 1984). Debido a los mayores intervalos deposicionales de los flujos de cenizas, el reajuste a un gradiente de enfriamiento único no es posible (Smith, 1960a). Las unidades de enfriamiento compuestas pueden presentar zonas de máxima y mínima soldadura, estas zonas marcan los contactos entre las capas de ceniza (Lockwood y Hazlett 2010).



El término lámina compuesta se usa para depósitos compuestos por unidades de enfriamiento que gradúan lateralmente en unidades de enfriamiento simples o compuestas, y presentan evidencia de rupturas en el tiempo (p. ej. discordancias de erosión, sedimentos, flujos de lava, etc) (Smith, 1960a; Smith, 1960b; Wilson y Hildreth, 2003).

2.1.4. Zonas de cristalización tardía en ignimbritas

En los depósitos de CDP, se puede identificar zonas en las que ocurrieron procesos de cristalización tardía, que ocurren durante el enfriamiento de las capas o depósitos de CDP. Smith 1960b, reconoce tres procesos de cristalización tardía, los cuales son: devitrificación, cristalización en fase vapor y cristalización granofírica.

La zona de devitrificación, se caracteriza por la recristalización de fragmentos de vidrio o de la matriz vítrea, que forman agregados e intercrecimientos esferulíticos y axiolíticos de principalmente cristobalita y feldespatos alcalinos (Smith, 1960b; Cas y Wright, 1987). La devitrificación, es común en tobas con grado de soldadura densa a parcial (Smith, 1960b; Ross y Smith, 1961).

La zona de cristalización en fase vapor, conocido en inglés como “vapor-phase crystallization”, es resultado de la percolación de gases calientes durante el enfriamiento de las ignimbritas (Cas y Wright, 1987). Generalmente ocupa espacios porosos, y se desarrolla en la zona superior de las zonas de soldadura parcial e incipiente (Smith, 1960b; Cas y Wright, 1987). La zona de cristalización de fase vapor, puede sobreyacer a las zonas de devitrificación (Smith, 1960b), así también se encuentra comúnmente en el tope de las capas de ignimbritas (Cas y Wright, 1987). Los principales cristales que se forman en esta fase son; la cristobalita, tridimita y feldespatos alcalinos (Smith 1960b; Cas y Wright, 1987).



La zona de cristalización granofírica, se caracteriza porque presenta intercrecimiento de agregados de cuarzo en asociación con feldespatos alcalinos y otros minerales accesorios (Smith, 1960b). Se encuentra en unidades de ignimbritas de varios cientos de espesor, donde la zona granofírica divide la zona devitrificada en superior e inferior (Smith, 1960b).

El reconocimiento de las zonas de cristalización tardía, puede ser compleja en rocas con edades mayores al Plioceno y Mioceno, ya que puede haber procesos exógenos cómo la hidratación, oxidación de hierro o la conversión de tridimita y cristobalita a ópalo, calcedonia o cuarzo, entre otros (Smith 1960b).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación es de tipo descriptivo correlacional cualitativo y de tipo analítico. El cual se enfoca en el estudio, análisis y en la correlación de las características litoestratigráficas, geocronológicas y geoquímicas de las rocas ignimbritas y depósitos de CDP del norte de la región OCM. Para ello se ha desarrollado las siguientes etapas de trabajo (tabla 2).

Tabla 2. *Etapas de Trabajo*

ETAPAS DE TRABAJO	
TRABAJO PRE-CAMPO	<ul style="list-style-type: none">• Recopilación de información científica, artículos, tesis, libros, data preexistente de nuestra área de estudio.• Fotointerpetación geológica del área de estudio y elaboración de mapas pre-campo.
TRABAJO DE CAMPO Y OBSERVACIONES	<ul style="list-style-type: none">• Toma de datos geológicos y cartografiado geológico.• Reconocimiento de unidades litoestratigráficas.• Levantamiento de columnas litoestratigráficas de rocas volcánicas explosivas.• Muestreo de rocas.
TRABAJO ANALÍTICO DE LABORATORIO	<ul style="list-style-type: none">• Selección de muestras para realizar secciones delgadas, datación U-Pb y análisis geoquímicos.• Selección de cristales de circón para datación.• Estudio y análisis de secciones delgadas de rocas.• Análisis químico de elementos mayores, y análisis de componentes minerales y juveniles.

TRABAJO DE GABINETE

- Procesamientos e interpretación de los resultados obtenidos en los trabajos analíticos de laboratorio y en el trabajo de campo.
- Redacción del trabajo de investigación (tesis).

3.2. TRABAJOS DE CAMPO Y OBSERVACIONES

3.2.1. Estudio de afloramientos

El trabajo de campo consistió en la descripción detallada de los afloramientos rocosos y en la obtención de datos geológicos (p. ej. estructura, litología, espesor, coordenadas). Así mismo, se realizó con sumo cuidado la recolección de muestras de roca para el posterior análisis en laboratorio. Los pasos seguidos para obtener datos geológicos de campo se detallan en la figura 1.



Figura 1. Trabajo de Campo y Recolección de Muestras.

3.3. TRABAJO ANALÍTICO DE LABORATORIO

3.3.1. Estudio litológico, petrológico y microscópico de muestras

En esta sección las muestras se han analizado tanto en escala macroscópica como en escala microscópica.

3.3.1.1. Descripción de muestras de mano con el microscopio estereoscópico

Los análisis de muestras de mano, con el uso del microscopio estereoscópico (figura 2), ayuda a la determinación de características como el color, tamaño de grano, grado de sorteamiento, textura, vesicularidad, composición de la matriz, grado de soldadura y el porcentaje aproximado de material juvenil, cristales y líticos.

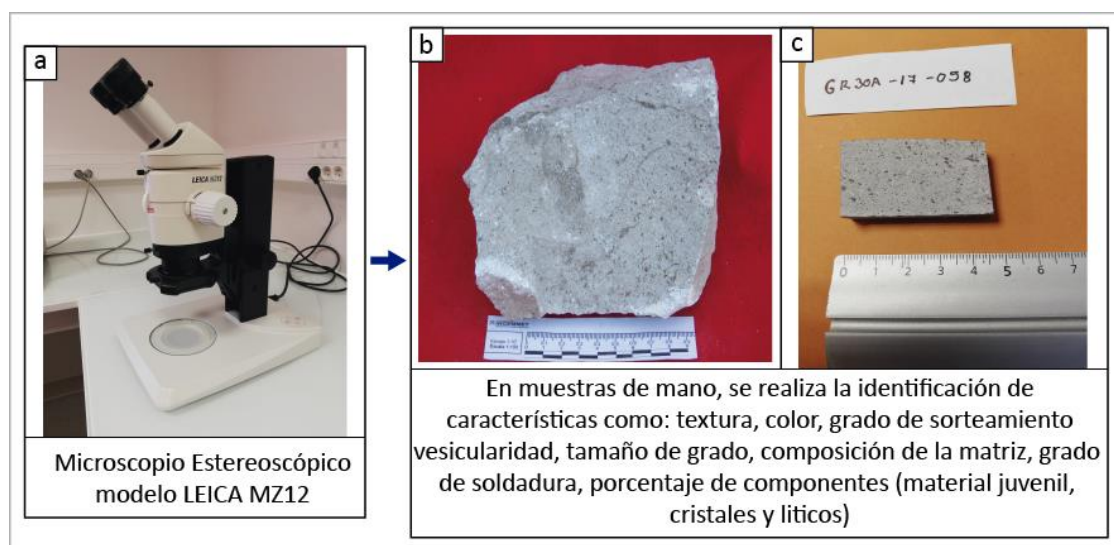


Figura 2. *Análisis Macroscópico de Muestras de Mano.*

3.3.1.2. Descripción de secciones delgadas con el microscopio petrográfico

Para la etapa de estudio microscópico (figura 3), se han elaborado 20 secciones delgadas de muestras de rocas. Se analizaron las características de las muestras tales como; la textura, la mineralogía, así como diferentes características que apuntan a fases como la devitrificación y la cristalización en fase vapor.

En primer lugar, se ha estudiado el porcentaje de los minerales (feldespatos, cuarzo, anfíboles, piroxenos, biotitas y otros), porcentaje del componente juvenil (i.e. pómez, vidrio, y fragmentos de vidrio) y el porcentaje de líticos. En segundo lugar, se analizaron las características de los minerales, tales como la forma, alteración, inclusiones, deformación y tamaño.

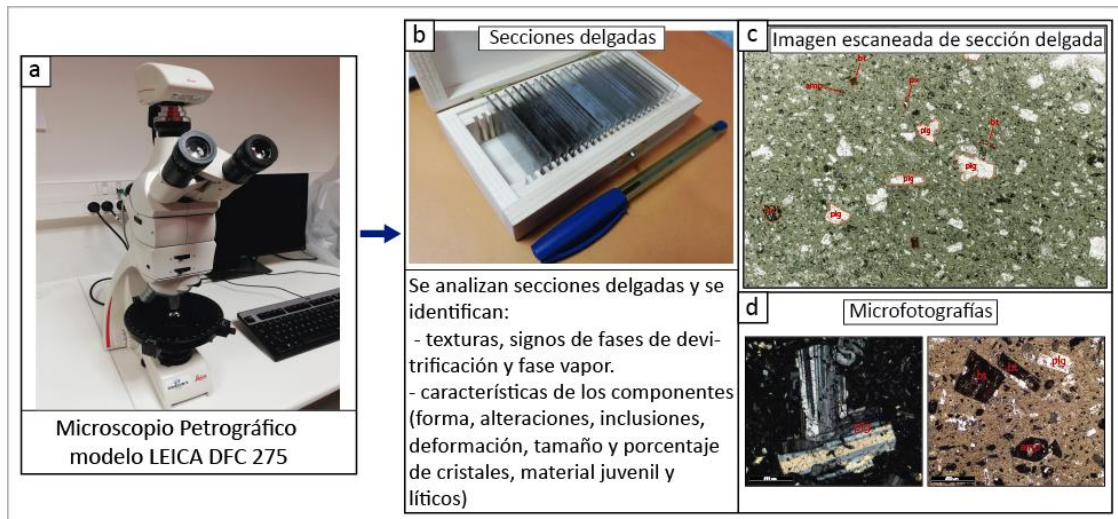


Figura 3. Análisis Microscópico de Secciones Delgadas.

3.3.2. Geocronología basada en el método U-Pb

3.3.2.1. Método de datación U-Pb

El método de datación U-Pb está basado en la desintegración de los isótopos de uranio y torio a los diferentes isótopos de plomo (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb y ^{208}Pb). El isótopo ^{204}Pb es estable, sin embargo, los otros isótopos de plomo son productos de tres cadenas de desintegración complejas a partir de los isótopos de ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th , respectivamente (figura 4) (Hanchar y Hoskin, 2003; Dickin, 2005; Schoene, 2014; Reiners *et al.*, 2018).

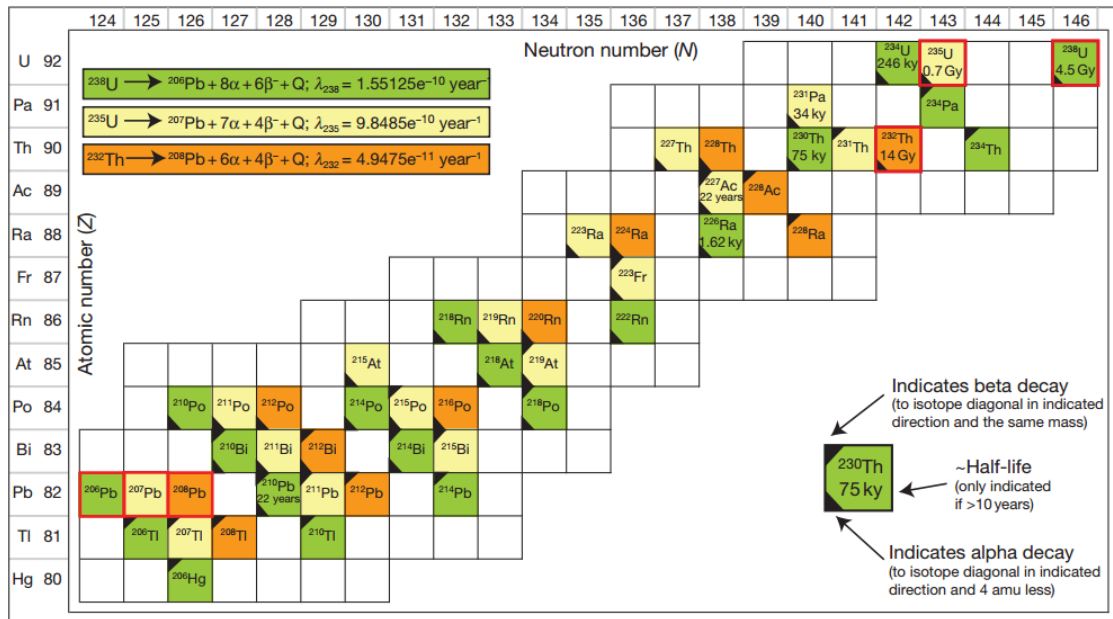


Figura 4. Cadenas de desintegración de U-Th-Pb. λ = constante de desintegración. Tomado de “U-Th-Pb Geochronology” (p.343), por Schoene (2014), Treatise on Geochemistry 2nd Edition.

El tratamiento independientemente de tres sistemas de desintegración, permite establecer la construcción de tres ecuaciones de edad, y esto conduce a tres ecuaciones isócronas clásicas (Hanchar y Hoskin, 2003; Dickin, 2005; Schoene, 2014; Reiners *et al.*, 2018), como se muestra en la figura 5. El isótopo ^{204}Pb se utiliza como isótopo normalizador, ya que es el único isótopo no radiogénico del Pb.

$$\begin{aligned} \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right) &= \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_0 + \left(\frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}\right) (e^{\lambda_{238}t} - 1) \\ \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right) &= \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_0 + \left(\frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}\right) (e^{\lambda_{235}t} - 1) \\ \left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right) &= \left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_0 + \left(\frac{^{232}\text{Th}}{^{204}\text{Pb}}\right) (e^{\lambda_{232}t} - 1) \end{aligned}$$

Figura 5. Ecuaciones Isócronas Utilizadas en el Método de Datación U-Th-Pb. Adaptado de “Geochronology and Thermochronology” (p.173), Reiners et al. (2018), American Geophysical Union, WILEY.



El método U-Pb es aplicado en varias áreas para la comprensión de: 1) La evolución espacial y temporal de los sistemas volcánicos; 2) el análisis de la procedencia sedimentaria y en la comprensión de la evolución de cuencas sedimentarias; y 3) la evolución de complejos metamórficos, entre otros (Alván *et al.*, 2015; Thouret *et al.*, 2016; Paquette *et al.*, 2019; Sundell *et al.*, 2019; Ortiz *et al.*, 2019; Suhr *et al.*, 2019).

El método U-Pb aplicado en cristales de circón, puede proporcionar información para comprender la evolución temporal de los sistemas volcánicos, registrar la distribución espacial y temporal y registrar la vida útil de las cámaras magmáticas en grandes sistemas volcánicos (Paquette *et al.*, 2019). Los circones son muy resistentes a los procesos magmáticos, metamórficos y erosivos (Hanchar y Hoskin, 2003). Los trabajos de investigación en circones proporcionaron edades incluso desde los períodos Precámbricos, como lo demuestra la ocurrencia de circones Hadeanos en el noreste de Brasil y el noroeste de Argentina descritos por Paquette *et al.* (2015).

Los circones son minerales ricos en U y tienen la capacidad de preservar su U original, acumulando contenido de Pb radiogénico incluso a través de eventos de refundición (Hanchar y Hoskin, 2003; Dickin, 2005). También es un componente común presente en la mayoría de rocas intermedias a ácidas (Dickin, 2005). Todos esos factores mencionados anteriormente, hacen que el circón sea el principal mineral utilizado en el método de datación U-Pb. Por tanto, sería el método más adecuado para el estudio de ignimbritas, que son muy evolucionadas, de composición riolíticas en su mayoría en nuestro caso de estudio.

3.3.2.2. Espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente por ablación con láser (LA-ICP-MS)

La datación de ignimbritas, se ha obtenido mediante el método U-Pb aplicado a cristales de circón con el uso del equipo de LA-ICP-MS (figura 6). El uso de LA-ICP-MS permite a los investigadores analizar directamente muestras sólidas, como minerales separados (cristales de circón en nuestro caso).

Los cristales de circón han sido analizados con LA-ICP-MS, y con la adición en el sistema de gases como Ar, He y N₂ con el fin de potenciar la sensibilidad y obtener mejores resultados.

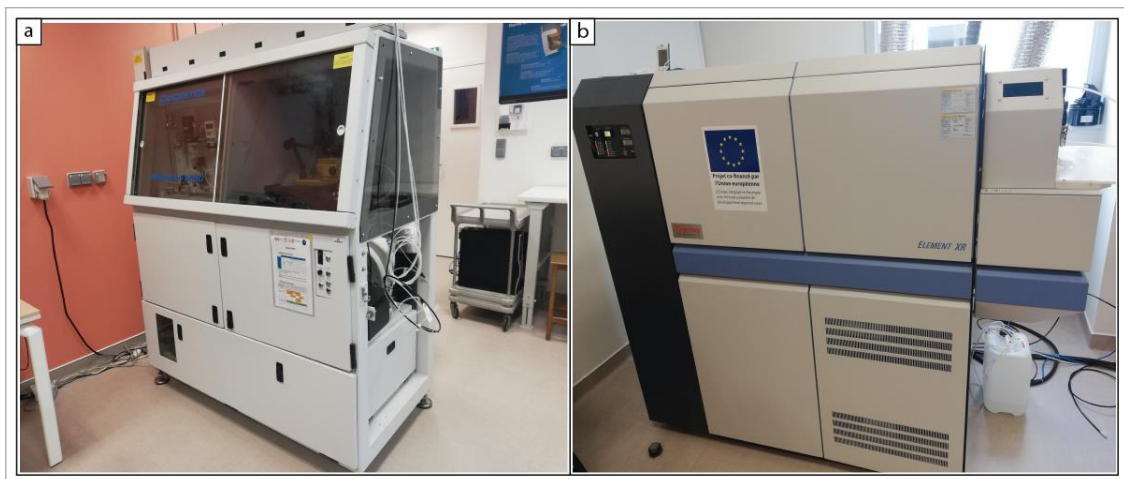


Figura 6. Equipo de LA-ICP-MS. a) Sistema de Ablación Láser (LA). b) Espectrómetro de Masas de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS).

El equipo de LA-ICP-MS (figura 6a) genera un rayo láser que es enfocado en la superficie de la muestra para generar partículas finas, este proceso es conocido como ablación láser. Luego, las partículas ablacionadas son transportadas por gas He, y luego se mezclan con Ar y N₂ en el equipo de ICP-MS (figura 6b) y se dan los procesos de ionización, separación de masa y también se mide la cantidad de los isótopos U y Pb generados. Los iones excitados en la antorcha de plasma se introducen posteriormente en

un espectrómetro de masas (figura 7), para análisis elementales e isotópicos (Fuente: sitio web APPLIED SPECTRA).

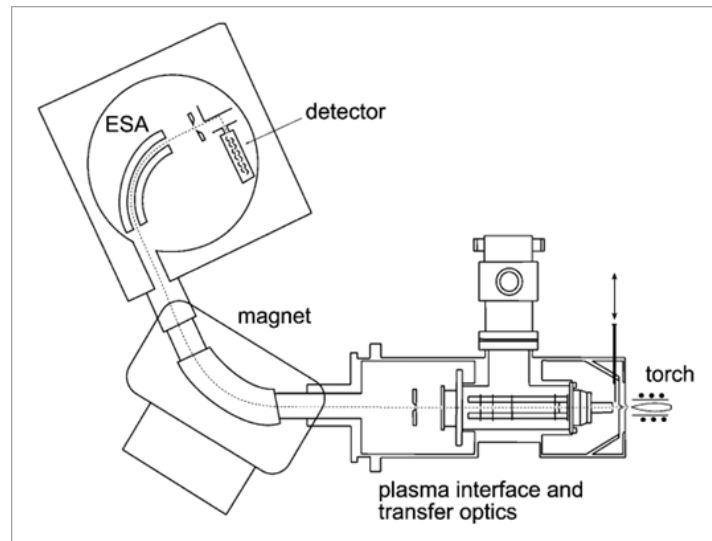


Figura 7. Configuración esquemática del instrumento ICP-MS con sector magnético de colector único, equipo ELEMENT2. Tomado de “Applications of magnetic sector ICP-MS in geochemistry” (p.2), por Gäbler (2002), Journal of Geochemical Exploration.

3.3.2.3. Gráficos utilizados para interpretar los resultados

El diagrama de Tera-Wasserburg (T-W) es una presentación alternativa de los datos U-Pb, iniciada por Tera y Wasserburg (1972, 1973, 1974). En el diagrama T-W, las relaciones $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ y $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ se trazan directamente en los ejes X y Y respectivamente (figura 8). Otro diagrama clásico fue desarrollado por Wetherill (1956), en estos diagramas las relaciones $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ y $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ se representan en los ejes X e Y respectivamente.

El diagrama T-W tiene una curvatura diferente con respecto al diagrama de Concordia tradicional de Wetherill (1956). En este trabajo de investigación, se ha utilizado el diagrama T-W, porque muestra las líneas de discordia con mayor claridad y es preferido por los investigadores para fechar rocas jóvenes (Dickin, 2005).

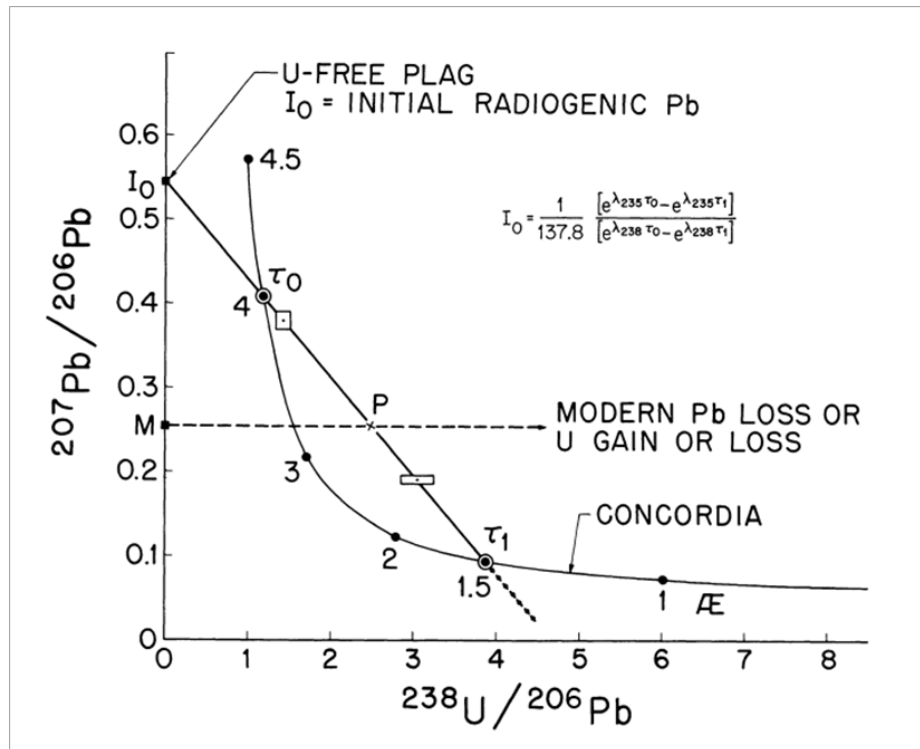


Figura 8. Diagrama Tera-Wasserburg (T-W). Diagrama que muestra la relación entre $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ y $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, el diagrama contiene las relaciones U-Pb de las rocas lunares descritas por Tera y Wasserburg (1974). Tomado de “U-Th-Pb Systematics on lunar rocks and inferences about lunar evolution and the age of the moon” (p. 1572), por Tera y Wasserburg (1974), Fifth Lunar Conference.

3.3.3. Datación de circones con el método U-Pb

3.3.3.1. Preparación de muestras para la separación de circones

En este apartado explicamos los procedimientos seguidos para la preparación de muestras. Con el objetivo de obtener cristales de circones y posteriormente poder fecharlos mediante el método U / Pb.

Corte y trituración de muestras. Las muestras de ignimbritas obtenidas en campo, se cortan en trozos pequeños, para favorecer su posterior trituración (figura 9). Es importante triturar cada muestra hasta obtener una fracción de tamaño de grano menor a 400 μm , y luego continuar con el proceso de separación de cristales de circón del resto de minerales pesados y de la matriz triturada.

<p>Cortar y reducir el tamaño de las muestras con ayuda de un Petrótopo</p>	<p>Seleccionar las muestras para la elaboración de secciones delgadas</p>	<p>Las muestras deben ser cortadas en trozos pequeños para chancarlo posteriormente</p>
<p>Secar las muestras cortadas en un horno</p>	<p>Triturar las muestras con una chancadora</p>	<p>Tamizar la muestra triturada en un tamiz de 400 μm</p>
<p>Triturar y tamizar de nuevo las muestras con tamaño de grano > 400 μm</p>	<p>Codificar la muestra con granulometría < 400 μm, esta muestra será destinada para separar cristales de circón</p>	<p>Limpiar el tamiz muy bien, con una escobilla</p>

Figura 9. *Proceso de Corte y Trituración de Muestras.*

Separación de cristales de circón. Se han seguido tres pasos para separar los cristales de circón: 1) separación por gravedad, 2) separación magnética y 3) separación por densidad.

En el **proceso de separación por gravedad** (figura 10), se usa una tabla vibratoria, esto para concentrar los minerales pesados y remover los minerales ligeros como el cuarzo, feldspatos, micas, etc.



Figura 10. Separación de Minerales Pesados por Gravedad.

En el **proceso de separación magnética**, se ha usado el separador magnético “FRANTZ”. El separador magnético remueve todos los minerales magnéticos como los piroxenos, anfíboles, granates, etc., de minerales no magnéticos como los circones (figura 11).

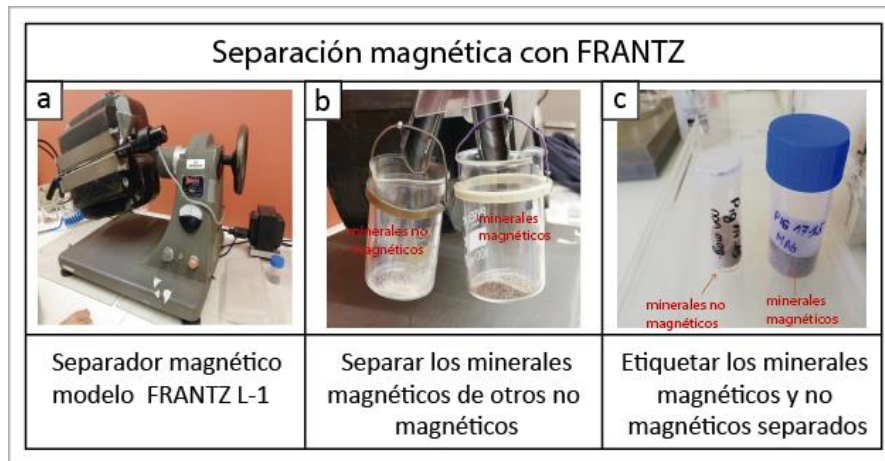


Figura 11. Separación Magnética de Minerales.

En el **proceso de separación por densidad** (figura 12), se separan los circones de otros minerales menos pesados (p. ej. apatita). Para ello se hace el uso de líquidos pesados, como el bromoformo (densidad entre 2.81 – 2.33 g/ml) para muestras con cantidades mayor a 3 gr, y el diodometano (densidad de 3.325 g/ml) para pequeñas cantidades < 2 gr.

Separación por densidad con líquidos pesados			
<p>Los materiales usados son: embudo de decantación, embudo y vaso de precipitados</p>	<p>Con la ayuda de un embudo, colocar el Bromoformo (d=2.81-2.33) en el embudo de decantación. Luego en la solución, vaciar los minerales no magnéticos separados anteriormente</p>	<p>Los minerales con densidades > 2.81 g/ml son colectados en un papel filtrante</p>	
<p>Limpiar los minerales pesados separados, y también limpiar los materiales usados</p>	<p>Con ayuda de un microscopio, revisar los minerales separados. Ellos deberían ser zircones, ya que poseen densidades mayor 2.8 g/ml. Luego colocarlos en un contenedor pequeño</p>	<p>Etiquetar los contenedores, que contienen los cristales de zircones</p>	

Figura 12. Separación por Densidad con Líquidos Pesados.

3.3.3.2. Preparación de los cristales de circón para su posterior datación

En esta sección, se preparan los cristales de circón que fueron obtenidos en el proceso de separación por densidad, para su posterior análisis y datación. Para ello, se ha seguido dos pasos adicionales: 1) selección de circones y 2) preparación de discos epoxi conteniendo los cristales de circón.

Selección de circones. Consiste en la selección cuidadosa de circones (figura 13) que se encuentren en buenas condiciones, de tamaños grandes > 5-20 μm , no erosionados, bien conservados y no rotos.

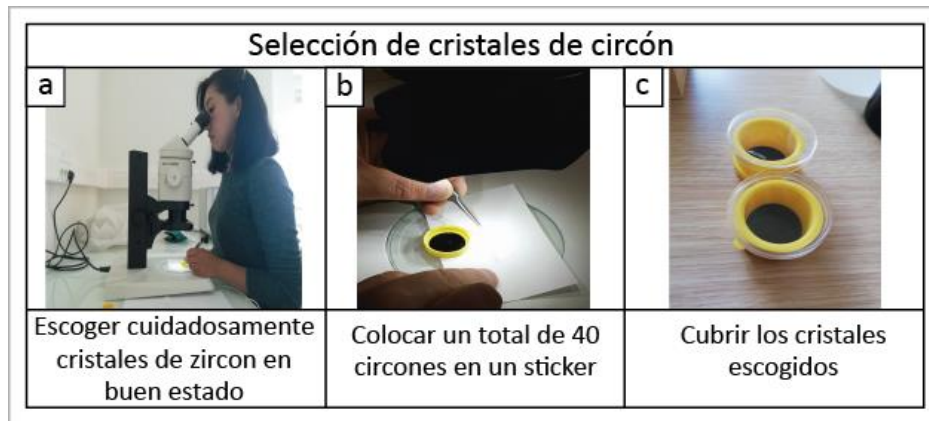


Figura 13. Selección de Cristales de Circón para Datación.

Preparación de discos epoxi. Consiste en la preparación de discos epoxi (figura 14) conteniendo los cristales de circón seleccionados en el paso anterior. Luego, los circones serán analizados utilizando el equipo de LA-ICP-MS.



Figura 14. Preparación de Discos Epoxi conteniendo Circones.

3.3.4. Métodos de análisis geoquímicos y mineralógicos

3.3.4.1. Análisis en Microsonda Electrónica (EPMA)

Es un método cuantitativo y cualitativo no destructivo, que se puede aplicar en una amplia gama de campos de investigación como la geoquímica, mineralogía, geocronología, bioquímica, y muchos más campos. El EPMA (figura 15) es útil para obtener la concentración de elementos presentes en un mineral o muestra de roca. Es una técnica que permite el análisis de varios elementos, ya sea desde el B hasta el U, con excepción del H y He. Los resultados obtenidos, se pueden mostrar como porcentajes de elementos u óxidos.

El funcionamiento del EPMA, consiste en el bombardeo de las muestras con un haz de electrones, para luego recolectar los fotones de rayos X emitidos por el material analizado. La composición de las muestras puede ser identificado fácilmente, gracias a las longitudes de onda de los rayos X emitidos, generando así espectros de características únicas de cada material (Fuente: sitio web de CAMECA).

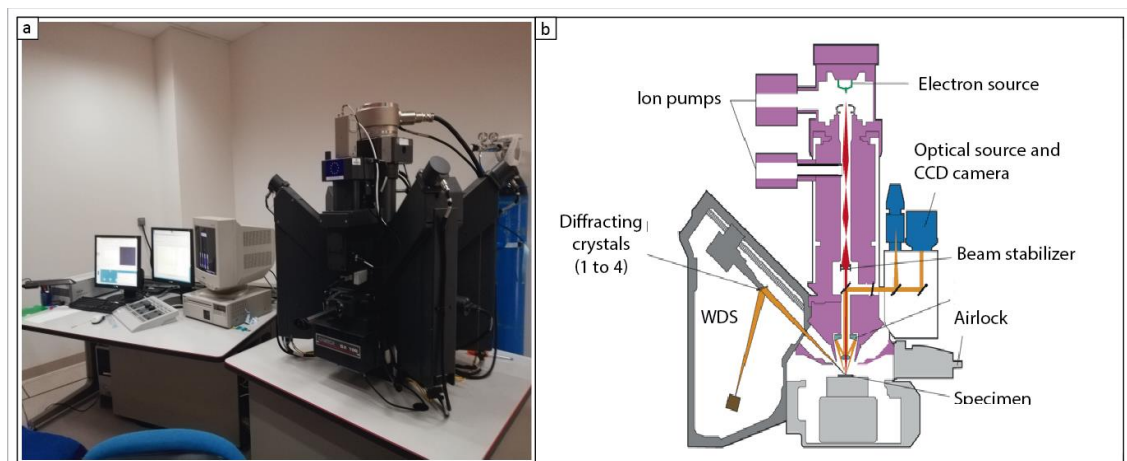


Figura 15. Equipo de Análisis de Microsonda Electrónica (EPMA). **a)** Equipo de Análisis de Microsonda Electrónica modelo SX 100 del Laboratorio de Magmas y volcanes-Francia. **b)** Configuración del EPMA. Tomado de “Introduction to EPMA”, por CAMECA.



Aplicación al proyecto de investigación

Para llevar a cabo el análisis en el EPMA, se identifica previamente los componentes juveniles y cristales en secciones delgadas de rocas (ignimbritas). Los resultados que se obtienen del análisis de los componentes juveniles (es decir, pómez, fragmentos de vidrio), son procesados y representados en un diagrama de Alcalis totales vs Sílice (TAS) (según Le Bas et *al.*, 1986), con el objetivo de clasificar geoquímicamente las rocas volcánicas (en nuestro caso las ignimbritas de la región OCM). También, se han generado diagramas de variación Harker (Harker, 1909), para comparar el contenido de SiO₂ vs otros óxidos (i.e. Al₂O₃, Na₂O, Fe₂O₃, K₂O, MgO, TiO₂, CaO y P₂O₅). Los diagramas Harker, se utilizan para determinar si las variaciones observadas son el resultado de procesos petrogenéticos como cristalización fraccionada, asimilación, fusión parcial y mezcla de magma (Wilson M., 1989, Rollinson, 1993).

Con los resultados que se obtienen del análisis de cristales, se hace el cálculo de fórmulas estructurales. El cálculo de fórmulas estructurales consiste en traducir las composiciones en % peso de óxido a fracción molar, teniendo en cuenta la fórmula de la arquitectura de cada mineral. Los resultados de los cálculos, se grafican en diagramas ternarios para la clasificación de feldespatos y piroxenos, mientras que los anfíboles son clasificados según el contenido de Ca, y las biotitas son distinguidos en el diagrama ASFE (Annite-Siderofilita-Flogopita-Eastonita).

Análisis de componentes de ignimbritas

Para realizar los análisis con el EPMA, es necesario identificar primero los componentes juveniles (i. e. pómez, fragmentos de vidrio, vidrio), y los minerales (i. e. feldespatos, anfíboles, piroxenos, biotitas, etc). La identificación de los componentes juveniles y de los minerales, se realiza a través de estudios en secciones delgadas y con

el uso de microscopios petrográficos. Posteriormente se realiza el análisis de las muestras con el uso de la microsonda electrónica (figura 16).

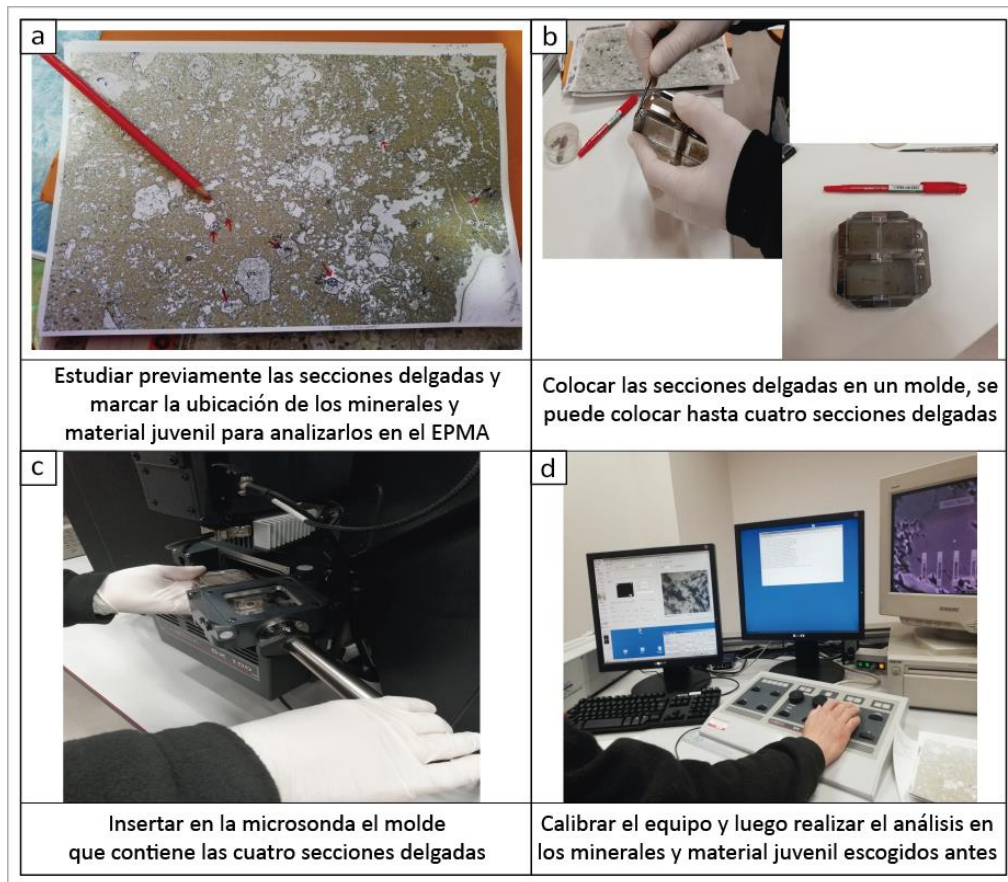


Figura 16. *Análisis de Componentes con EPMA.* Proceso de análisis de componentes juveniles (pómez, vidrio) y cristales, con el uso del EPMA.

3.3.4.2. Química de elementos mayores y traza

Preparación de muestras para análisis de elementos mayores y elementos traza

En esta etapa, previamente se ha elegido material juvenil (pómez o vidrio) contenido en las muestras de ignimbritas. Posteriormente, las muestras de pómez o vidrio son molidas y preparadas (figura 17) para un posterior análisis químico de elementos mayores.

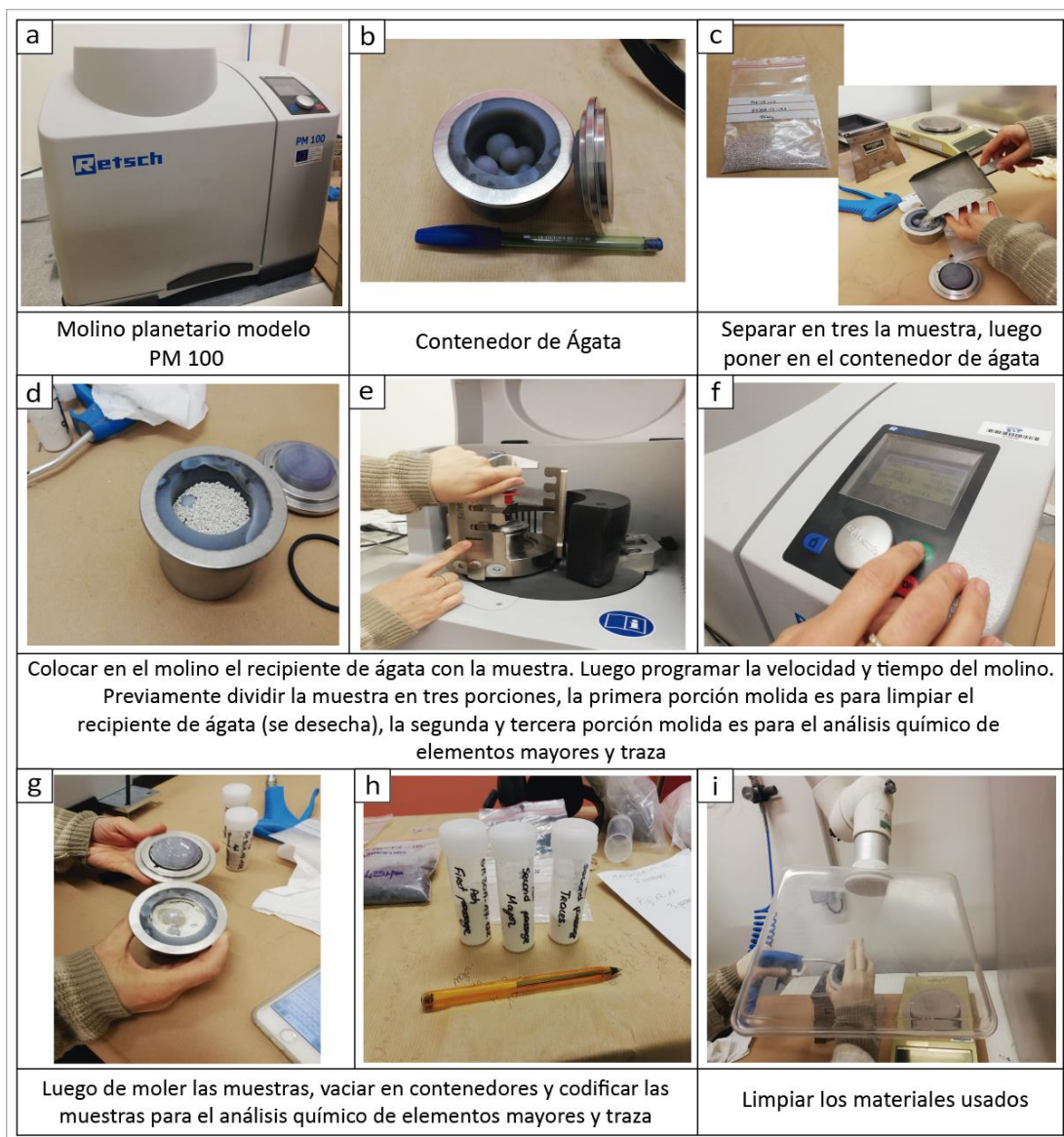


Figura 17. *Preparación de Muestras para Análisis de Elementos Mayores.*

Análisis por espectrometría de emisión atómica de plasma acoplada inductivamente (ICP-AES)

La técnica ICP-AES se ha utilizado para analizar simultáneamente varios elementos mayores que componen las muestras de ignimbritas. Para ello, previamente las muestras experimentan un proceso de fusión alcalina con el uso de un horno de inducción (figura 18b). En la figura 18a, se muestra el equipo ICP-AES del Laboratorio de Magmas y Volcanes - Francia (LMV).

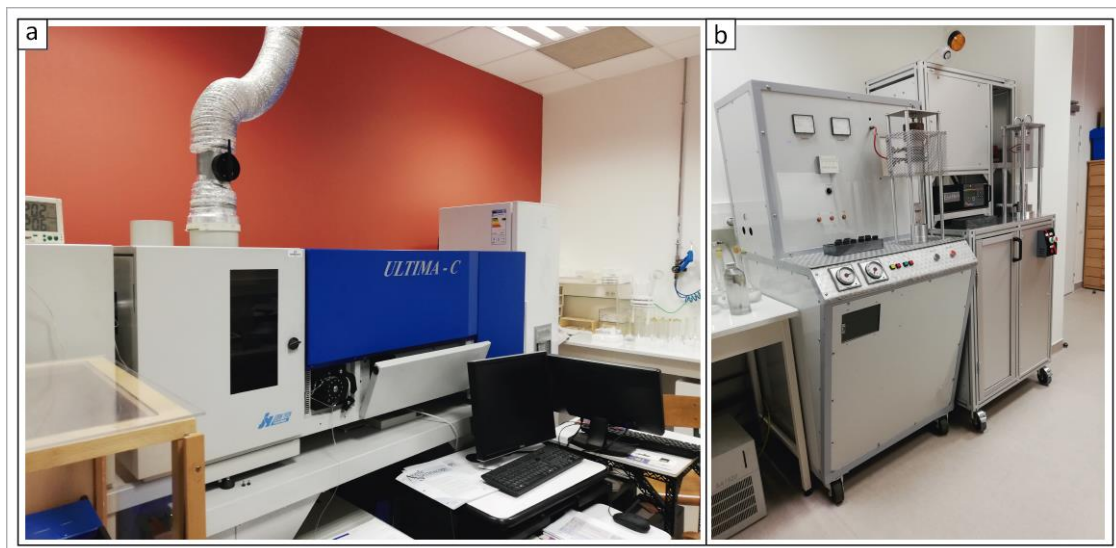


Figura 18. *Equipos para Análisis de Elementos Mayores.* **a)** Espectrómetro de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES). **b)** Horno de Inducción. Ambos equipos se encuentran en las instalaciones del LMV-Francia.

Análisis por fusión alcalina con LiBO_2

Este proceso consiste en disolver la muestra en un fundente derretido con la ayuda de un horno de fusión. En este proyecto de investigación se usó el metaborato de litio LiBO_2 , para disolver los principales minerales formadores de roca. En la figura 19, se explica el procedimiento seguido en la etapa de fusión de muestras.

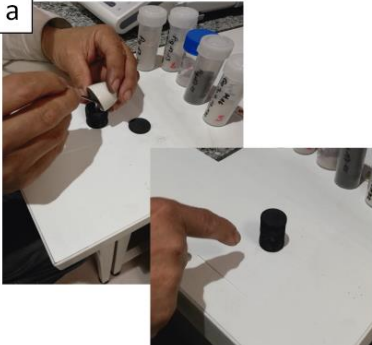


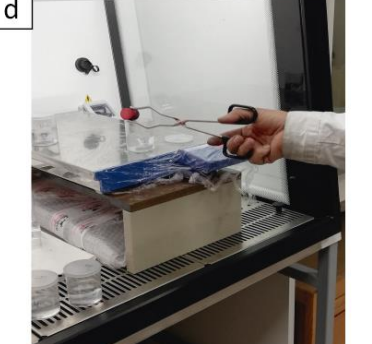


		
<p>En un recipiente de porcelana, mezclar 100 mg de muestra con 300 mg de fundente de LiBO_2. Luego colocar la mezcla en un crisol de grafito de 25 mm de diámetro</p>	<p>Colocar el crisol de grafito en un horno de inducción (2kW) durante 5 min a aproximadamente 100°C</p>	<p>Se forma una perla producto de la fusión</p>
		
<p>Colocar la perla en un vaso de precipitados de poliestireno desechable. El vaso de precipitados contiene una solución de 50 ml de HNO_3. Luego, dejar la solución agitándose con una barra magnética durante 15 min</p>		<p>Finalmente filtrar la solución con ayuda de papel filtrante, para eliminar las partículas de grafito. Luego, agregar 200 ml de 1 M HNO_3</p>

Figura 19. *Proceso de Disolución de Muestras por Fusión Alcalina.*

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. MARCO GEOGRÁFICO

4.1.1. Ubicación del área de estudio

El área de estudio se ubica en el territorio de los cañones de Ocoña – Cotahuasi – Maran (OCM), en los departamentos de Arequipa y Ayacucho. Geográficamente se localiza entre 14°S - 16°S y 74°O - 72°O (figura 20), entre la Cordillera Occidental y el lado este del Altiplano, en el sur del Perú.

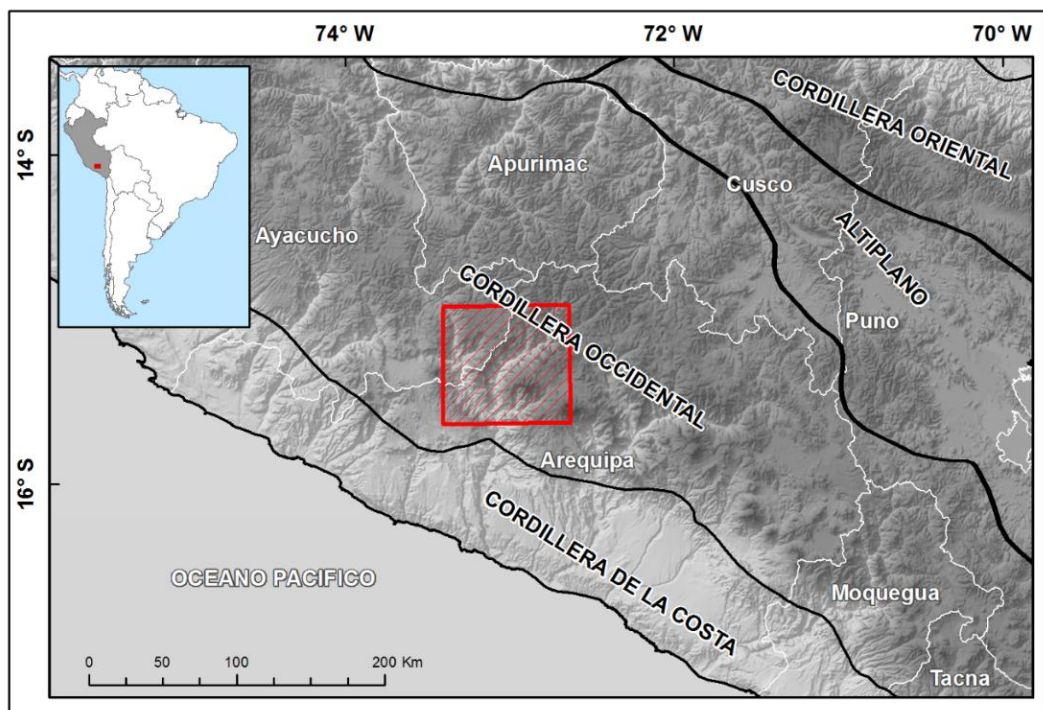


Figura 20. *Ubicación Geográfica del Proyecto.* Se observa los dominios estructurales en el sur del Perú. El recuadro marcado con color rojo muestra la región de los cañones Ocoña – Cotahuasi - Maran, que está localizado principalmente en la Cordillera Occidental.

El Altiplano se caracteriza por presentar un clima semi-hipeárido (Schildgen *et al.*, 2007), y esto ayuda a la preservación de las capas de ignimbritas. En la figura 20, se muestra los principales dominios estructurales en el sur del Perú, tales como la Cordillera

de la Costa, Cordillera Occidental, Altiplano y la Cordillera Oriental. Los dominios estructurales fueron establecidos y recopilados por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) del Perú, en base a estudios previos acerca de la geología y estructuras geológicas de los Andes Centrales (Mégard, 1967, 1978; Douglas, 1920, 1921; Wilson, 1963a y otros).

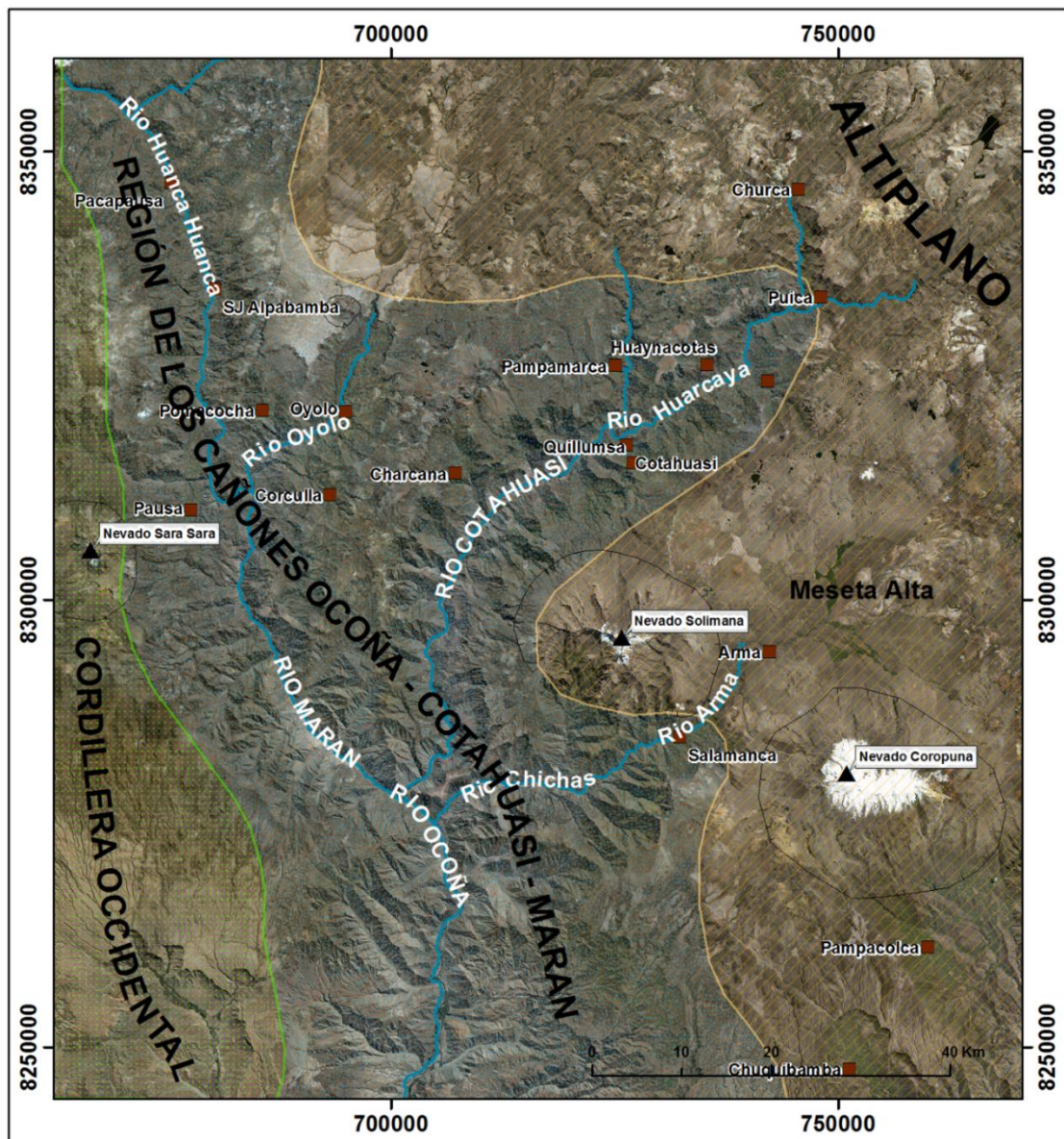


Figura 21. Imagen Satelital del Área de Estudio. En la imagen satelital se observan los principales ríos Ocoña – Cotahuasi – Maran y sus respectivos cañones.

En el centro de la figura 21, se muestra el territorio de los cañones de OCM, los cuales son drenados por los ríos Cotahuasi, Maran y Ocoña. Al noreste del mapa se

observa la meseta alta del altiplano, donde se ubican los nevados de Coropuna y Solimana. Así mismo, al oeste de la región OCM se ubica el Nevado Sara Sara.

4.1.2. Accesibilidad al área de estudio

Al área de estudio se puede acceder por vía aérea y vía terrestre (tabla 3). El primer tramo Lima – Arequipa, se puede realizar por vía aérea con una duración de 1 h 30 min, también se puede realizar por vía terrestre y tiene una duración de 17 horas aproximadamente.

El segundo tramo de recorrido es Arequipa – Cañón de Cotahuasi, este tramo se hace por vía terrestre, recorriendo el trayecto del valle de Majes hacia el distrito de Pampacolca y posteriormente ir camino hacia el distrito de Cotahuasi.

Tabla 3. *Accesibilidad al Área de Estudio*

Tramo	Transporte	Distancia (Km)	Tiempo
Lima - Arequipa	Aéreo	-	1 h 30 min
	Bus	1013	16 h 58 min
Arequipa – Majes	Camioneta	98.9	1 h 58 min
Majes – Pampacolca	Camioneta	160	3 h 22 min
Pampacolca - Cotahuasi	Camioneta	129	3 h 7 min

4.2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

En el norte de la región OCM, el basamento está formado por rocas metamórficas proterozoicas del complejo basal de la Costa. El basamento Proterozoico está cubierto por formaciones sedimentarias marinas del Mesozoico (Jurásico y Cretácico) y por rocas ígneas intrusivas del batolito costero (Bellido y Narvaez, 1960; Benavides, 1962; Cobbing *et al.*, 1977; Dalmarayac *et al.*, 1977; Pecho Gutierrez, 1983; Olchausky y Dávila, 1994; Ramos, 2008; otros). Las formaciones sedimentarias del Mesozoico y las



formaciones intrusivas, están cubiertas por secuencias volcánicas del Grupo Tacaza, el cual fue descrito por Newell (1949) en la mina Tacaza del departamento de Puno. En el área OCM, el grupo Tacaza cubre rocas sedimentarias de edad Cretáceo y Terciario (figura 22) (Pecho Gutiérrez, 1983; Olchauski y Dávila, 1994).

La actividad volcánica continuó durante el Neógeno y Cuaternario, el cual estuvo acompañado de la erupción de ignimbritas. Así mismo, se han desarrollado varios arcos volcánicos que coinciden con el período de 30 Ma, período de mayor elevación y engrosamiento de los Andes centrales (Tosdal *et al.*, 1984; Sébrier *et al.*, 1988; Garzione *et al.*, 2008; Mamani *et al.*, 2010; Thouret *et al.*, 2007, 2016). En el sur del Perú, Mamani *et al.* (2010), propusieron una nomenclatura estratigráfica para las secuencias volcánicas de los últimos 30 Ma, considerando arcos volcánicos de la siguiente manera: Arco Tacaza (30 – 24 Ma), Huaylillas (24 - 10 Ma), Barroso Inferior (10-3 Ma), Barroso Superior (3-1 Ma) y el arco volcánico activo (<1 Ma).

Así mismo, en la región OCM Thouret *et al.* (2007, 2016) propusieron una estratigrafía detallada, para la actividad volcánica que comienza en el Oligoceno tardío y continúa durante el Neógeno y Cuaternario. Además, identificaron 12 capas de ignimbritas y depósitos de CDP, como sigue: Nazca 1, Nazca 2, Alfabamba, Majes, Chuquibamba, Huarcaya, Caraveli, Arma, Sencca Inferior, Sencca Superior, Lomas y Capilla (figura 23). Otro trabajo de investigación realizado por Swanson *et al.* (2004), proporciona datos geocronológicos de secuencias volcánicas en la región de Orcopampa, que es cercana a la región OCM.

COLUMNA GEOLOGICA GENERALIZADA DE LOS CUADRANGULOS DE CHUQUIBAMBA Y COTAHUASI (Olchauski y Dávila, 1994)							
ERA	SIST.	SERIE	UNIDADES LITO-ESTRATIG.	GROSOR en mts.	LITOLOGIA	DESCRIPCION	
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE	Gpo. ANDAHUA			Lavas basálticas-andesíticas.	
			Dep. ALUVIALES			Gravas polimícticas y cubierta vegetal.	
		PLEISTOCENO	Dep. GLACIOFLUVIALES			Gravas en matriz arenosa.	
			Dep. MORRENICOS			Gravas en matriz Limo-Lítica.	
	Gpo. BARROSO		SECUENCIA SUPERIOR ba2	100		Lavas andesíticas, grises o negras.	
			SECUENCIA INFERIOR ba1	100		Lavas andesíticas, dacítica y basáltica y basáltica grises o negras.	
	TERCIARIO	PLIOCENO	Fm. SENCCA	150		Tobas grises, blancas, amarillas, rosadas	
			Fm. HUAYLILLAS			Tobas, dacíticas riolíticas.	
		MIOCENO	Fm. ALPABAMBA	800		Tobas brechoides, riolíticas dacíticas	
			Gpo. TACAZA		1500		Ignimbritas, aglomerados y brechas volcánicas, lavas.
		OLIGOCENO					
		EOCENO	Fm. PARACAS	200		Lutitas, areniscas calcáreas amarillas.	
			Fm. CARAVELI	500		Conglomerados y areniscas.	
PALEOCENO		Fm. SOTILLO	250		Areniscas finas y limoarcillíticas rojas		
	Fm. HUANCA	1000		Areniscas microconglomerádicas, grauwaca gris. conglomerados. Intrusivos menores			
MESOZOICO	CRETACICO	CENOMANIANO				Calizas grises	
		ALBIANO	Fm. ARCURQUINA	200		Complejo Bella Unión.	
	APTIANO	Fm. MURCO	250		Areniscas, grises, blancas a rojizas. Limolita verde		
	NEOCOMIANO	Gpo. YURA		1500		Superunidad Tiabaya To, gd. Areniscas, grises blanquesinas. Lutitas y calizas grises. Cuarzitas, limolitas calcáreas. Super unidad Incahuasi-gd, To, Mzgr.	
	JURASICO	MEDIO	Fm. SOCOSANI	600		Calizas, limoarcillitas, areniscas.	
PALEOZOICO	INFERIOR	Gpo. ONGORO	1000		Pizarras, negras. Esquitos grises claros a verdes		
		PRECAMBRICO	COMPLEJO BASAL	1500		Gneises. Anfibolitas. Metasedimentos	

Figura 22. Estratigrafía Generalizada de las Áreas de Cotahuasi y Chuquibamba. Adaptado de “Columna geológica generalizada de los cuadrángulos de Chuquibamba y Cotahuasi”, por Olchauski y Dávila (1994), Boletín N° 50.

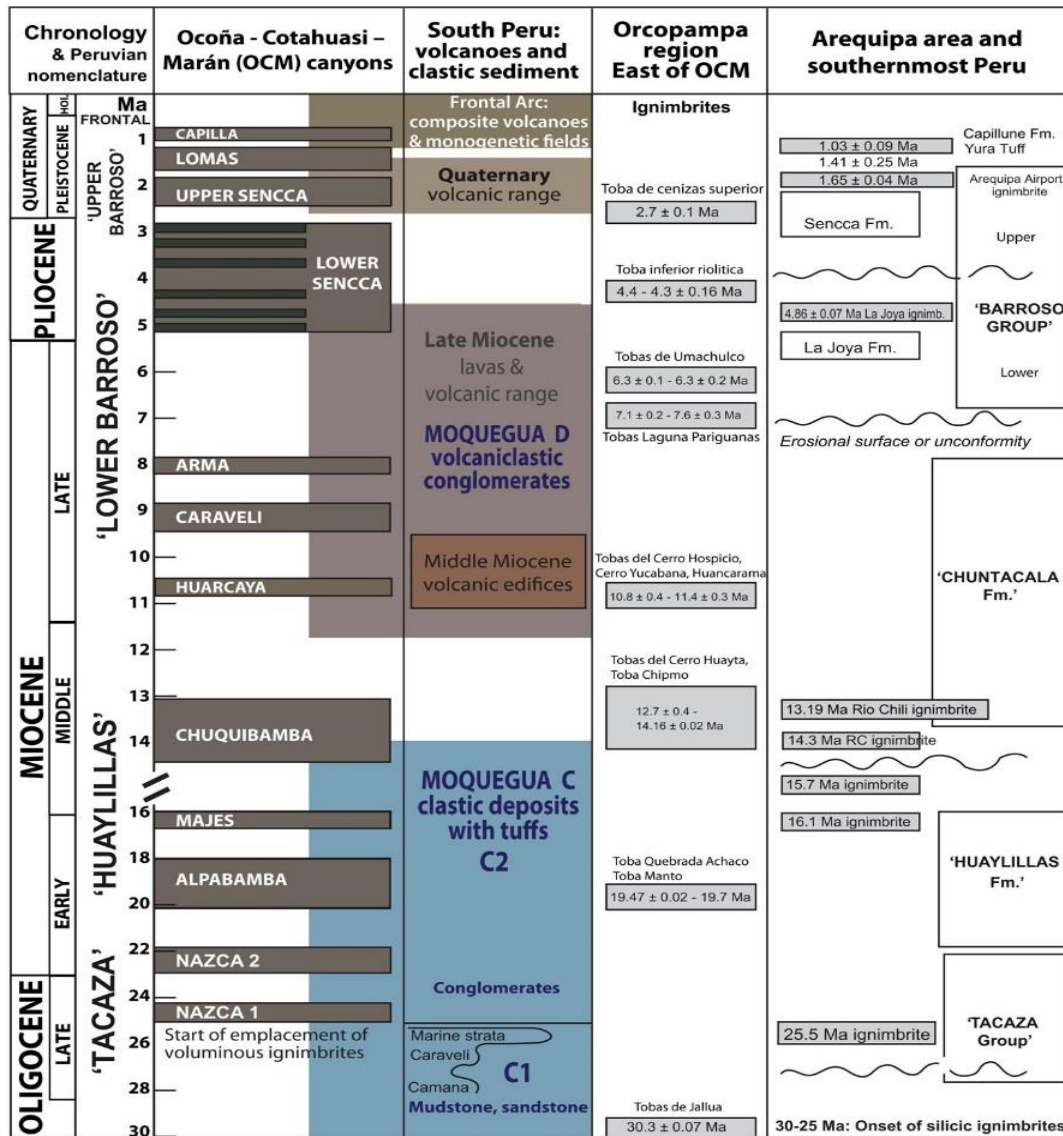


Figura 23. Estratigrafía de la Región OCM. Tomado de “A 25 my chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: implications for the volcanic history of the Central Andes”, por Thouret et al. (2016), Journal of the Geological Society.

4.2.1. Vulcanismo Neógeno y Cuaternario en la región de Ocoña-Cotahuasi-Maran (OCM)

En la región OCM, las secuencias volcánicas afloran debido a la fuerte erosión e incisión generada por los ríos Cotahuasi, Marán y Ocoña. El vulcanismo inició en el Mioceno temprano con el Grupo Nazca, el cual fue dividido en dos secuencias por Noble *et al.* (1979): 1) Nazca inferior, que consiste de rocas sedimentarias (conglomerados gruesos intercalados con areniscas; y 2) Nazca superior, compuesto por rocas



piroclásticas (ignimbritas riolíticas) conocidas como “Tobas de Nazca”. Además, para las “Toba de Nazca”, Noble *et al.* (1979) reportaron edades entre 22 – 18 Ma. Así mismo, Thouret *et al.* (2007, 2016) describieron dos Tobas Nazca: Nazca 1 (24 – 25 Ma) y Nazca 2 (22-23 Ma) (figura 23).

El **Mioceno temprano al Mioceno medio**, ha estado marcado por el emplazamiento de la “Formación Alpbamba”, la cual fue descrita por primera vez por Guevara y Dávila (1983) en un tramo cercano a la localidad de San Javier de Alpbamba (lado este del cañón del Río Huanca Huanca, río que conecta con el cañón del río Marañón). Litológicamente, Guevara y Dávila (1983) describieron la Formación Alpbamba compuesta por tobas dacíticas a riolíticas amarillentas intercaladas con areniscas tobáceas, estimando un espesor de aproximadamente 1000 m (figura 24). Así también, Thouret *et al.* (2016), reportaron una edad de 20.23 ± 0.17 Ma para la base de las ignimbritas Alpbamba, en la localidad de Puica. El tope de la Formación Alpbamba es comparado con las edades de la Toba Quebrada Achaco (19.47 Ma) y Toba Manto (19.7 Ma), que fueron reportados en la región de Orcopampa por Swanson *et al.* (2004).

Tosdal *et al.* (1981) han reportado otras ignimbritas de edad Mioceno temprano a medio, con rangos de edad entre 22.8 Ma y 17.6 Ma, nombrándolos como “Formación Huaylillas”. La Formación Huaylillas fue descrita por primera vez por Wilson (1963b) en el cuadrángulo de Huaylillas, departamento de Tacna, donde la Formación Huaylillas sobreyace a los Grupos Moquegua y Nazca, y es cubierto por el Grupo Barroso. Wilson (1963b) separa la Formación Huaylillas en tres miembros, que consisten generalmente en tobas dacíticas a riolíticas de color blanco rojizas. Muchos geólogos peruanos han considerado como “Formación Huaylillas”, aquellas secuencias volcánicas ubicadas en el borde suroeste de la cordillera occidental (Pecho Gutiérrez, 1983; Olchanski y Dávila,

1994). Así mismo, Mamani *et al.* (2010) consideraron dentro del Arco Huaylillas, aquellas secuencias volcánicas con edades entre 24 Ma y 10 Ma.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL AREA DE CORACORA-PACAPAUZA (Guevara y Dávila, 1983)					
ERA	SIST.	SERIE	UNIDAD Y DESCRIPCION	GROSOR Mts.	
Cenozoico	CUATERNARIO	Reciente	Depósitos recientes.- Arenas, gravas, limos.	?	
		PLEISTO-CENO	Grupo Barroso.- Andesitas y andesitas basálticas, piloxáticas, fluidal, subofítica, que se expone como estrato-volcán, lava-domo y domo.	200	
	PLIOCENO	Grupo Sencca.- Tobas dacíticas y riolíticas, cremas a moradas, fluidal, porfirítica, vitroclástica, piroclástica; que afloran conformando mesetas.	100		
		Fm. Saycata.- Lavas andesíticas gris a gris oscuras, porfiríticas, fluidal microlítica.	200		
		Fm. Aniso.- Intercalación de areniscas tobáceas gris a verde, con areniscas conglomerádicas que engloba fragmentos de tobas. La estratificación es delgada y definida.	500		
		Fm. Alpabamba.- Tobas brechosas amarillo-verdosas, dacíticas a riolíticas, en bancos gruesos y compactos. En la se observa un conglomerado polimíctico.	1000		
	TERCIARIO	MIOCENO	Grupo Tacaza.- Lavas afíricas y porfiríticas, piroclásticas, intercalados con sedimentos tobáceos clásicos.	± 800	
		Grupo Yura.- Arenisca blanca cuarzosa de grano medio a fino.	± 500		
		Meso-zoico	Cret.	Inf.	
			Jura.	Sup.	

Figura 24. Estratigrafía del Área Coracora-Pacapausa. Adaptado de “Estratigrafía y Tectónica Terciaria del área de Coracora-Pacapausa”, por Guevara y Dávila (1983), Bol. Sociedad Geológica del Perú.

El **Mioceno medio** ha estado marcado por el emplazamiento de las ignimbritas Chuquibamba (Thouret *et al.*, 2016, 2017). Cerca de la localidad de Chuquibamba, describieron tobas ricas en cristales y con pocos líticos, así mismo en el acantilado de Cuno Cuno describieron facies de toba de lapilli ricas en cenizas. En la región OCM, las ignimbritas Chuquibamba son cubiertas por las ignimbritas Sencca y por flujos de lava del Grupo Barroso.



Para las ignimbritas Chuquibamba, Thouret *et al.* (2016, 2017) asignaron un rango de edad entre 13 Ma y 14 Ma. Así mismo, Noble *et al.* (1974) reportaron una edad de 13.8 ± 0.3 Ma cerca al pueblo de Chuquibamba. Se han reportado otras edades en regiones cercanas a la región OCM, por ejemplo, en la región de Orcopampa, Swanson *et al.* (2004) obtuvieron una edad de 14.16 ± 0.025 Ma para las Tobas Chipmo. Otro trabajo realizado por Paquereau *et al.* (2006), quienes estudiaron las ignimbritas en el cañón del Río Chili y reportaron una edad de 13.19 ± 0.09 Ma. Así mismo, al norte de la región OCM, en el Río Visca y en el valle Mayobamba, Brandmeier *et al.* (2014) obtuvieron edades de 13.99 ± 0.04 Ma y 14.09 ± 0.05 Ma. Por último, recientemente, en la mina Inmaculada, ubicado a 14 Km NEE de la localidad de San Javier de Alfabamba (SJA), Cuellar (2019) reportó una edad promedio $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 13.2 Ma, para las ignimbritas riolíticas Huallhua.

El **Mioceno medio a tardío** ha estado marcado por el emplazamiento de tres capas de ignimbritas y depósitos de CDP, denominados por Thouret *et al.* (2007, 2016, 2017) como Ignimbritas Huarcaya (10 Ma), Ignimbritas Caraveli (9.35 – 8.9 Ma) y depósitos de CDP Arma (7 Ma). **1)** Las ignimbritas Huarcaya, consisten de secuencias de tobas de lapilli ricas en ceniza, ubicados en el Río Huarcaya, cercano a las localidades de Puica y Chulca. Donde, las ignimbritas Huarcaya rellenan paleo-valles cortados en la Formación Alfabamba. Thouret *et al.* (2016, 2017) reportaron una edad de 10.78 ± 0.13 Ma para las ignimbritas Huarcaya. Esta edad puede ser comparado con las edades obtenidas para las Tobas del Cerro Hospicio (10.8 ± 0.4 Ma y 11.4 ± 0.3 Ma) de la región de Orcopampa, que fueron estudiados por Swanson *et al.* (2004). **2)** Las Ignimbritas Caraveli, fueron descritas por Thouret *et al.* (2007) como una generación de ignimbritas no detectadas, en el suroeste y oeste de la región OCM, compuesto por ignimbritas densamente soldadas y con edades entre 9.4 Ma y 8.9 Ma. Otros autores, como Sébrier *et al.* (1979) describieron un vulcanismo ácido a intermedio a lo largo del Río Caravelí, y Tosdal *et al.* (1981)



reportaron ignimbritas de la Formación Chuntacala con edades entre 14.2 Ma y 8.9 Ma. Las Ignimbritas Caraveli se han emplazado en paleo-topografías cortadas en la Formación Huaylillas (Sébrier *et al.*, 1979; Tosdal *et al.*, 1981). **3)** Los depósitos de CDP de Arma han sido descritos por Thouret *et al.* (2016) a lo largo del Río Arma, consisten en depósitos de caída, depósitos de oleadas piroclásticas con estratificación cruzada y depósitos de flujos piroclásticos. Además, Thouret *et al.* (2016, 2017) reportaron edades de 7.97 ± 0.10 Ma y 7.99 ± 0.04 Ma para los CDP de Arma. Las edades reportadas por Thouret *et al.* (2016, 2017), pueden correlacionarse con las edades de Swanson *et al.* (2004), quienes reportaron edades entre 7.1 Ma y 6.3 Ma, para las Tobas de la Laguna Pariguanas y para las Tobas Umachulco.

El **Plioceno al Pleistoceno temprano** se caracterizó por el emplazamiento de la Formación Sencca. La Formación Sencca fue descrita por primera vez por Mendivil (1965) en la localidad epónima de Sencca, que consiste de tobas riolíticas y riodacíticas. Luego, Tosdal *et al.* (1981), definieron la Formación Sencca compuesta por ignimbritas riolíticas con una edad de 6.5 ± 0.3 Ma. Otros trabajos realizados por Thouret *et al.* (2007, 2016) en la región OCM, describieron las Ignimbritas Sencca inferior (5.13 Ma - 2.82 Ma) y las ignimbritas Sencca superior (2.20 Ma - 1.80 Ma). **1)** Las Ignimbritas Sencca inferior, consisten en unidades de flujo blanquecinas no soldadas, las cuales se encuentran depositadas en depresiones, en las crestas y flancos de los valles. Las edades de las Ignimbritas Sencca inferior reportadas por Thouret *et al.* (2007, 2016), pueden ser comparadas con las edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 4.89 Ma y 4.78 Ma reportadas por Paquereau *et al.* (2006) para las “Ignimbritas La Joya”. **2)** Las Ignimbritas Sencca superior llenan valles poco profundos, cortados en las Ignimbritas Chuquibamba y en lavas del Grupo Barroso, además consisten de ignimbritas rosadas o amarillentas conteniendo grandes fragmentos de pómez (Thouret *et al.*, 2007, 2016). El tope de las Ignimbritas Sencca superior, puede



correlacionarse con la edad promedio $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 1.65 Ma, reportado por Paquereau *et al.* (2006) para las “Ignimbritas Aeropuerto Arequipa (IAA)”. Así mismo, Vatin-Perignon *et al.* (1996) obtuvieron una edad de huellas de fisión de 2.42 ± 0.11 Ma para el “Sillar de Arequipa”, que se ubica justo debajo de la IAA estudiado por Paquereau *et al.* (2006). Sin embargo, la edad reportada por Vatin-Perignon *et al.* (1996), debe ser redatado para una mejor correlación con la edad asignada por Paquereau *et al.* (2006).

Durante el **Pleistoceno**, se han desarrollado dos capas de ignimbritas, las cuales han sido descritas por Thouret *et al.* (2016, 2017), y llamadas “CDP Lomas” e “Ignimbritas Capilla”. **1)** Los depósitos de CDP Lomas, consisten en piroclastos ricos en pómez, que se encuentran en el cerro “Las Lomas”, cerca de la unión de los Ríos Ocoña y Chichas, y a lo largo del cañón de Cotahuasi. Thouret *et al.* (2016) reportaron edades entre 1.56 Ma y 1.26 Ma para los depósitos CDP Lomas, los cuales están cubiertos por flujos de lava con edades < 1.3 Ma. **2)** Las Ignimbritas Capilla contienen facies de vitrófiros en su base y otras facies masivas de toba de lapilli, cerca de las localidades de Capillune y Culipampa. Las Ignimbritas Capilla sobreyacen a las Ignimbritas Sencca inferior en los valles, así mismo son cubiertos por flujos de lava de edad Pleistoceno, en el norte de la región OCM. Thouret *et al.* (2016) reportaron una edad de 0.91 ± 0.05 Ma, considerando estas ignimbritas de edad Pleistoceno.

Durante los períodos del Mioceno tardío, Plioceno tardío y Cuaternario, el Grupo Barroso se ha desarrollado en la región OCM. Wilson y García (1962) inicialmente lo denominaron como “Formación Barroso”. Luego Mendivil (1965) le asignó una categoría de grupo. El Grupo Barroso consiste de un complejo volcánico de conos viejos erosionados que forman la Cordillera del Barroso con dirección NO-SE. Wilson (1963b), consideró al Grupo Barroso como un evento post-Huaylillas, que es cubierto por unidades del Oligoceno y Mioceno. Luego, Pecho Gutierrez (1983) y Olchauski y Dávila (1994)



dividieron el Grupo Barroso en dos secuencias (secuencia inferior y secuencia superior) (figura 22). Las secuencias superiores del Barroso consisten en derrames de lavas, ligeramente horizontales, que cubren con discordancia angular el Grupo Tacaza y cubren en discordancia erosional las Formaciones Alpabamba, Huaylillas y Sencca. Las secuencias superiores del Barroso consisten de lavas andesíticas intercaladas con tobas y brechas volcánicas.

Thouret *et al.* (2016) presentaron una cronología detallada de los flujos de lava en la región OCM, como sigue: **1)** fase del Mioceno tardío (7.3 – 5.3 Ma), en este rango de edad las Ignimbritas de Sencca inferior (5.13 – 2.82 Ma) sobreyacen a los flujos de lava; y **2)** fase de Volcanes del Cuaternario, en este rango los flujos de lava se intercalan con capas de las Ignimbritas Sencca superior (2.2 – 1.8 Ma), y con los depósitos de CDP Lomas (1.56 – 1.26 Ma). La fase de Volcanes Cuaternarios ha sido dividido en dos categorías: **1)** volcanes de Cuaternario (2.27 – 1.30 Ma), que están mejor preservados que los edificios volcánicos de Mioceno tardío, y **2)** la cadena de volcanes del Pleistoceno a la actualidad (<1.3 Ma), que consiste de varios conos compuestos y domos volcánicos (p. ej. Nevados Coropuna, Firura, y Sara Sara). De esta manera, Thouret *et al.* (2016) aportaron una estratigrafía refinada de los arcos volcánicos presentado anteriormente por Mamani *et al.* (2010).



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. LITOESTRATIGRAFÍA EN EL NORTE DE LA REGIÓN OCM

5.1.1. Estratigrafía y cronoestratigrafía

Basado en el trabajo de campo, análisis de litofacies y datación de cristales de circón de muestras de ignimbritas, se han identificado siete capas de ignimbritas y dos depósitos de CDP. En esta sección, se ha descrito en orden cronológico (desde el más antiguo al más joven), las estructuras, las litofacies y las posiciones estratigráficas de las capas de ignimbritas y depósitos de CDP. Cada capa de ignimbrita y depósito de CDP, ha sido representado en columnas estratigráficas (figuras 28, 29, 32, 39, 40, 41 y 42) cuya ubicación aproximada se indica en la figura 25.

5.1.1.1. Ignimbritas Alpabamba (Nm-al)

Las ignimbritas Alpabamba fueron descritas por primera vez y nombradas como “Formación Alpabamba” por Guevara y Dávila (1983), en el pueblo epónimo de San Javier de Alpabamba (SJA), lado este y aguas arriba del cañón del Río Huanca-Huanca. Donde describieron cerca de 1000 m de espesor, de secuencias sobreestimadas de tobas dacíticas a riódacíticas, de color blanco amarillentas e intercaladas con areniscas tobáceas. Las ignimbritas Alpabamba también fueron descritas y datadas por Thouret *et al.* (2016), en el pueblo de Puica al norte del cañón del Río Huarcaya. Donde, Thouret *et al.* (2016), describieron y dataron unidades de flujo de las Ignimbritas Alpabamba, que consisten en depósitos masivos de flujos de tobas de pómez y lapilli, de color blanco a gris amarillento, con grado de soldadura entre endurecido a ligeramente soldados.

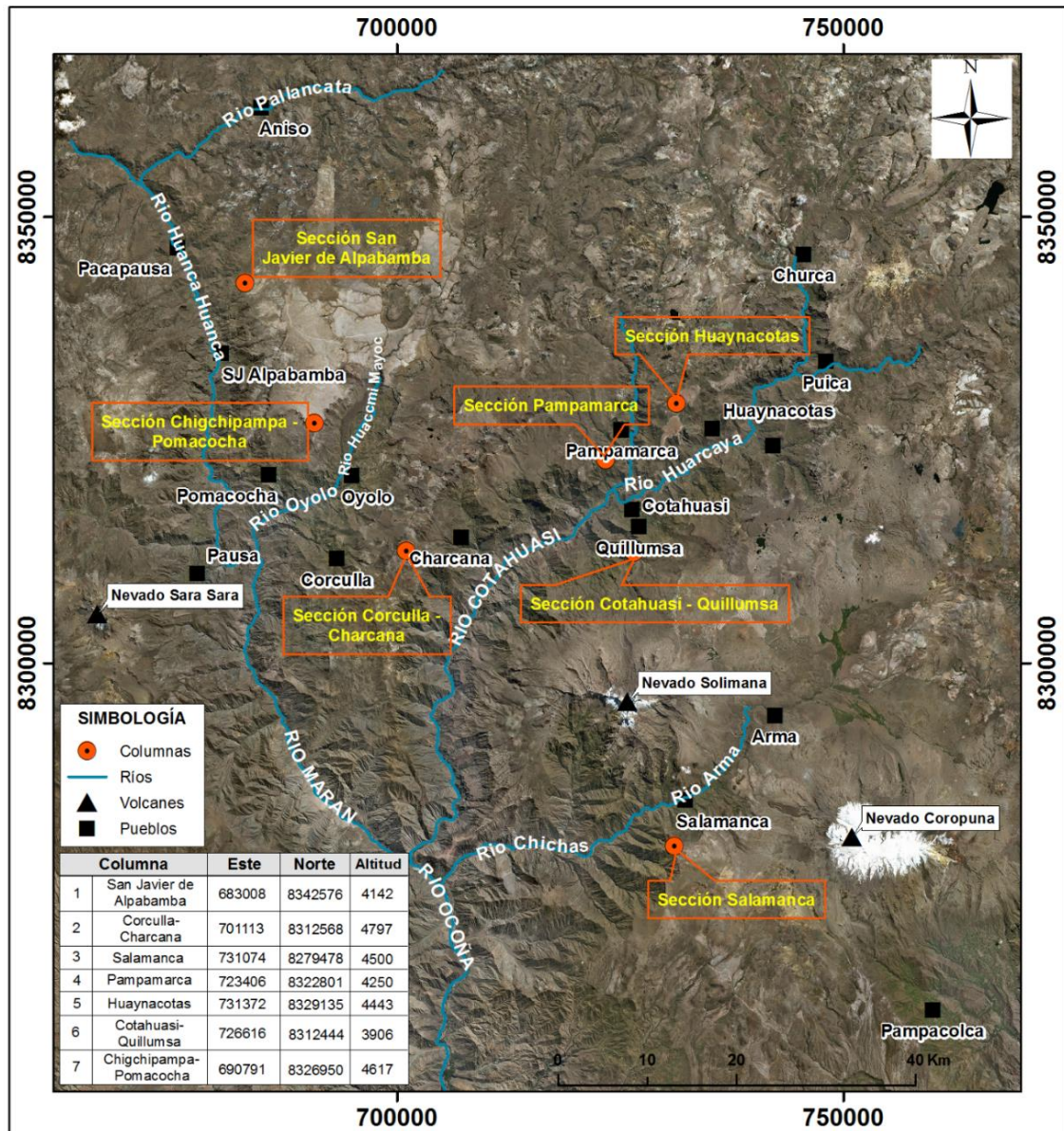


Figura 25. Ubicación de Columnas Estratigráficas y Principales Poblados en el Norte de la Región OCM.

En este trabajo de investigación, se ha reconocido las Ignimbritas Alpbamba en el SE del Río Huacmi Mayoc, a 3 Km al sur del pueblo de Oyolo, aguas arriba del cañón del Río Maran y el Río Oyolo. Donde, se ha descrito unos depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza ricas en cristales, de color blanco verdoso, con grado de soldadura endurecido (II) y un espesor aproximado de 100 m (figura 26). Las Ignimbritas Alpbamba, han sido representadas en la sección de Corculla-Charcana (figura 29), dónde las Ignimbritas Alpbamba sobreyacen a depósitos volcanoclásticos mapeados como

“Grupo Tacaza” por Martínez y Cervantes (2001). Así mismo, las Ignimbritas Alfabamba son cubiertas por depósitos de las Ignimbritas Sencca inferior y podrían estar cubiertas por depósitos de las Ignimbritas Chuquibamba.

En este trabajo, también se ha descrito la muestra PIG-13-21 que ha sido recolectada por Thouret en 2013, en el pueblo de Puica. La muestra descrita consiste de una toba de pómez y ceniza rica en líticos, de color gris rosado y grado de soldadura suelto a endurecido (I-II).

Se ha datado la muestra PIG-17-10, que fue colectado en el SE del Río Huaccmi Mayoc, y los resultados del método de datación U-Pb dieron una edad de 19.07 ± 0.14 Ma (tabla 7). El resultado obtenido se puede comparar con otras edades reportadas como: 19.7 y 19.47 ± 0.025 Ma en la región de Orcopampa; 20.13 ± 0.17 Ma en el pueblo de Puica y con otras dos edades de 18.23 ± 0.17 y 18.90 ± 0.50 Ma reportadas en dos poblados fuera de la región OCM (Swanson *et al.*, 2004; Thouret *et al.*, 2007, 2016).

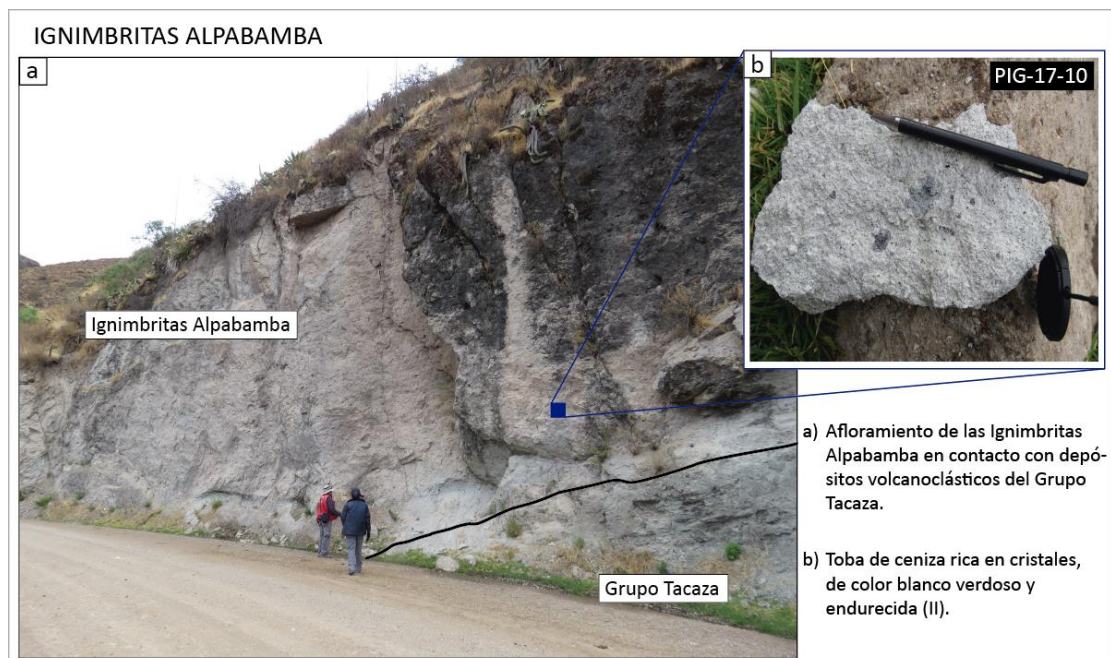


Figura 26. Afloramiento de las Ignimbritas Alfabamba. Depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza ricas en cristales, endurecidas, de color blanco verdoso, ubicados en el SE del Río Huaccmi aguas arriba del Río Oyolo, 3 km al sur del pueblo de Oyolo.

5.1.1.2. Ignimbritas Chuquibamba (Nm-chu)

En el norte de la región OCM, Thouret *et al.* (2016), describieron cerca de 80 m de litofacies de tobas ricas en cristales y pobres en líticos, fuertemente soldados, y de color rojo vino. Alrededor del Nevado Coropuna, al este del cañón del Río Arma, las Ignimbritas Chuquibamba son cubiertas por flujos de lava de edad Mioceno tardío y por las Ignimbritas Sencca (Thouret *et al.*, 2016).

En este proyecto de investigación, se describieron y dataron secuencias bien expuestas de las Ignimbritas Chuquibamba, ubicadas en el lado este del cañón del Río Huanca-Huanca, aguas arriba del pueblo de SJA. Donde se ha descrito cerca de 310 m de espesor de las Ignimbritas Chuquibamba, las cuales están representadas en la columna de la sección de San Javier de Alpabamba (figura 28). Así mismo, se ha identificado tres unidades de flujo (figura 27) que son: **1)** la unidad basal, que consiste en depósitos masivos de flujos de tobas ricas en cristales, con grado de soldadura de endurecido a ligeramente soldado (II-III) y que representa cerca de 80 m de espesor; **2)** la unidad intermedia, con cerca de 100 m de espesor, consiste en depósitos masivos de flujos de tobas de pómez y ceniza, con grado de soldadura de ligero a moderadamente soldado (III-IV); y **3)** la unidad superior, consiste en depósitos masivos de flujos de tobas ricas en pómez y ceniza, con un grado de soldadura de endurecido a moderadamente soldado (II-IV), y que representan cerca de 120 m de espesor. Cabe mencionar que entre las unidades intermedia y superior, se ha identificado depósitos volcanoclásticos, que consisten en areniscas tobáceas ricas en cristales y ceniza, de aproximadamente 10 m de espesor.

Las Ignimbritas Chuquibamba descritas aguas arriba del pueblo de SJA, sobreyacen a flujos de lavas andesíticas del Grupo Tacaza (anexo C.20), y hacia el norte del Río Huanca Huanca pueden estar cubriendo a rocas sedimentarias del Mesozoico. Así



mismo, son cubiertas por flujos de lavas andesíticas del Barroso inferior (anexo C.18) y por secuencias de ignimbritas blanquecinas del Sencca inferior.

Se ha realizado dataciones de cristales de circón con el método de datación U-Pb, en muestras obtenidas del lado este del cañón del Río Huanca Huanca, y los resultados dieron edades de: 14.57 ± 0.08 para la unidad inferior; 13.15 ± 0.11 Ma para la unidad intermedia; y 13.46 ± 0.12 Ma para la unidad superior (figura 28 y tabla 7). Las edades U-Pb obtenidas, pueden ser comparadas con el intervalo de edad entre 14.25 ± 0.08 Ma y 13.19 ± 0.07 Ma reportado por Thouret *et al.* (2007, 2016), en el SE del pueblo de Cotahuasi y en el acantilado de Cuno Cuno que se encuentra al sur de la región OCM. Otras edades como 14.16 ± 0.025 Ma fueron reportados para las “Tobas Chipmo en la región de Orcopampa (Swanson *et al.*, 2004). Así mismo otra edad de 13.19 ± 0.09 Ma fue reportada por Paquereau *et al.* (2006), para unas ignimbritas en el cañón del Río Chili. Finalmente, Cuellar (2019) reportó edades de 13.20, 13.22 y 13.18 Ma, para unas ignimbritas llamadas “Huallhua”, ubicadas en la mina Inmaculada a 14 Km al NEE del pueblo de SJA (aguas arriba del cañón del Río Huanca Huanca).



Figura 27. *Afloramientos de las Ignimbritas Chuquibamba.* Depósitos masivos de las Ignimbritas Chuquibamba en la columna de SJA, lado este del cañón del río Huanca Huanca, aguas arriba del cañón del río Marañón.

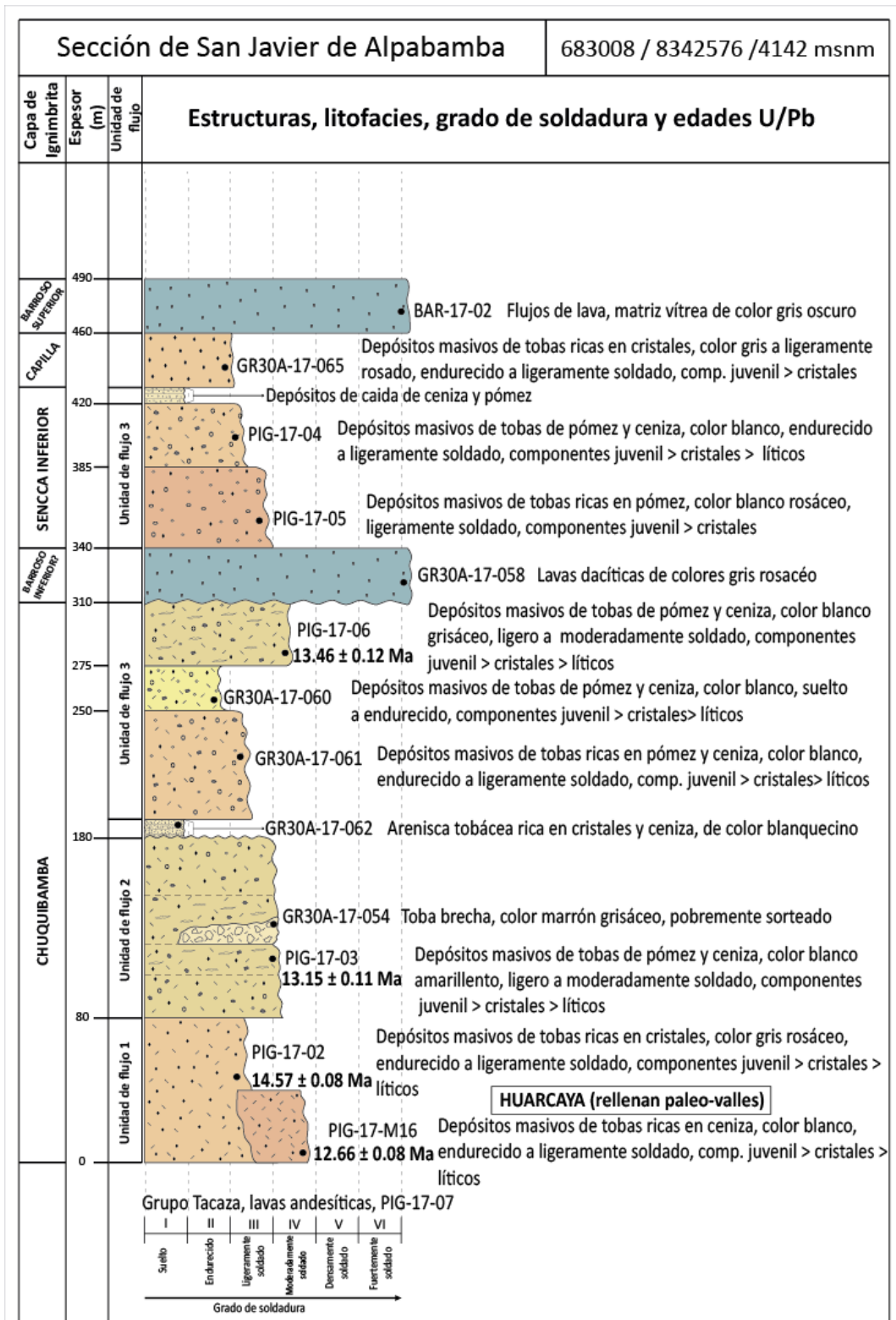


Figura 28. Columna Estratigráfica de la Sección de SJA. Se muestra las estructuras, grado de soldadura, litofacias y edades U-Pb de las ignimbritas y depósitos de CDP que afloran cerca del pueblo de SJA.

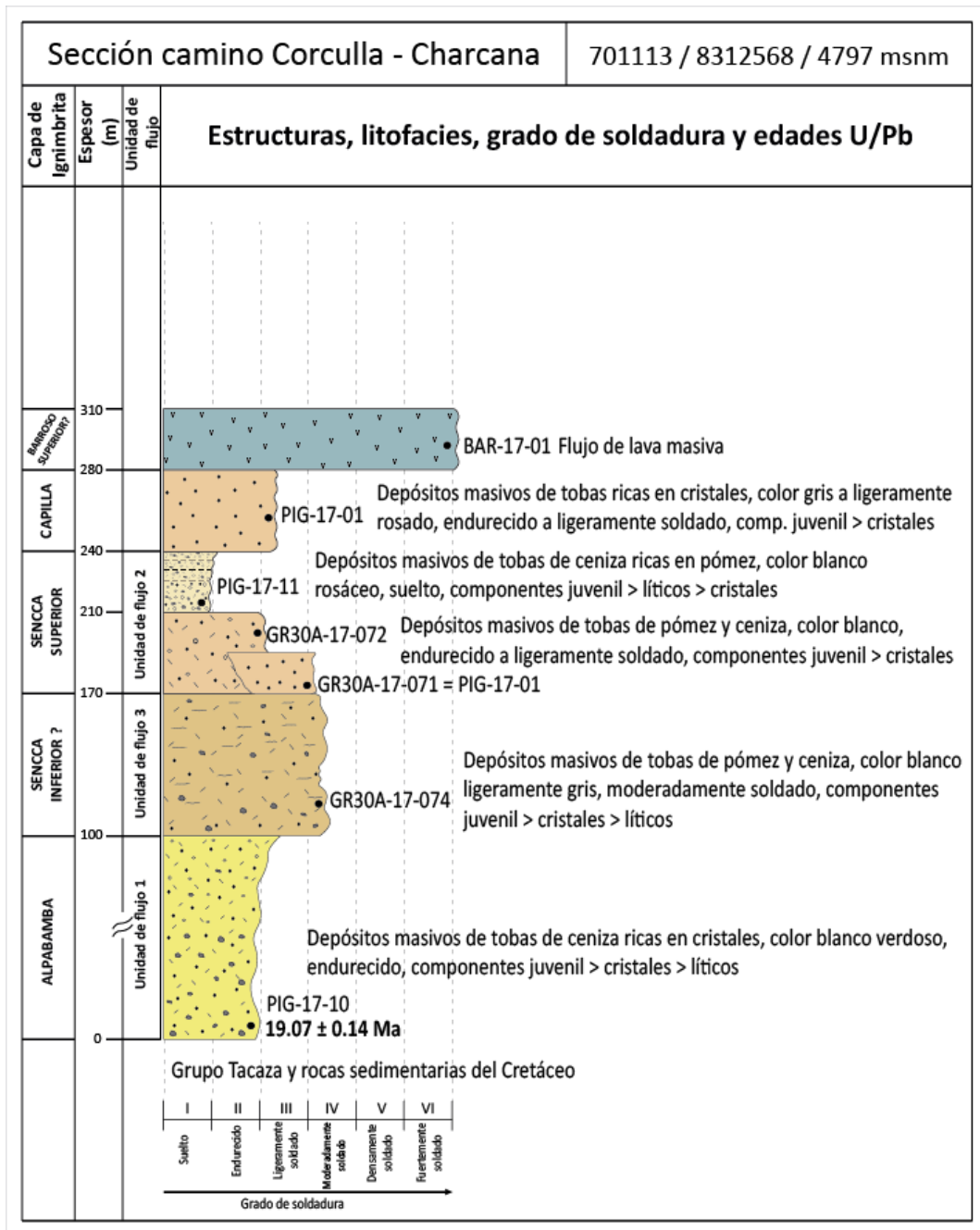


Figura 29. Columna Estratigráfica de la Sección Corcuilla – Charcana. Se muestra las estructuras, grado de soldadura, litofacies y edades U-Pb de las ignimbritas y depósitos de CDP que afloran en el camino desde el pueblo de Corcuilla hasta el pueblo de Charcana.



5.1.1.3. Ignimbritas Huarcaya (Nm-hu)

El término de Huarcaya fue acuñado por Thouret *et al.* (2016), quienes describieron depósitos masivos de flujos de tobas de lapilli ricas en ceniza, de color gris rosado, que rellenan paleo-valles cortados en las Ignimbritas Alpabamba, en el norte del Río Huarcaya aguas arriba del cañón del Río Cotahuasi.

En este trabajo de investigación, se ha descrito cerca de 50 m de espesor de las Ignimbritas Huarcaya, ubicados a 1 Km al norte del pueblo de SJA, norte del cañón del Río Huanca Huanca. Se ha descrito litofacies de depósitos masivos de flujos de tobas ricas en ceniza, de color blanco y con grado de soldadura de endurecido a ligeramente soldado (II-III) (figura 30). Cabe mencionar que las litofacies mencionadas antes, se encuentran confinadas en un paleo-valle que corta a las Ignimbritas Chuquibamba, y donde las Ignimbritas Huarcaya sobreyacen a depósitos volcanoclásticos del Grupo Tacaza (figura 28 y 30).

Se ha datado cristales de circón con el método de datación U-Pb, obteniendo una edad de 12.66 ± 0.08 Ma (tabla 7). El resultado obtenido es comparable con la edad U-Pb de 10.78 ± 0.13 Ma, reportado por Thouret *et al.* (2016) para unas ignimbritas confinadas en un paleo-valle que corta las Ignimbritas Alpabamba, entre los pueblos de Puica y Chulca en el norte del Río Huarcaya.

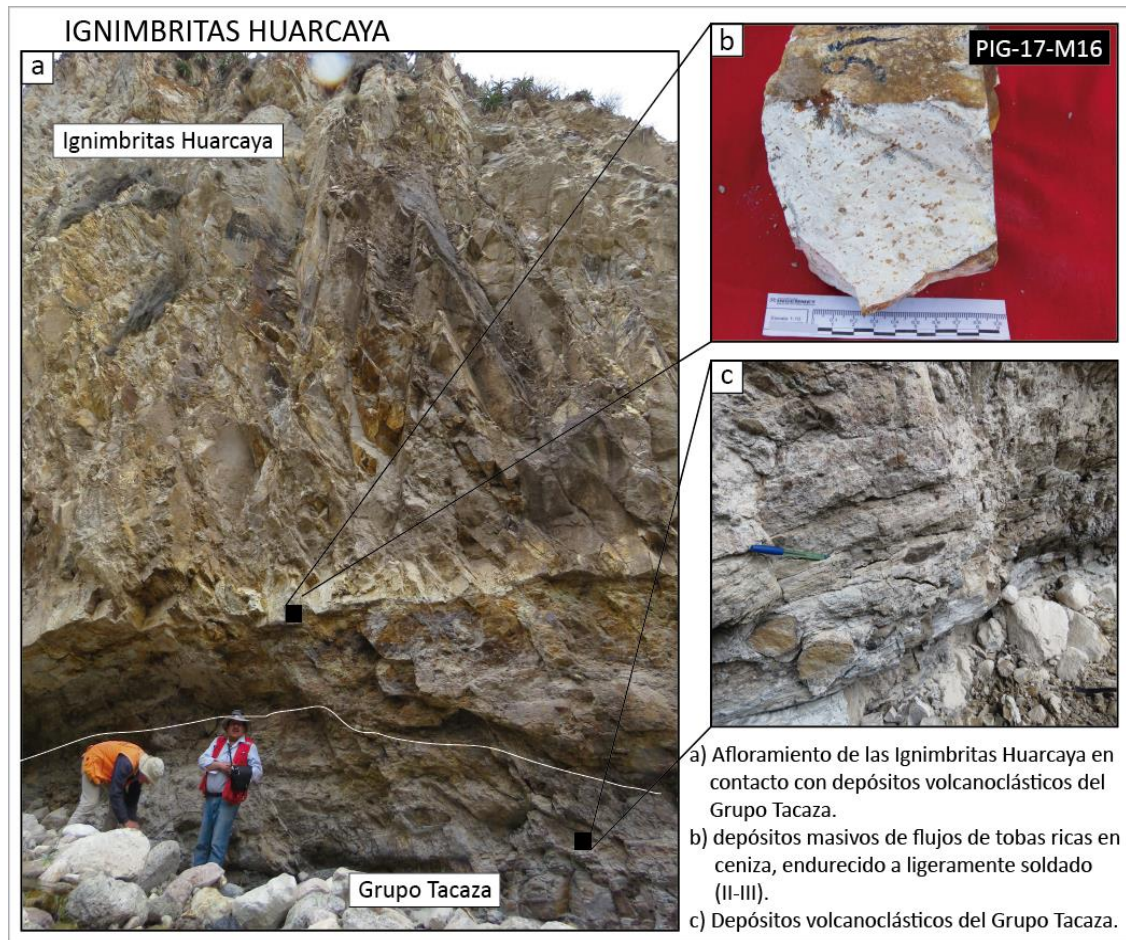


Figura 30. Afloramientos de las Ignimbritas Huarcaya. Las Ignimbritas Huarcaya sobreyacen al Grupo Tacaza, rellenando paleo-valles que cortan a las Ignimbritas Chuquibamba, lado este del cañón del Río Huanca Huanca.

5.1.1.4. Ignimbritas Caraveli (Nm-ca)

El término de Ignimbritas Caraveli fue acuñado por Thouret *et al.* (2007, 2016), quienes describieron extensas capas compuestas de ignimbritas de entre 50 m a 120 m de espesor, ubicadas cerca del pueblo de Chuquibamba y a 80 km al SEE de Pampa Gramadal, lado oeste del cañón del Río Ocoña.

En este trabajo de investigación, se ha descrito y datado secuencias bien expuestas de las Ignimbritas Caraveli, ubicados en ambos lados del cañón del Río Arma, aguas arriba del pueblo de Salamanca (el Río Arma es afluente del Río Chichas y del Río Ocoña). Se ha descrito entre 80 m y 90 m de espesor, de secuencias que consisten en



depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza, de color gris claro y beige blanquecino, que tienen grado de soldadura entre suelto a endurecido (I-II). Las secuencias descritas anteriormente, se intercalan con depósitos masivos, de flujos de tobas de ceniza ricas en cristales, de color gris y grado de soldadura endurecido (II).

Así también, en el lado oeste del Río Arma, se ha identificado capas de ignimbrita de aproximadamente 100 m de espesor. Las cuales consisten de depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza y cristales, de color beige ligeramente blanco y grado de soldadura de suelto a endurecido (I-II), además en la base presenta depósitos de oleadas de piroclásticas (figura 31b y 32). Estas ignimbritas tienen similitud con las ignimbritas descritas para las Ignimbritas Caraveli en el párrafo anterior. Sin embargo, también es probable que estas capas de ignimbritas pertenezcan a las Ignimbritas Chuquibamba.

Las Ignimbritas Caraveli, sobreyacen directamente rocas del basamento pre-Terciario y posiblemente a secuencias de las Ignimbritas Alfabamba y Chuquibamba (figura 31 y 32). Así mismo las Ignimbritas Caraveli son cubiertas por los depósitos de CDP Arma, por las Ignimbritas del Sencca inferior y por lavas del volcán Solimana de edad Pleistoceno (figura 31 y 34).

En el lado este del Río Arma, se dataron cristales de zircón obteniendo edades de 9.55 ± 0.07 y 9.39 ± 0.08 Ma (tabla 7), las muestras datadas se ubican cerca a la parte media y el tope de los depósitos de las Ignimbritas Caraveli. Los resultados obtenidos se pueden correlacionar con el intervalo de edad entre 9.35 Ma y 8.97 Ma reportado por Thouret *et al.* (2007, 2016), cerca del pueblo de Caraveli, y en el lado oeste del Río Ocoña al sur de la región OCM.

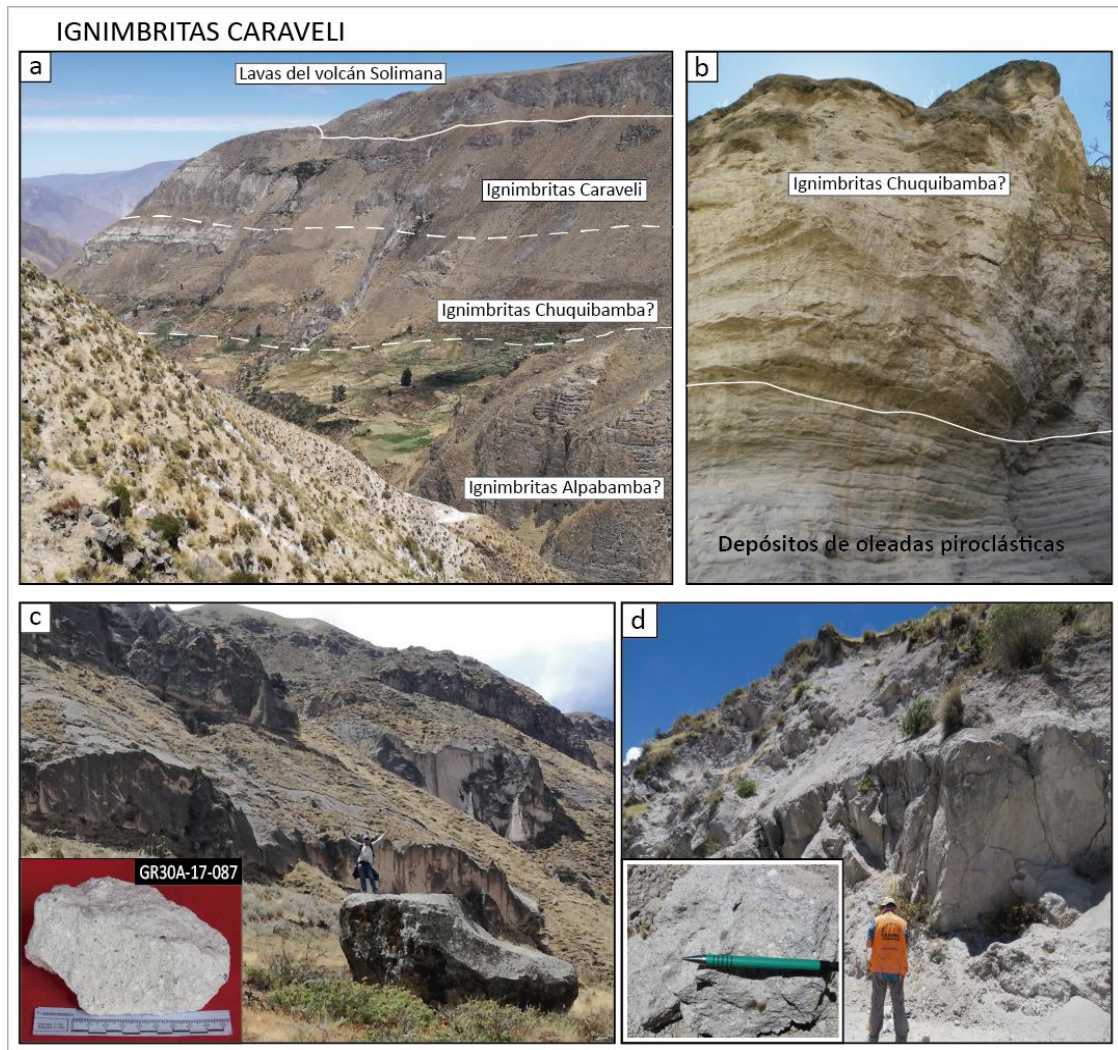


Figura 31. Afloramientos de las Ignimbritas Caraveli. Las Ignimbritas Caraveli afloran en ambos lados del Río Arma, aguas arriba del pueblo de Salamanca. **a)** Lado oeste del cañón del Río Arma. Las Ignimbritas Caraveli sobreyacen a posibles secuencias de las Ignimbritas Chuquibamba y las Ignimbritas Alpabamba, así mismo son cubiertas por flujos de lava del volcán Solimana. **b)** Base de las posibles secuencias de las Ignimbritas Chuquibamba, en el lado oeste del cañón del Río Arma. **c)** Ignimbritas Caraveli, consiste de depósitos masivos de flujos de tobas de cenizas, lado oeste del cañón del Río Arma. **d)** Depósitos masivos de flujos de tobas ricas en cristales de las Ignimbritas Caraveli, lado este del cañón del Río Arma.

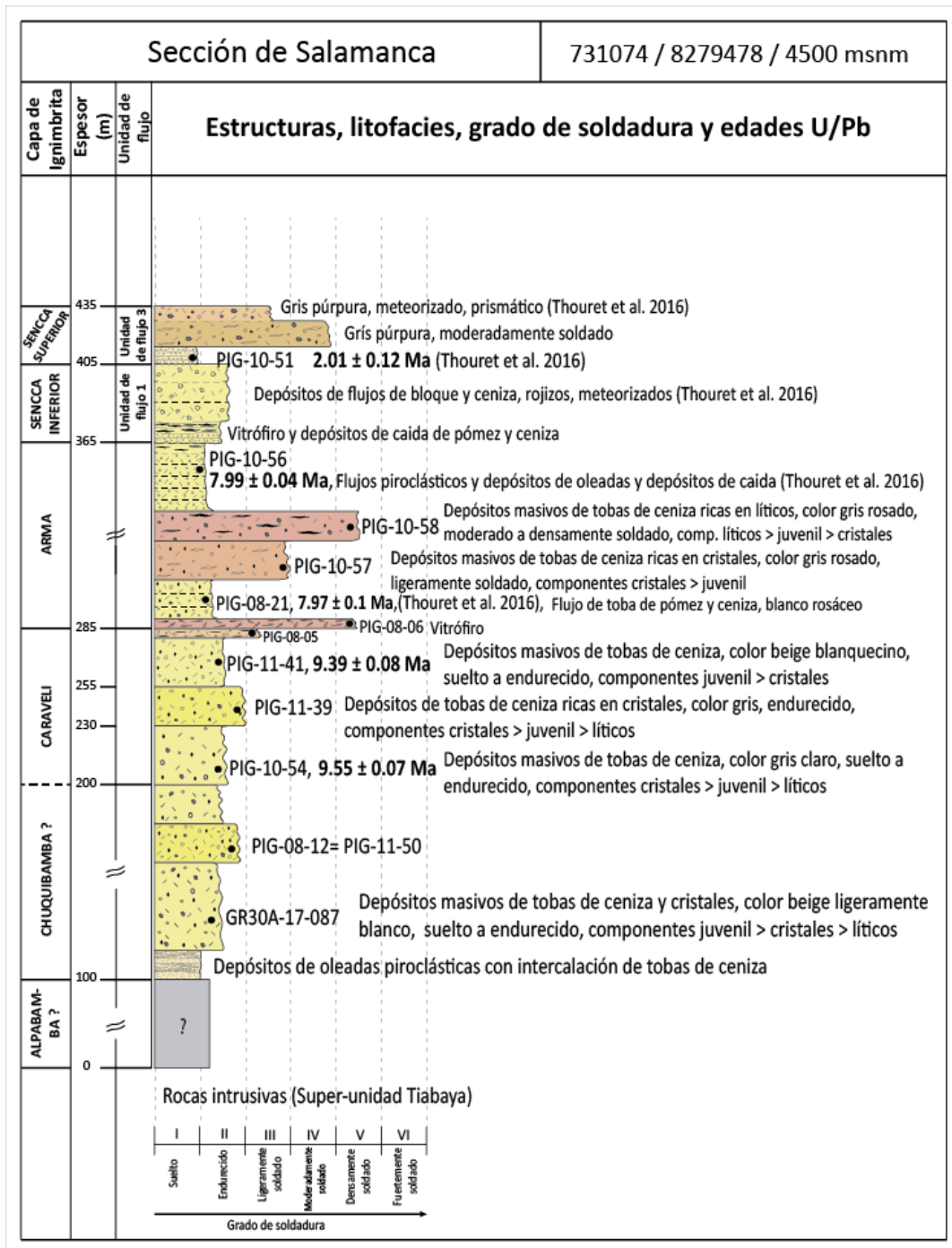


Figura 32. Columna Estratigráfica de la Sección de Salamanca. Muestra las estructuras, grado de soldadura, litofacies y edades U-Pb de las ignimbritas y depósitos de CDP que afloran cerca del proyecto Arma, lado este del cañón del Río Arma. Modificado de “A 25 my chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: implications for the volcanic history of the Central Andes”, por Thouret et al. (2016), Journal of the Geological Society.

5.1.1.5. Depósitos de CDP Arma (Nm-ar)

Los depósitos de CDP Arma, fueron descritos por Thouret *et al.* (2016) a lo largo de la cabecera del cañón del Río Arma, entre los nevados de Solimana y Coropuna. Esta unidad litoestratigráfica, consiste de una variedad de depósitos de caída delgados y estratificados, depósitos de oleadas piroclásticas con estratificación cruzada y delgadas capas de depósitos de flujo estratificados (Thouret *et al.*, 2016). Las secuencias descritas para los depósitos de CDP Arma por Thouret *et al.* (2016) dieron edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ entre $7.97 \pm 0.14 \text{ Ma} - 7.99 \pm 0.04 \text{ Ma}$.

En este trabajo de investigación, se ha descrito cerca de 80 m de espesor de secuencias bien expuestas de los depósitos CDP Arma, los cuales están ubicados en el lado este del cañón del Río Arma (figura 33). Así mismo, se ha identificado dos litofacies en las secuencias intermedias de los depósitos de CDP Arma: **1)** litofacies que consisten en depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza rico en cristales, con un grado de soldadura ligeramente soldado (III) (figura 33c); y **2)** litofacies de depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza rico en líticos con grado de soldadura entre moderado a densamente soldado (IV-V) mostrando fiammes (figura 33b). En la base de las secuencias de los CDP Arma, Thouret *et al.* (2016) describieron litofacies que consisten en depósitos masivos de flujos de tobas de pómez y ceniza, con grado de soldadura endurecido (II), los cuales sobreyacen a capas delgadas de vitrófiros. El tope de los depósitos CDP Arma, consiste en depósitos masivos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez.

Los depósitos de CDP Arma sobreyacen las Ignimbritas Caraveli. Así mismo son cubiertos por depósitos de las Ignimbritas Sencca inferior, Sencca superior y por lavas Plio-Pleistocenas del complejo volcánico Coropuna (figura 34).



Figura 33. Afloramientos de los depósitos CDP Arma. Depósitos de CDP Arma en el lado este del cañón del Río Arma, aguas arriba del pueblo de Salamanca. **a)** Contacto de los depósitos CDP Arma con las Ignimbritas Caraveli. **b)** y **c)** Se muestra las litofacies de las secuencias intermedias de los depósitos de CDP Arma: **b)** litofacies de depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza rica en cristales, ligeramente soldado; **c)** litofacies de depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza rico en líticos, moderado a densamente soldado.

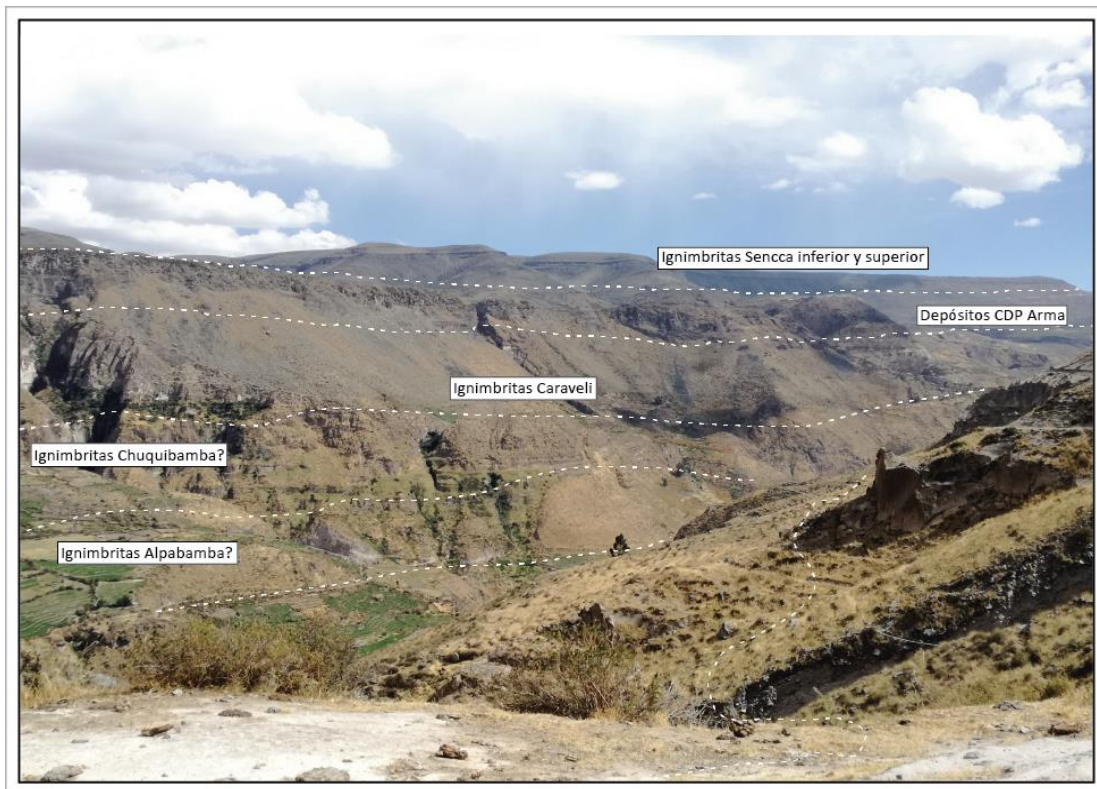


Figura 34. *Secuencias Estratigráficas en el SE del Río Arma.* Vista general de las secuencias estratigráficas en el lado SE del cañón del Río Arma, aguas arriba del pueblo de Salamanca, camino hacia el nevado de Coropuna.

5.1.1.6. Ignimbritas del Grupo Sencca

Ignimbritas Sencca Inferior (Np-se)

En el norte de la región OCM, Thouret *et al.* (2016) describieron flujos de ignimbritas blanquecinas no soldadas. Estas ignimbritas están formando planicies altas y llenan paleo-valles como los de los pueblos de Chulca y Huarcaya. Así mismo, otras ignimbritas ricas en ceniza fueron descritas en el acantilado que se encuentra sobre el pueblo de Pampamarca, al SO del cañón del Río Huarcaya.

En este trabajo de investigación, se ha descrito unidades de flujo bien expuestas de las Ignimbritas Sencca inferior, cerca de los pueblos de Pampamarca, Huaynacotas, y a lo largo del camino desde Cotahuasi hacia el Río Arma.



Se ha representado gruesas unidades compuestas de flujo de ignimbritas, en las secciones de Pampamarca (figura 39), Huaynacotas (figura 40) y Cotahuasi-Quillumsa (figura 41). La base de las Ignimbritas Sencca inferior, está bien expuesta a 2 Km al oeste y arriba del pueblo de Huaynacotas. Donde las capas de ignimbritas consisten de flujos de tobas de ceniza ricos en líticos, que a su vez están cubiertos por depósitos masivos de flujos de tobas de pómez y ceniza, de color rosado blanquecino, con grado de soldadura suelto a endurecido (I-II) y mostrando texturas de fiammes en la base (figura 36c y 40). En la base de las Ignimbritas Sencca inferior, se dató la muestra PIG-17-15 con el método U-Pb, obteniendo una edad de 5.03 ± 0.08 Ma (tabla 7). En la sección de Huaynacotas (figura 40), las Ignimbritas Sencca inferior sobreyacen al Grupo Tacaza, mientras que son cubiertos por secuencias de las Ignimbritas Sencca superior y por los depósitos CDP Lomas.

En el acantilado al NO arriba del pueblo de Pampamarca, se describieron las muestras PIG-11-57A y 57B, que pertenecen a las unidades de la parte intermedia de las Ignimbritas Sencca inferior. Las unidades intermedias consisten en depósitos masivos de flujos de tobas de pómez y ceniza rico en cristales de biotita, con colores que varían de rosados a amarillos, y grado de soldadura ligeramente soldado (III) (figura 36d y 39). Las litofacies intermedias, pueden correlacionarse con los flujos de tobas de pómez y ceniza, de color rosado y ligeramente soldado (III) (muestra GR30A-17-084), ubicados en el tope de la sección de Huaynacotas (figura 36b y 40). En este proyecto, se ha datado las muestras PIG-11-57A y B con el método U-Pb y los resultados dieron una edad promedio de 5.10 ± 0.08 Ma (tabla 7). En el acantilado que se encuentra arriba del pueblo de Pampamarca, las Ignimbritas Sencca inferior sobreyacen rocas sedimentarias del Cretáceo y posibles secuencias de las Ignimbritas Alpabamba.



Se ha descrito otras unidades de flujo de las Ignimbritas Sencca inferior, en la sección Cotahuasi-Quillumsa (figura 41), ubicado a lo largo del camino desde el pueblo de Cotahuasi hacia el Río Arma, a 2 Km al SSE del pueblo de Cotahuasi. Donde, se ha descrito cerca de 100-150 m de espesor de unidades que consisten en depósitos masivos de flujos de tobas ricos en pómez y ceniza, de color rosáceo y grado de soldadura entre suelto a endurecido (I-II) (figuras 37a, 37b y 41). Así mismo se ha datado la muestra PIG-17-14 con el método U-Pb y se ha obtenido como resultado una edad de 3.67 ± 0.04 Ma (tabla 7). En la sección de Cotahuasi-Quillumsa, ubicado a 3 Km al NEE del pueblo Toro (cerro Quimsa Orco), las Ignimbritas Sencca inferior sobreyacen al Grupo Yura y al Grupo Tacaza. Así mismo, a 4 Km al SSE del pueblo de Cotahuasi (cerro Allahuay), las Ignimbritas Sencca inferior son cubiertas por las Ignimbritas Sencca superior y por las Ignimbritas Lomas.

Otras unidades de flujo más distales de las Ignimbritas Sencca inferior, están expuestas en el tope de la sección de SJA (figura 28 y 35a). Donde, se ha descrito cerca de 80 m de espesor, de ignimbritas que consisten de depósitos masivos de flujos de tobas ricas en pómez, de color rosados y ligeramente soldado (III), que además se intercalan con una capa de depósitos masivos de flujos de tobas de pómez y ceniza, de color blanco y grado de soldadura entre endurecido a ligeramente soldado (II-III) (figura 35a). A una distancia de 28 Km al NEE del pueblo de SJA, Thouret *et al.* (2016) reportaron una edad U-Pb de 2.82 ± 0.04 Ma, para unas ignimbritas con similar posición estratigráfica de las Ignimbritas Sencca inferior en la sección de SJA. Así mismo, las Ignimbritas de Sencca inferior en la sección de SJA sobreyacen a las Ignimbritas Chuquibamba.

Otras posibles unidades de flujo de las Ignimbritas Sencca inferior, están presentes arriba del pueblo de Charcana, lado oeste del Río Cotahuasi. Donde se ha descrito

litofacies que consisten en depósitos masivos de flujos de tobas de pómez y ceniza, de color blanco a ligeramente gris y grado de soldadura de moderadamente soldado (IV) (figura 29 y 35b).

Así mismo, Thouret *et al.* (2016) describieron otras unidades distales, en el lado este de la cabecera del cañón del Río Arma, dónde describieron depósitos de flujo de bloques y ceniza con intercalación de capas de vitrófiros y depósitos de caída de pómez y ceniza en la base (figura 32 y 38a).

Ignimbritas Sencca Superior (Qp-se)

Las Ignimbritas Sencca superior, llenan valles poco profundos cortados en las Ignimbritas Chuquibamba y en flujos de lava de edad Mioceno tardío a Plioceno temprano. Thouret *et al.* (2016) describieron litofacies recristalizadas de color rosado a amarillentas de las Ignimbritas Sencca superior, que forman terrazadas colgantes que se encuentran en las cabeceras de los valles alrededor del volcán Coropuna y aguas arriba de los Ríos Arma, Ocoña y Chaucalla.

En este trabajo de investigación, se ha descrito unidades de flujos de las Ignimbritas Sencca superior en la sección de Cotahuasi-Quillumsa (figura 41), localizado a 4 Km al NEE y arriba del pueblo Toro (Cerro Quimsa Orco). Donde, afloran cerca de 100 m de espesor, de depósitos masivos de flujos de tobas ricas en pómez y ceniza, blanquecinas y con grado de soldadura suelto (I). Además estos depósitos muestran estructuras de gas pipe (figura 37d) y sobreyacen a depósitos de oleadas piroclásticas con estratificación cruzada, que tienen un espesor aproximado de entre 3 - 5 m (figura 37c). Se ha datado la muestra PIG-17-13 y se obtuvo una edad de 1.626 ± 0.035 Ma (tabla 7). Thouret *et al.* (2007) reportaron una edad de 2.04 ± 0.14 Ma, en el lado opuesto del Cerro Quimsa Orco, a 3 Km al NEE arriba del pueblo Toro. La edad reportada en este trabajo,



es comparable con el intervalo de edad entre 2.20 ± 0.15 Ma y 1.8 ± 0.04 Ma, asignado por Thouret *et al.* (2016) para las Ignimbritas Sencca superior.

Las Ignimbritas Sencca superior de la sección Cotahuasi – Quillumsa sobreyacen a las Ignimbritas Sencca inferior. Así mismo, a 4 Km al sur de la sección Cotahuasi – Quillumsa, los flujos de lava de edad Pleistoceno que pertenecen al volcán Solimana, sobreyacen a las Ignimbritas Sencca superior. También, a 3 Km al este de la sección de Cotahuasi-Quillumsa, las Ignimbritas Sencca superior son cubiertas por lavas andesíticas.

Otras posibles unidades de flujo de las Ignimbritas Sencca superior, han sido descritas en el Cerro Pucaorcco, ubicado a 4 Km al oeste y arriba del pueblo de Charcana. Donde, se ha descrito depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza ricas en pómez, de color blanquecino y con grado de soldadura suelto (I) (figura 35d y 29). Así mismo, otras secuencias de las Ignimbritas Sencca superior, se encuentran a 4 Km al NO del pueblo de Oyolo en el lugar denominado Chigchipampa, que consisten de flujos de tobas de pómez y ceniza, blanquecinas y grado de soldadura entre endurecido a ligeramente soldado (II-III) (figura 42). Las mismas litofacies encontradas en Chigchipampa, han sido encontradas en la carretera Corculla-Charcana (figura 35c y 29).

Otras posibles secuencias de las Ignimbritas Sencca superior, afloran a 6 Km al NO del pueblo de Huaynacotas, en el cerro Pararapa. Dónde, se ha descrito una unidad que consiste en depósitos masivos de flujos de tobas de pómez y ceniza, de color blanco amarillento, grado de soldadura moderadamente soldado (IV) y mostrando textura de fiammes. Cabe mencionar que la unidad antes mencionada, sobreyace a otra unidad que consiste de depósitos masivos de flujos de tobas de pómez y ceniza, de color blanco a ligeramente amarillo y grado de soldadura de ligera a moderadamente soldado (III-IV), que se ubican a 4 km al oeste del pueblo de Huaynacotas (figura 36e y 40).

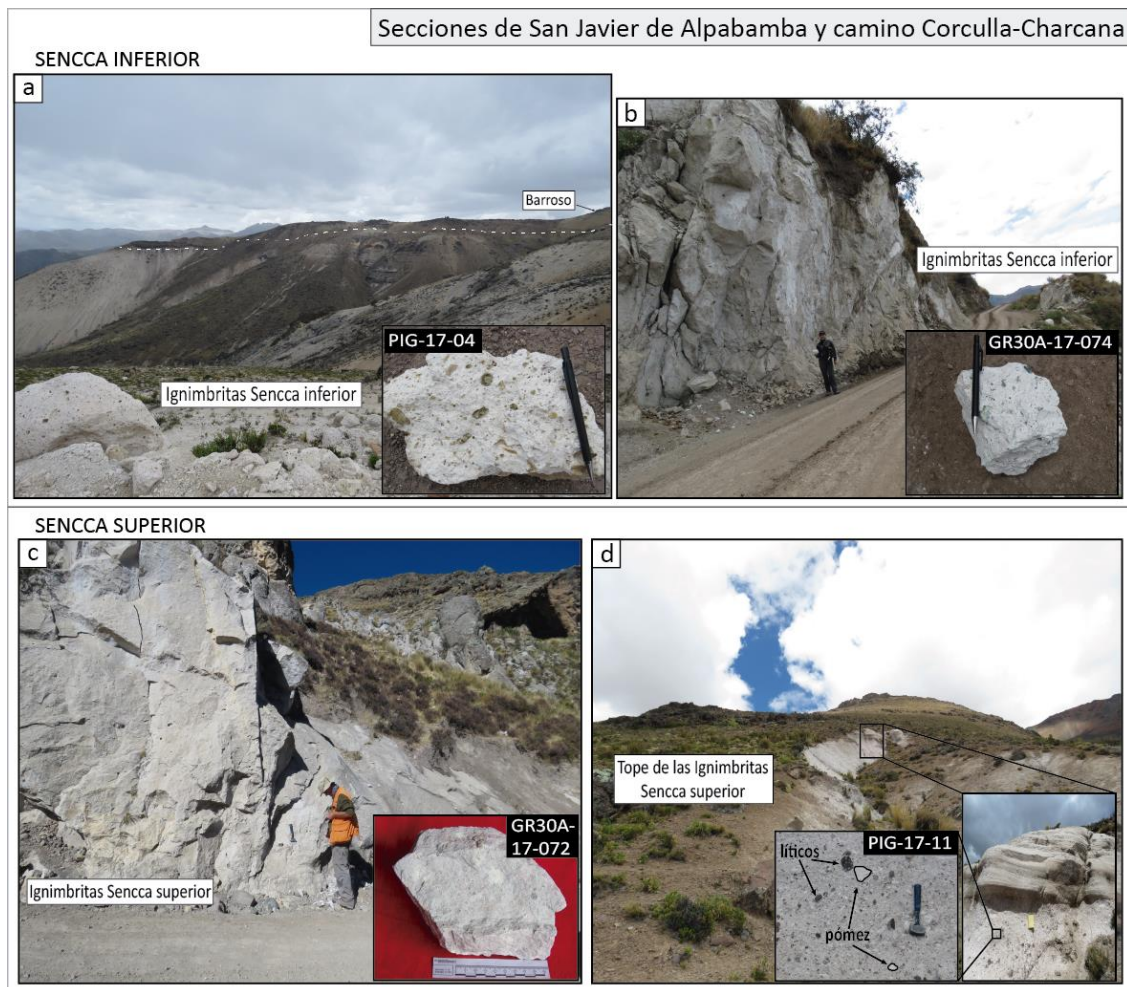


Figura 35. Afloramientos de las Ignimbritas Sencca en las Secciones SJA y Corculla – Charcana. Ignimbritas del Grupo Sencca aflorando en la sección de SJA (lado este del cañón del Río Huanca Huanca) y en la sección Corculla-Charcana (a lo largo del camino de Corculla a Charcana). **a)** y **b)** Depósitos de las Ignimbritas Sencca inferior: **a)** unidades que consiste de flujos de tobas de pómez y ceniza, con grado de soldadura endurecido a ligeramente soldado, ubicados en el lado este de cañón del Río Huanca Huanca; **b)** unidades que consisten de flujos de tobas de pómez y ceniza, grado de soldadura moderado, ubicados en el lado oeste y arriba del pueblo Charcana. **c)** y **d)** Depósitos de las Ignimbritas Sencca superior: **c)** unidades que consisten de flujos de tobas de pómez y ceniza, con grado de soldadura endurecido a ligeramente soldado, ubicados en el camino Corculla-Charcana; **d)** unidades que consisten de flujos de tobas de ceniza rico en pómez y grado de soldadura suelto, ubicados a 4 Km al oeste y arriba del pueblo de Charcana.

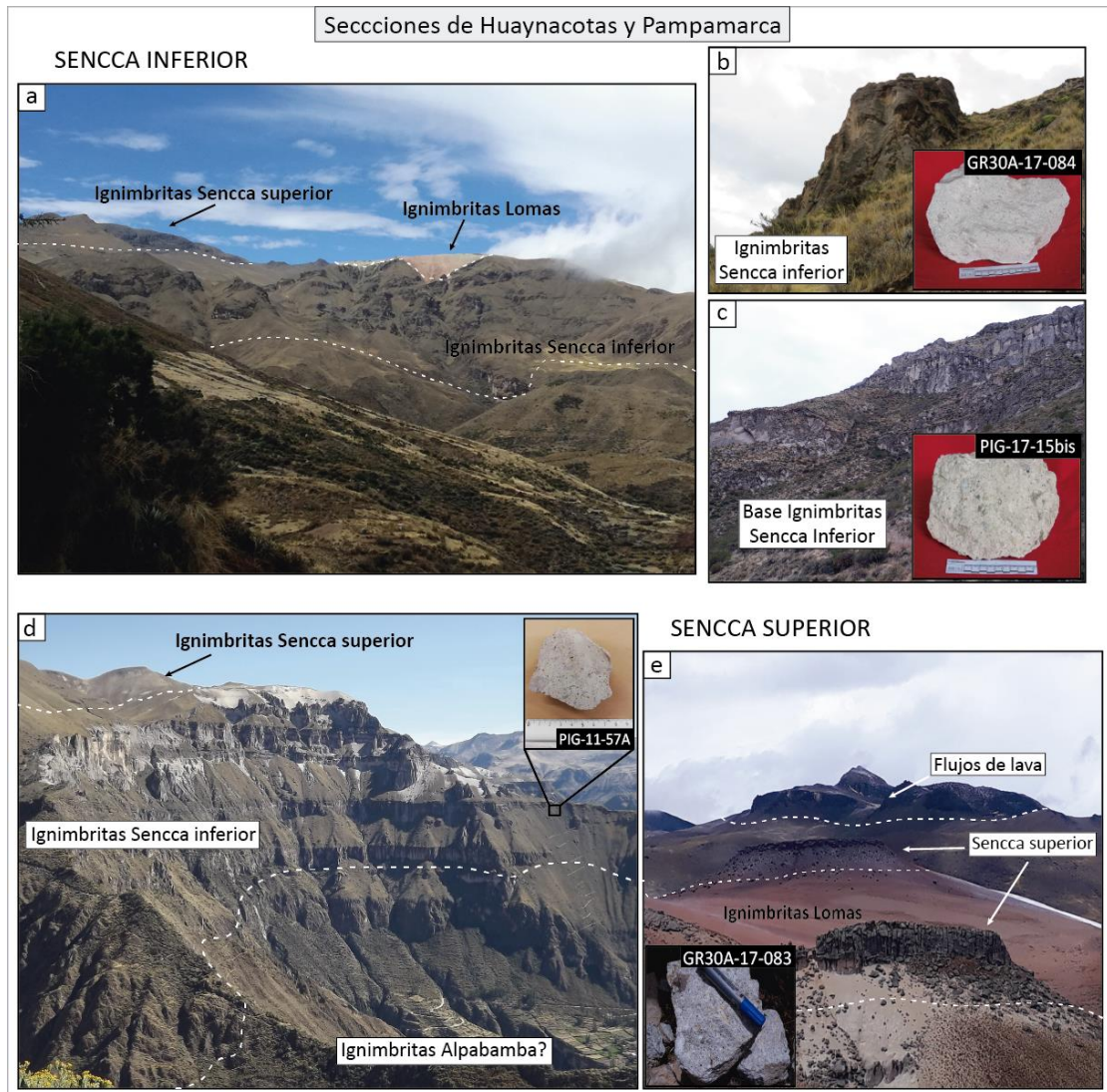


Figura 36. Afloramientos de las Ignimbritas Sencca en las Secciones de Huaynacotas y Pampamarca. Ignimbritas del Grupo Sencca aflorando en la sección de Huaynacotas (a 2 Km al oeste y arriba del pueblo de Huaynacotas) y en la sección Pampamarca (al NO y arriba del pueblo de Pampamarca). **a)** Secuencia litoestratigráfica en el NE arriba del pueblo de Huaynacotas. **b)** y **c)** Depósitos de las Ignimbritas Sencca inferior: **b)** unidades de flujos de tobas ricas en pómez y ceniza, ligeramente soldado, ubicado al NO arriba del pueblo de Huaynacotas; **c)** unidades de flujos de tobas de pómez y ceniza, suelto a endurecido, que sobreyacen la base de las Ignimbritas Sencca inferior (a 2 Km al oeste y arriba del pueblo de Huaynacotas). **d)** Secuencias litoestratigráficas de las Ignimbritas del Grupo Sencca, en el acantilado al NO y arriba del pueblo de Pampamarca **e)** Depósitos de las Ignimbritas Sencca superior a 4 Km al oeste y arriba del pueblo de Huaynacotas, se observa litofacies de flujos de tobas de pómez y ceniza, ligero a moderadamente soldado.

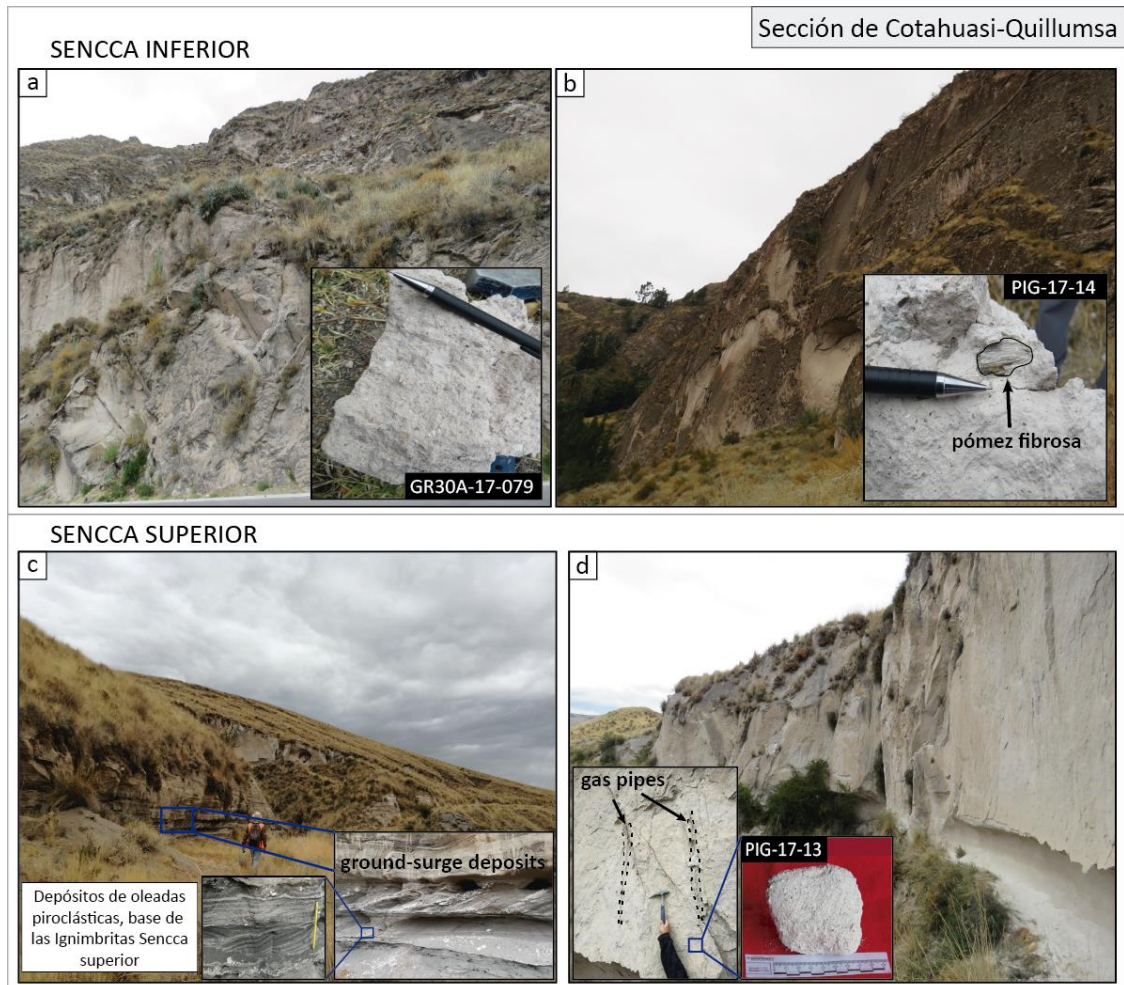


Figura 37. Afloramientos de las Ignimbritas Sencca en la Sección Cotahuasi-Quillumsa. Ignimbritas del Grupo Sencca que afloran a 2 Km y 4 Km al SEE del pueblo de Cotahuasi y a lo largo de la carretera desde Cotahuasi hasta el Río Arma. **a)** y **b)** Depósitos de las Ignimbritas Sencca inferior: **a)** unidades de flujo de tobas de pómez y ceniza, suelto a endurecido a lo largo del camino Cotahuasi-Río Arma; **b)** unidades de flujo de tobas ricas en pómez y ceniza, suelto a endurecido, que afloran a 1 Km al SO arriba del pueblo de Quillumsa. **c)** y **d)** Depósitos de las Ignimbritas Sencca superior: **c)** depósitos de oleadas piroclásticas, en el Cerro Quimsa Orco a 4 Km al NEE arriba del pueblo Toro; **d)** unidades de flujo de tobas ricas en pómez y ceniza, grado de soldadura suelto, mostrando estructuras de gas pipe, ubicado en el Cerro Quimsa Orco.

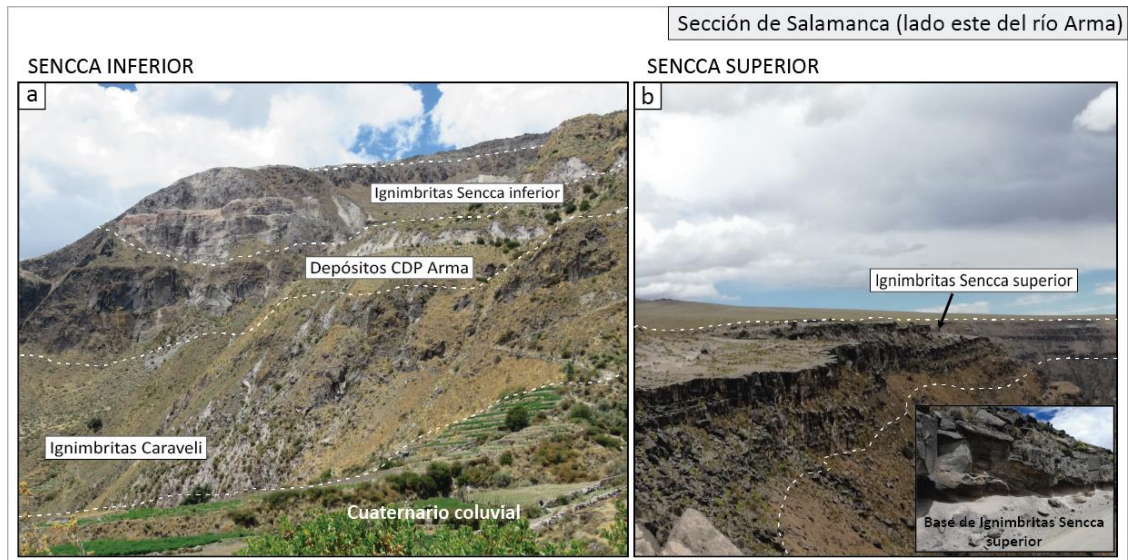


Figura 38. Afloramientos de las Ignimbritas Sencca en la Sección Salamanca. Ignimbritas del Grupo Sencca que afloran en el lado este del cañón del Río Arma y arriba del pueblo de Salamanca. **a)** Secuencias litoestratigráficas de las Ignimbritas del Mioceno y Pleistoceno en el lado este del cañón del Río Arma. **b)** Secuencias de las Ignimbritas Sencca superior, que forman terrazas colgantes, aguas arriba del Río Arma.

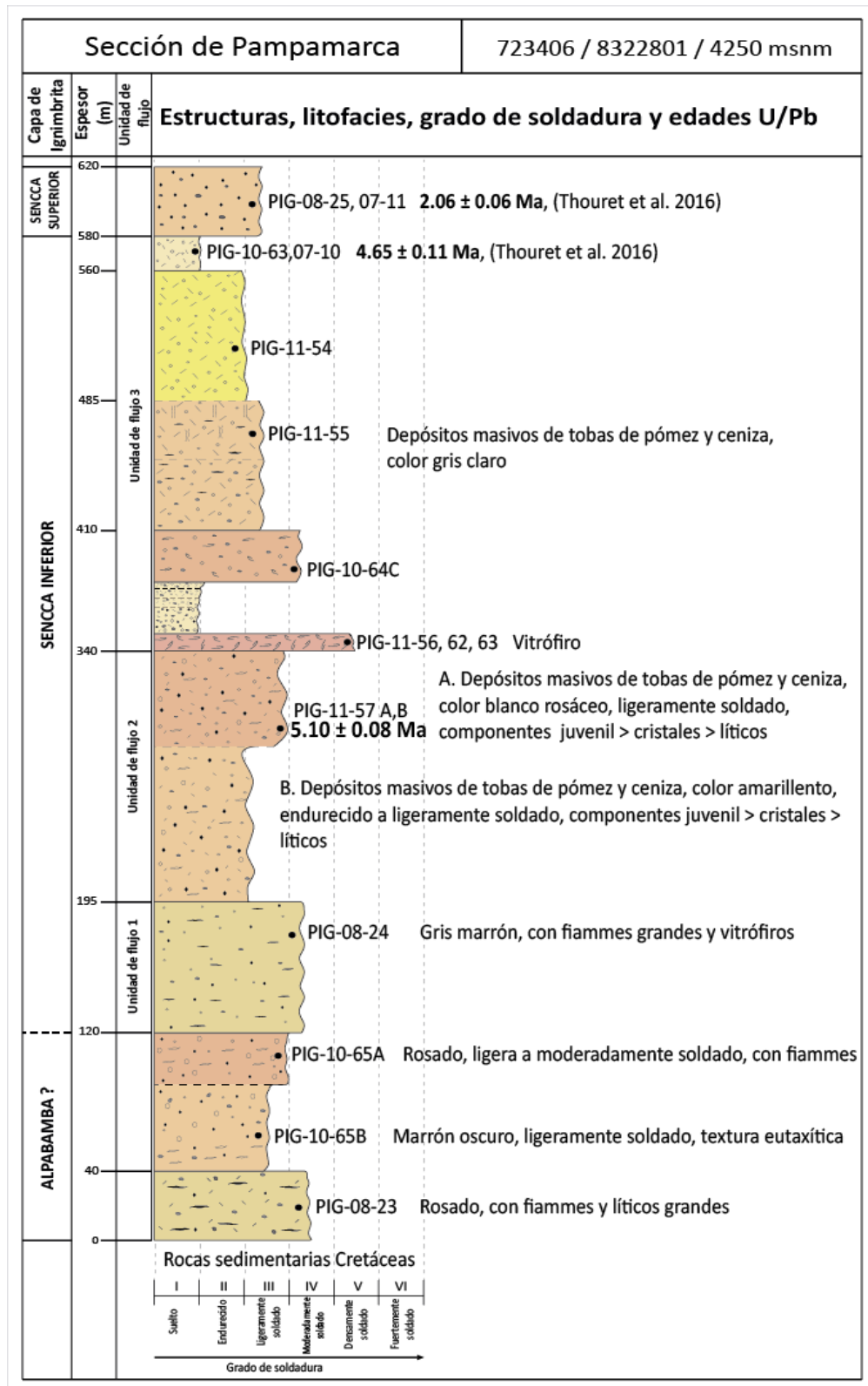


Figura 39. Columna Estratigráfica de la Sección de Pampamarca. Muestra las estructuras, grado de soldadura, litofacies y edades U-Pb de las ignimbritas que afloran arriba del pueblo de Pampamarca. Modificado de “A 25 my chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: implications for the volcanic history of the Central Andes”, por Thoruret et al. (2016), Journal of the Geological Society.

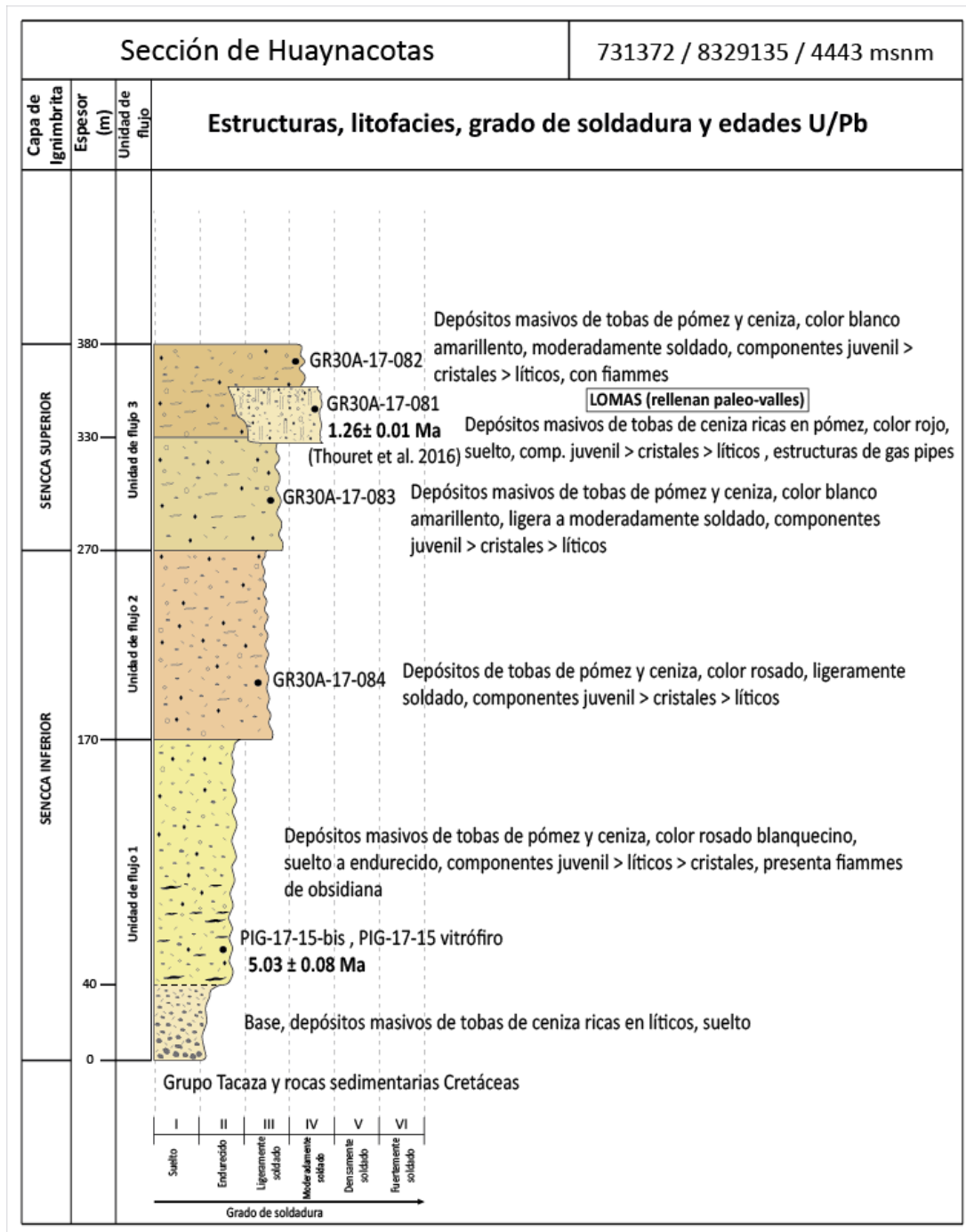


Figura 40. Columna Estratigráfica de la Sección Huaynacotas. Muestra las estructuras, grado de soldadura, litofacias y edades U-Pb de las ignimbritas, que afloran al NO y arriba del pueblo de Huaynacotas.

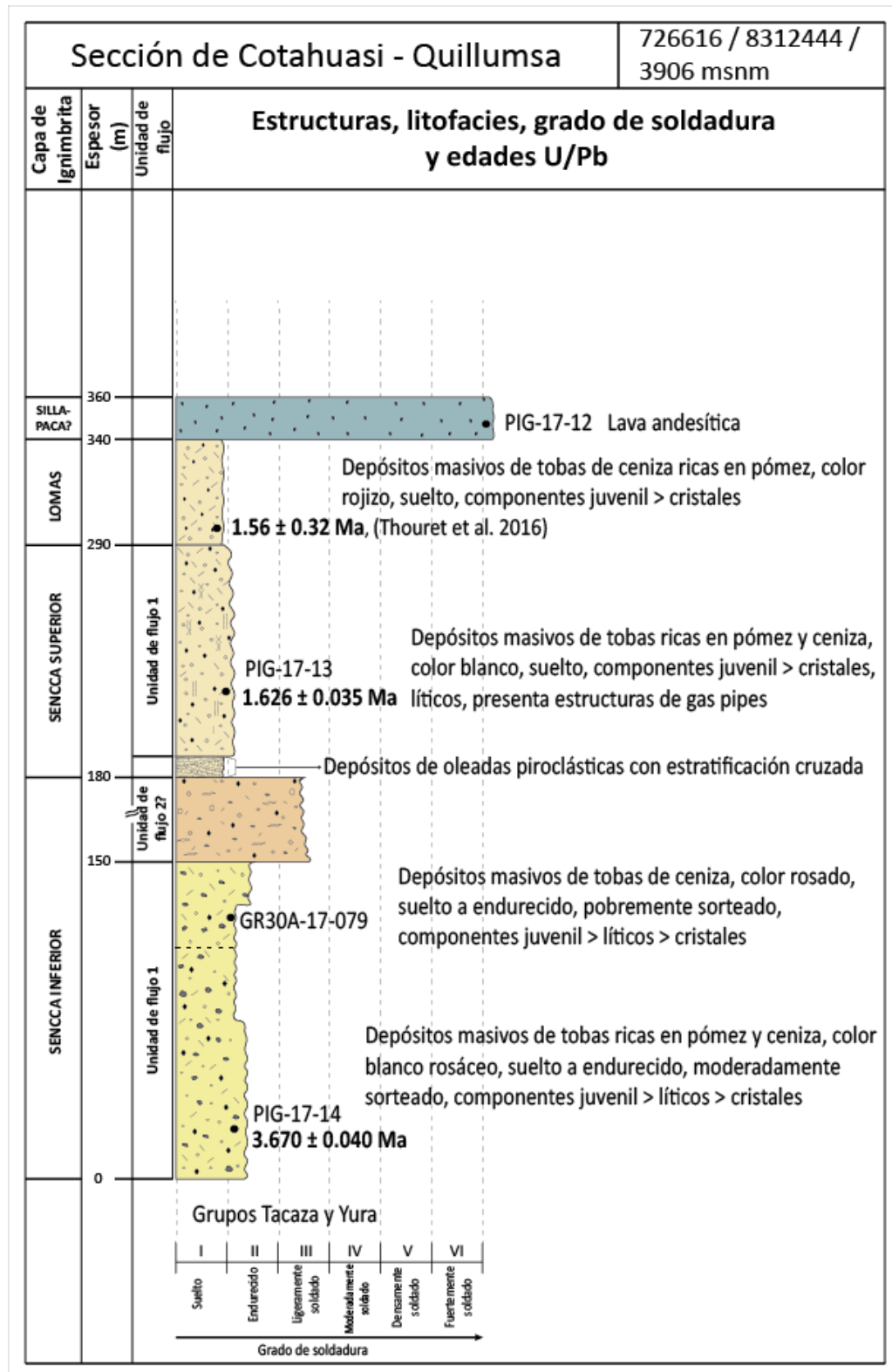


Figura 41. Columna Estratigráfica de la Sección Cotahuasi – Quillumsa. Muestra las estructuras, grado de soldadura, litofacies y edades U-Pb de las ignimbritas, que afloran en el sur y arriba del pueblo de Cotahuasi.

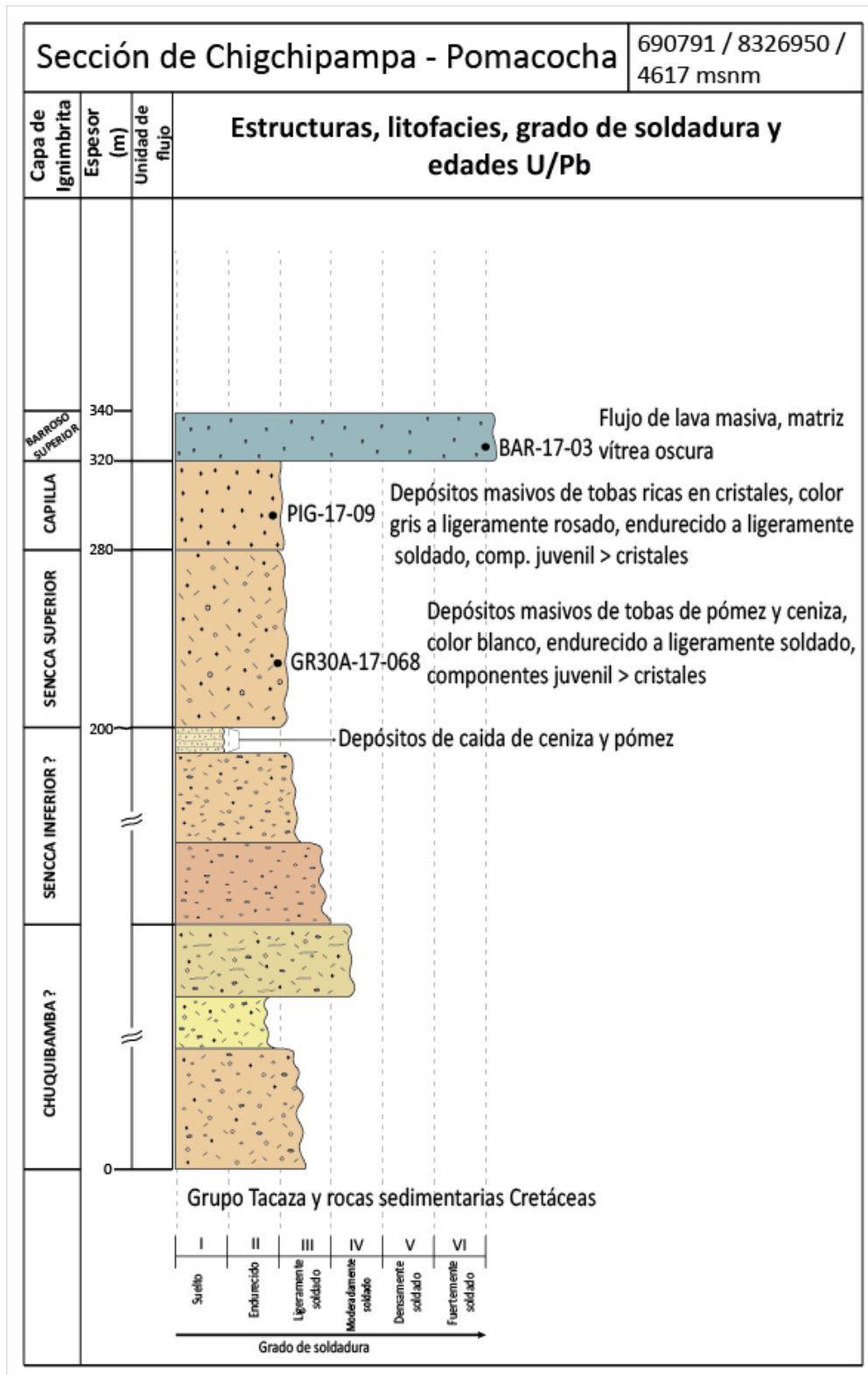


Figura 42. Columna Estratigráfica de la Sección Chigchipampa – Pomacocha. Muestra las estructuras, grado de soldadura, litofacies y edades U-Pb de las ignimbritas, que afloran a 4 Km y al NO del pueblo de Oyolo.



5.1.1.7. Ignimbritas Lomas (Qp-lo)

Las Ignimbritas Lomas del norte de la región OCM, están bien expuestas a lo largo de la carretera hacia la Laguna Llanájille, a 4 Km al NO y arriba del pueblo de Huaynacotas. En la sección de Huaynacotas (figura 40), se ha descrito cerca de 30 m de espesor, de depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza ricos en pómez, de color rojo y con grado de soldadura suelto (I) (figura 43a y 43c), además se observaron estructuras de gas pipe (figura 43b). Asimismo, Thouret *et al.* (2016) reportaron una edad de 1.26 ± 0.01 Ma, para los depósitos descritos anteriormente. En la sección de Huaynacotas, las Ignimbritas Lomas sobreyacen y rellenan valles cortados en las Ignimbritas del Grupo Sencca.

Otros afloramientos de las Ignimbritas Lomas, han sido descritos a 4 Km al SE del pueblo de Cotahuasi, en la carretera desde Cotahuasi hacia el Río Arma. Dónde afloran cerca de 50 m de espesor, de depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza rico en pómez y coloración rojiza, con grado de soldadura suelto (I) (figura 43d y 41). Además, Thouret *et al.* (2016) reportaron una edad de 1.56 ± 0.32 Ma, para las Ignimbritas Lomas que se ubican en la sección de Cotahuasi-Quillumsa. Así mismo, las Ignimbritas Lomas sobreyacen a las Ignimbritas Sencca superior y a su vez son cubiertas por flujos de lava de edad Pleistoceno temprano (Anexo C.19) (con edad de 1.46 Ma, reportado por Thouret *et al.* 2016).

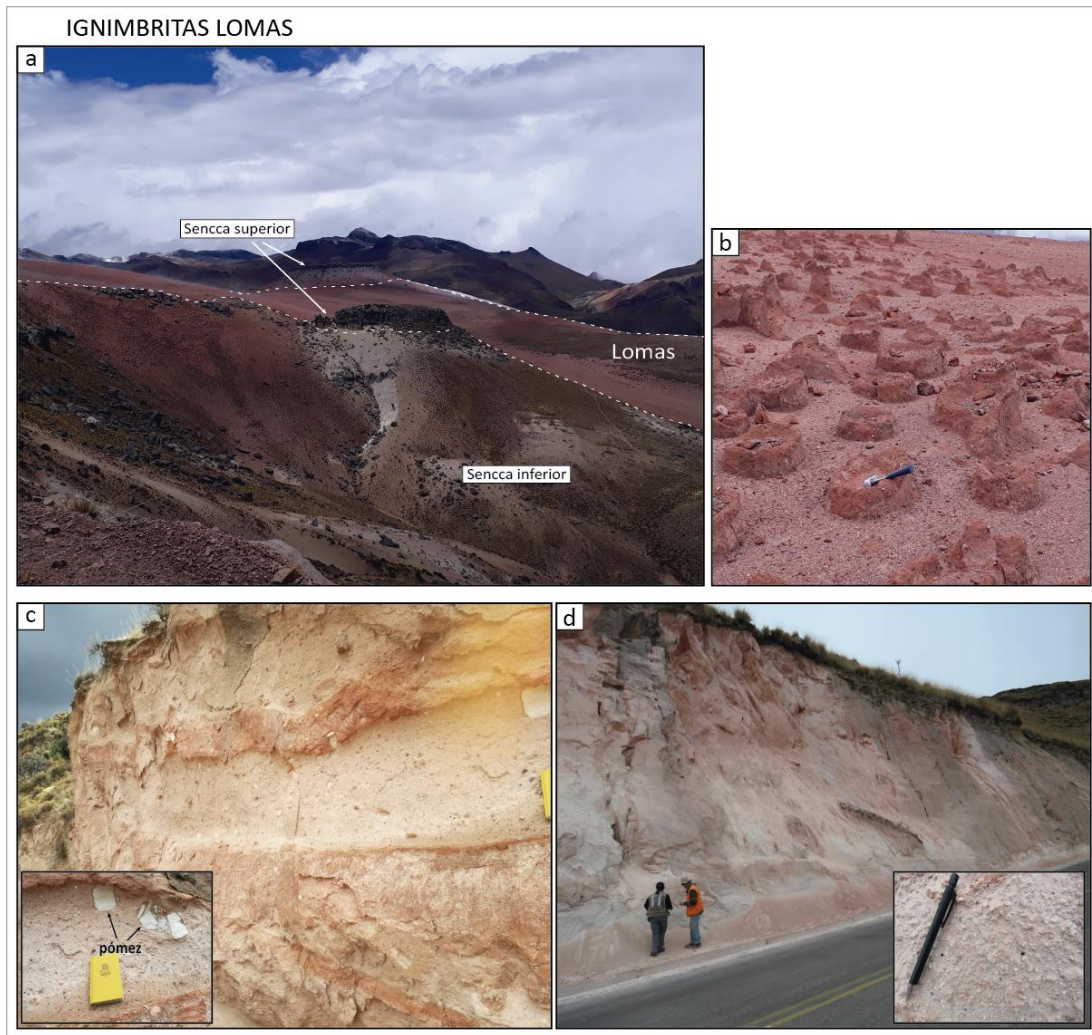


Figura 43. *Afloramientos de las Ignimbritas Lomas.* Ignimbritas Lomas que afloran en las secciones de Huaynacotas y Cotahuasi-Quillumsa. **a)** Ignimbritas Lomas a lo largo del camino hacia la Laguna Llanájile, 4 Km al NO y arriba del pueblo de Huaynacotas. Las Ignimbritas Lomas sobreyacen a las Ignimbritas del Grupo Sencca. **b)** Estructuras de gas pipe en el tope de las secuencias de las Ignimbritas Lomas. **c)** Depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza, en la base de las Ignimbritas Lomas, localizado arriba del pueblo de Huaynacotas. **d)** Depósitos masivos de flujos de tobas de ceniza, en el tope de la sección de Cotahuasi – Quillumsa.



5.1.1.8. Depósitos de CDP Capilla (Qp-ca)

Los depósitos de CDP Capilla, están presentes a 6 Km al NEE aguas arriba del pueblo de SJA y a 5 Km al oeste arriba del pueblo de Charcana. Se ha descrito entre 30 – 40 m de espesor, de depósitos masivos de flujos de tobas ricas en cristales y grado de soldadura endurecido a ligeramente soldado (II-III) (figura 44b y 44c). Los depósitos CDP Capilla, sobreyacen a las Ignimbritas del Grupo Sencca, además son cubiertos por lavas de edad Pleistoceno que pertenecen al Grupo Barroso (figura 28 y 29). Los depósitos CDP Capilla se extienden entre los cañones del Río Huanca Huanca y el Río Cotahuasi, de tal modo que coronan formando mesetas altas.

Thouret *et al.* (2016) describieron y dataron unas “Ignimbritas Capilla”, en el NE del cañón del Río Huarcaya (cerca de los pueblos de Capilla y Culipampa), que consisten de depósitos masivos de flujos de tobas de lapilli, de color gris y soldadas formando estructuras de columnas. Además Thouret *et al.* (2016) reportaron una edad de 0.91 ± 0.05 Ma para las “Ignimbritas Capilla”. Los depósitos de CDP Capilla sobreyacen a las Ignimbritas Sencca inferior y a su vez se encuentran cubiertas por lavas de edad Pleistoceno.

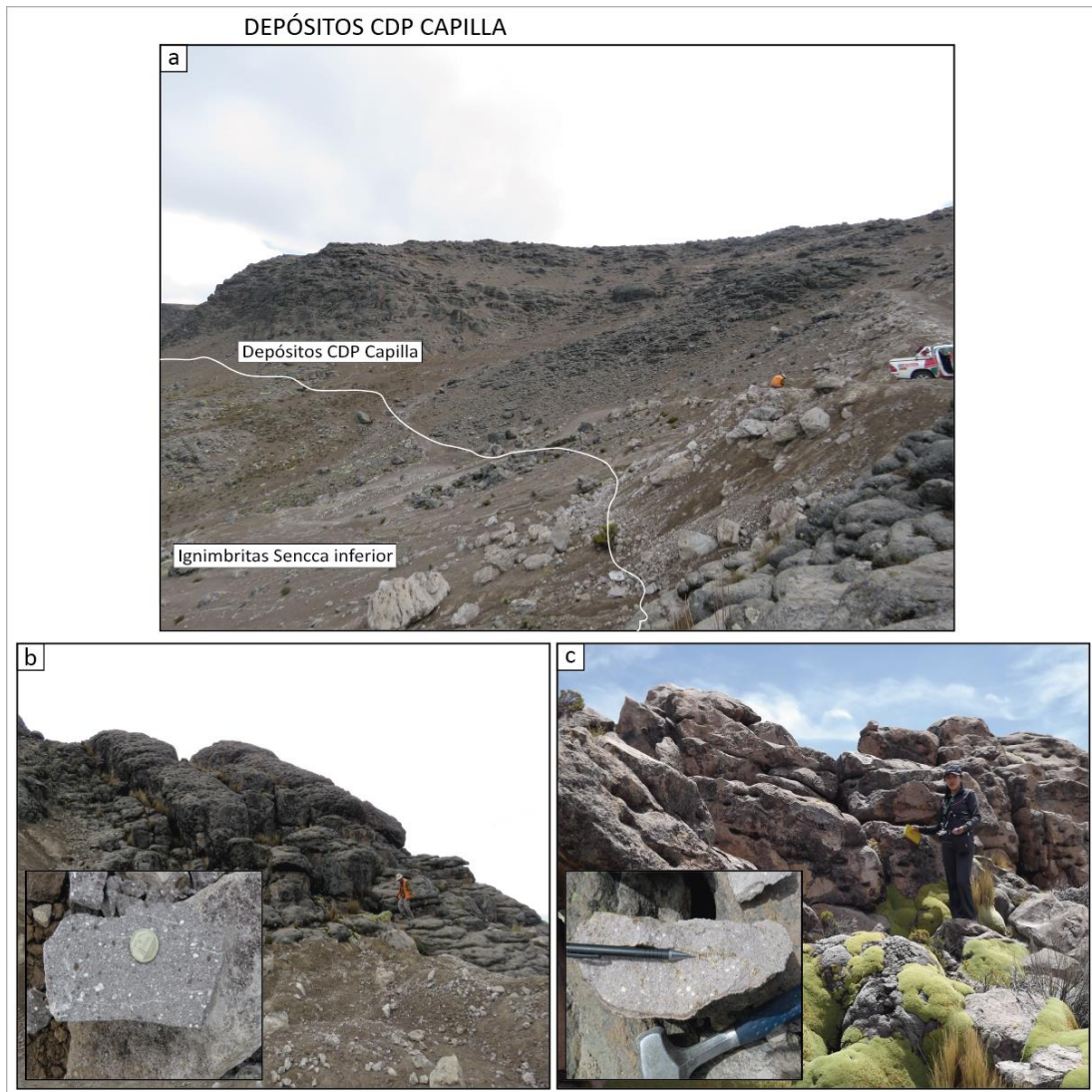


Figura 44. *Afloramientos de los Depósitos CDP Capilla.* Depósitos de CDP Capilla que afloran en la secciones de SJA y Corcuilla – Charcana. Los depósitos CDP Capilla coronan mesetas altas. **a)** Los depósitos CDP Capilla sobreyacen a las Ignimbritas Sencca inferior, en el lado este del cañón del Río Huanca Huanca. **b)** Litofacies que consiste de flujos de tobas ricas en cristales, endurecidos a ligeramente soldados, ubicado a 6 Km al NEE arriba del pueblo SJA en el lado este del cañón del Río Huanca Huanca. **c)** Litofacies que consiste de flujos de tobas ricas en cristales, ubicado a 5 Km al oeste y arriba del pueblo de Charcana.

5.1.2. Litofacies, petrografía y petrología de ignimbritas y depósitos de CDP

5.1.2.1. Ignimbritas Alpabamba (Nm-al)

Se ha identificado dos litofacies para las Ignimbritas Alpabamba: **1)** litofacies de tobas ricas en pómez y ceniza, con grado de soldadura suelto a endurecido (muestras PIG-13-21 y PIG-13-20), están ubicadas en la base de las Ignimbritas Alpabamba; y **2)** litofacies de tobas ricas en cristales y ceniza, con grado de soldadura endurecido (muestra PIG-17-10), está ubicado cerca al tope de las Ignimbritas Alpabamba.

Las **litofacies 1**, se ha descrito en el pueblo de Puica (norte del cañón del Río Huarcaya) y a 1 Km al SEE del pueblo de Pampamarca. Las litofacies 1 consisten de tobas ricas en pómez y ceniza, de color rosado y sueltos a endurecidos (grado de soldadura I-II). Presentan textura clástica, pobremente sorteada y la matriz se compone principalmente de ceniza y vidrio (figura 45a - 45f). Los componentes se han ordenado según su abundancia como sigue: juvenil > cristales > líticos (tabla 4, anexo C.1 y C.2).

El componente juvenil representa en promedio entre el 40 – 60 % y consiste de pómez, shards y vidrio en la matriz. En sección delgada, las pómez son de color gris claro a incoloras, fibrosas y porosas, ligeramente aplastadas y no presentan signos de devitrificación (figura 45b y 45e). Los shards están presentes en la matriz, son incoloros, con formas redondeadas y planas y además no están devitrificados (tabla 5, anexo C.1 y C.2).

Los cristales representan en promedio entre el 5 – 10 % y según su abundancia se componen de plagioclasas > feldespatos > cuarzos > biotitas > óxidos (tabla 6). En sección delgada, los cristales tienen formas subhedrales y están ligera a moderadamente rotos, a excepción de las biotitas que se encuentran fuertemente rotos y deformados

(figura 45c y 45f). El vidrio volcánico crece en las fracturas de los cristales y no muestra signos de devitrificación.

Los componentes líticos que representan entre 1 – 3 % son líticos accesorios, que son principalmente fragmentos de lava (tabla 6, anexo C.1 y C.2).

Las **litofacies 2**, se ha descrito en el lado SE del Río Huacmi Mayoc, aguas arriba del Río Oyolo. Las litofacies 2, consisten de tobas ricas en cristales y ceniza, de color blanco verdoso, endurecido (grado de soldadura II), de textura clásica y pobremente sorteada (figura 45g - 45i). La matriz principalmente es compuesta de ceniza, mientras que los componentes se ordenan según su abundancia como: juvenil > cristales > líticos (tabla 4).

El componente juvenil representa en promedio entre el 40 – 60 %, y está compuesto principalmente de vidrio volcánico (tabla 5). El vidrio se presenta de manera masiva en la matriz, está ligeramente deformado a aplanado y no presenta signos de devitrificación (anexo C.3).

El componente cristalino en promedio representa entre el 10 – 30 % y se compone de feldespatos > plagioclasas > cuarzos > biotitas > carbonatos > óxidos (tabla 6). En sección delgada, los cristales son subhedrales, moderado a fuertemente rotos y sin signos de devitrificación. Además, los cristales de biotita se encuentran fuertemente deformados, mientras que los carbonatos se encuentran masivos en la matriz y ligeramente aplastados (figura 45i y anexo C.3).

Los componentes líticos que representan entre 1 – 3 % son líticos accesorios, que se componen de fragmentos de lava, sub-redondeados, con texturas porfirítica y micro-porfirítica (tabla 6 y anexo C.3).

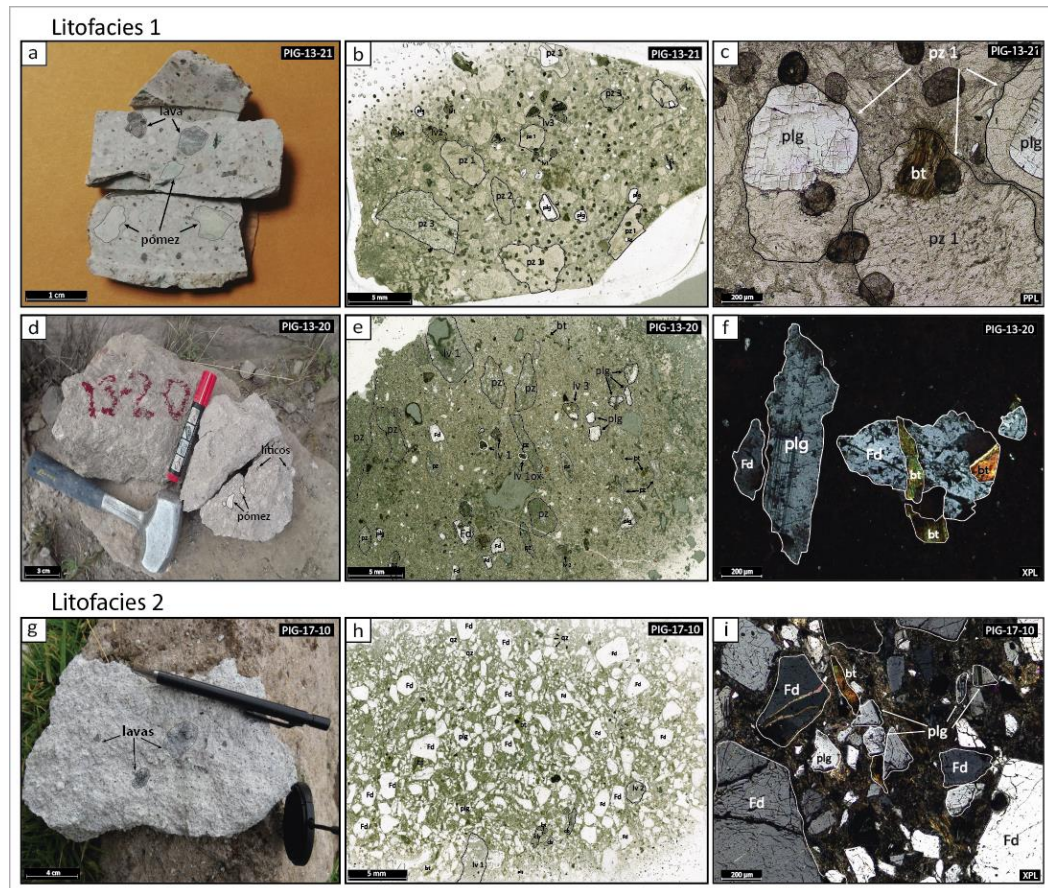


Figura 45. *Litofacies de las Ignimbritas Alpabamba.* **a) a f) Litofacies 1** de tobas ricas en pómez y ceniza (PIG-13-21 y PIG-13-20). Las secciones delgadas de ignimbritas b), c) y e) muestran principalmente el contenido de pómez. Los cristales que se muestran en las secciones c) y f) son subhedrales y ligera a moderadamente rotas. **g) a i) Litofacies 2** de tobas ricas en cristales y ceniza (PIG-17-10). Las secciones delgadas de ignimbritas h) e i), muestran cristales subhedrales y fuertemente rotos.

5.1.2.2. Ignimbritas Chuquibamba (Nm-chu)

Se ha reconocido tres litofacies para las Ignimbritas Chuquibamba: **1)** litofacies de tobas ricas en cristales, con grado de soldadura endurecido a ligeramente soldado (muestra PIG-17-02); **2)** litofacies de tobas ricas en pómez y ceniza, con grado de soldadura ligeramente a moderadamente soldado (muestras PIG-17-03 y PIG-17-06) y **3)** litofacies de tobas de ceniza ricas en pómez y con grado de soldadura entre endurecido a ligeramente soldado (muestras GR30A-17-060 y GR30A-17-061). Las tres litofacies de



las Ignimbritas Chuquibamba, se han descrito en el lado este del cañón del Río Huanca-Huanca y aguas arriba del pueblo de SJA.

Las **litofacies 1** consisten de tobas ricas en cristales, de color gris rosáceo y endurecido a ligeramente soldado (grado de soldadura II-III). Estas litofacies tienen textura microclástica y moderadamente sorteada (figura 46 a- 46c). La matriz se compone principalmente de ceniza blanca rosácea y los componentes se han ordenado según su abundancia como: juvenil > cristales > líticos (tabla 4).

El componente juvenil en promedio 60 – 70 %, consiste de pómez y vidrio. En una muestra de mano, las pómez son de color blanco rosáceas, masivas y ligeramente aplastadas, mientras que el vidrio volcánico se encuentra de forma masiva en la matriz (tabla 5). En sección delgada, las pómez son incoloras con ligeros tonos amarillos, masivas y fibrosas, ligeramente aplastadas y con inter-crecimiento de cristales (p. ej. plagioclasas y biotitas). También se ha observado que en sección delgada, las pómez están ligera a fuertemente devitrificadas mostrando esferulitas (anexo C.4). El vidrio volcánico en sección delgada es incoloro, está presente de forma masiva en la matriz, no muestra deformación, además se observa inter-crecimiento de vidrio en pequeños cristales rotos.

Los cristales representan entre el 10 – 20 % y se componen según su abundancia como sigue: plagioclasas > feldespatos > cuarzos \geq biotitas > zeolitas \geq óxidos (tabla 6). En secciones delgadas, los cristales son subhedrales, fuertemente rotos y en particular las biotitas están fuertemente deformadas. Los cristales rotos presentan en sus fracturas inter-crecimiento de vidrio fuertemente devitrificado (figura 46c y anexo C.4). El componente lítico representa < 1 % y son líticos accesorios, que consisten de fragmentos de lava con textura porfírica y textura afanítica (tabla 6, anexo C.4).

Las **litofacies 2** consisten de tobas ricas en pómez y ceniza, de color blanco a ligeramente amarillo y gris, son ligera a moderadamente soldadas (grado de soldadura III-IV). Las litofacies 2 tienen texturas clásticas y moderadamente sorteadas. La matriz consiste principalmente de ceniza, además los componentes se ordenan según su abundancia como: juvenil > cristales > líticos (tabla 4).

Los componentes juveniles representan en promedio entre 30 – 60 % y consisten de pómez y vidrio. En muestras de mano, las pómez son de colores amarillos, fibrosos y porosos, mientras que el vidrio se presenta de forma masiva en la matriz (tabla 5). En secciones delgadas, las pómez son incoloros y amarillos, fibrosos y ligera a moderadamente deformados y aplastados (anexo C.5 y C.8). Las pómez presentan inter-crecimiento de cristales (p. ej. plagioclasas y feldespatos), además se encuentran ligeramente a fuertemente devitrificados mostrando esferulitas (figura 46j). El vidrio y los shards están presentes en la matriz, en algunos casos crece en las fracturas de pómez y cristales rotos.

Los cristales representan en promedio entre el 5 – 10 % y se ha clasificado de acuerdo a su abundancia como: plagioclasas \geq feldespatos > cuarzos > biotitas > anfíboles > óxidos (tabla 6). En sección delgada, los cristales son subhedrales y ligera a fuertemente rotos. Algunos cristales de plagioclasas y feldespatos, se encuentran fuertemente devitrificados mostrando esferulitas y alterando a arcillas (sericitas) (figura 46k y anexos C.5 y C.8). Los cristales de biotita en particular, están fuertemente deformados y aplastados, además presenta inter-crecimiento de vidrio en sus planos de exfoliación y en algunos casos están alterándose a cloritas (figura 46i). Los componentes líticos representan entre el 1 – 5 % y consisten de fragmentos de lavas como líticos accesorios, lavas oxidadas como líticos accidentales y areniscas como xenolitos (tabla 6).



Las **litofacies 3** consisten de tobas de ceniza ricas en pómez, de color blanco y son endurecidos a ligeramente soldadas (grado de soldadura II-III) (figura 46m – 46o). Las litofacies 3, presentan textura micro-clástica y bien sorteada. La matriz se compone principalmente de ceniza blanca y los componentes se han ordenado según su abundancia como: juvenil > cristales > líticos (tabla 4).

El componente juvenil en promedio 40 – 60 % consiste de pómez y vidrio. En muestras de mano, las pómez son de color blanco, masivas y porosas, mientras que el vidrio se encuentra de forma masiva en la matriz (tabla 5). En el estudio de secciones delgadas, se ha observado que las pómez son incoloras, ligera a moderadamente aplastadas y presentan inter – crecimiento de cristales (p. ej. feldespatos, cuarzo y zeolitas). Las pómez y el vidrio de la matriz se encuentran fuertemente devitrificadas y mostrando esferulitas (figura 46o y anexos C.6 y C.7).

Los cristales representan en promedio entre el 5 – 10 % y según su abundancia se clasifica como sigue: feldespatos > cuarzos > biotitas > carbonatos > zeolitas \geq óxidos (tabla 6). En secciones delgadas, los cristales son anhedrales a subhedrales y están ligera a fuertemente rotos. Algunos cristales de feldespatos se alteran a arcillas y se muestran fuertemente devitrificados. Así mismo los cristales de zeolitas normalmente crecen en la matriz y en espacios abiertos y están débilmente devitrificados (anexos C.6 y C.7). El componente lítico representa entre el 1 – 3 % y consisten en fragmentos de lavas como líticos accesorios y areniscas como xenolitos (tabla 6 y anexos C.6 y C.7).

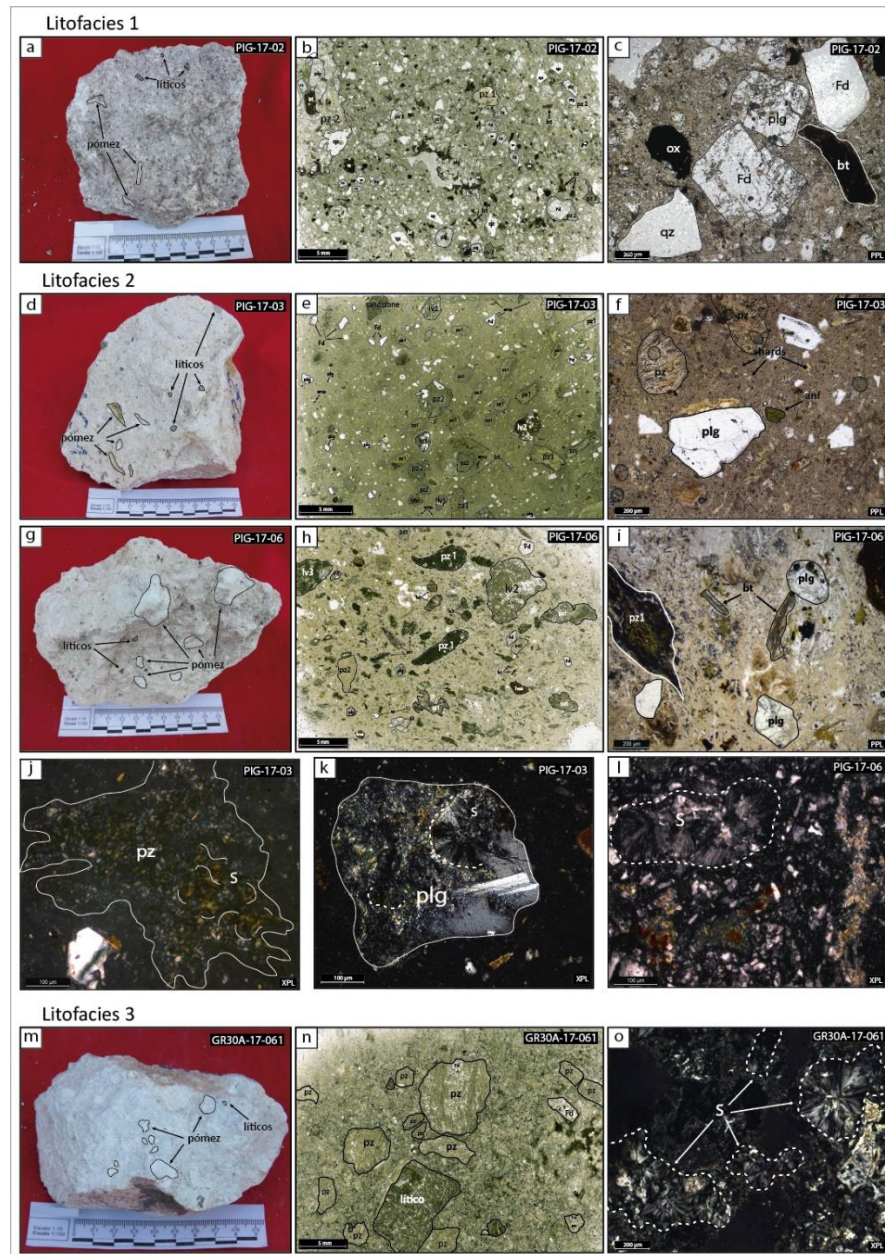


Figura 46. *Litofacies de las Ignimbritas Chuquibamba.* **a) a c) Litofacies 1** de tobas ricas en cristales (PIG-17-02). Las secciones delgadas de ignimbritas b) y c) muestran cristales rotos y fuertemente deformados dentro de una matriz vítrea. **d) a l) Litofacies 2** de tobas ricas en pómez y ceniza (PIG-17-03 y PIG-17-06). Las secciones delgadas de ignimbritas e), f), h), i), j) y l), muestran cristales rotos, las pómez se encuentran fuertemente devitrificados y rotos. En la figura k) se muestra un cristal de plagioclasa fuertemente devitrificado mostrando una esferulita (S). **m) a o) Litofacies 3**, consiste de tobas de ceniza ricas en pómez (GR30A-17-060). La sección delgada en o), muestra las pómez y el vidrio con niveles fuertes de devitrificación.



5.1.2.3. Ignimbritas Huarcaya (Nm-hu)

Para las Ignimbritas Huarcaya, se ha identificado una litofacie en la base de las secuencias, ubicado en el lado este del cañón del Río Huanca Huanca a 1 Km al norte del pueblo de SJA. Ésta litofacie (muestra PIG-17-M16, figura 47), consiste de una toba rica en ceniza, endurecida a ligeramente soldada (grado de soldadura II-III). Además presenta una textura microclástica y bien sorteada. La matriz está compuesta principalmente de ceniza blanca y vidrio, los componentes se ordenan de acuerdo a su abundancia como: juvenil > cristales > líticos (tabla 4 y anexo C.9).

El componente juvenil en promedio 40 – 60 % consiste de vidrio y pómez (tabla 5). En sección delgada, las pómez están fuertemente devitrificadas y muestran texturas de esferulitas en sus alrededores (anexo C.9). El vidrio, se presenta de forma masiva en la matriz y al igual que las pómez tiene un nivel de devitrificación alto (figura 47).

Los cristales representan en promedio el 5 – 15 % y según su abundancia se le ha ordenado como: cuarzos > zeolitas > plagioclasas \geq feldespatos > óxidos > otros (tabla 6 y anexo C.9). En análisis de secciones delgadas, se ha observado que los cristales tienen formas subhedrales y están fuertemente rotos. Se ha observado que algunos cristales rotos de feldespatos y plagioclasas se alteran a arcillas, además presentan intercrecimiento de óxidos a través de sus fracturas.

El componente lítico representa en promedio < 0.5 %, consiste principalmente de líticos cognatos, los cuales son representados por fragmentos de lavas, que poseen textura afanítica, y con una composición similar al de la matriz que los rodea (tabla 6 y anexo C.9).

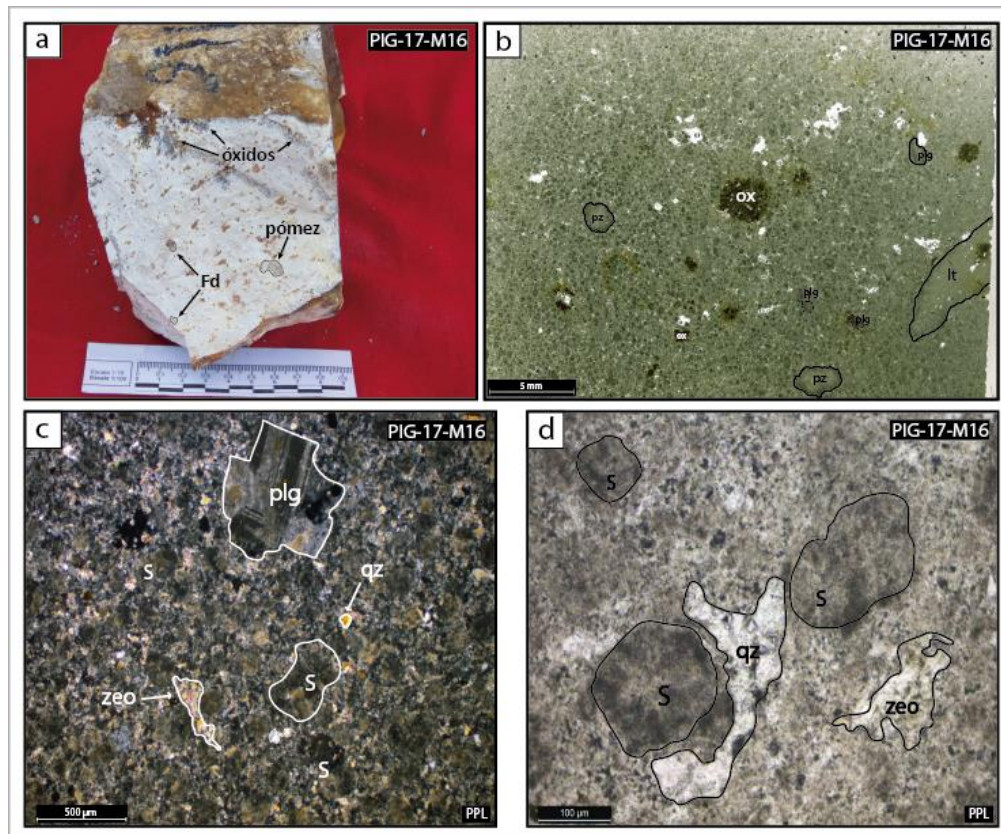


Figura 47. Litofacies de las Ignimbritas Huarcaya. En a) y b) se observa la litofacie de toba rica en ceniza (FIG-17-M16). Las secciones delgadas de ignimbritas, figuras c) y d) muestran los cristales en una matriz vítrea. En d) la matriz está fuertemente devitrificada y se observan esferulitas (S).

5.1.2.4. Ignimbritas Caraveli (Nm-ca)

Para las Ignimbritas Caraveli, se ha reconocido dos litofacies: **1)** litofacies de tobas de ceniza ricas en pómez, sueltas a endurecidos (muestra GR30A-17-087) y fueron descritas en la base y el tope de las secuencias de las Ignimbritas Caraveli; **2)** litofacies de tobas ricas en cristales y ceniza, son sueltas a endurecidos (muestras FIG-10-54-A, FIG-11-39). Ambas litofacies fueron descritas en ambos lados del valle del Río Arma, aguas arriba del pueblo de Salamanca.

Las **litofacies 1**, consisten de tobas de ceniza ricas en pómez, son de color beige blanquecino y son sueltas a endurecidos (grado de soldadura I-II). Poseen una textura clásica y pobremente sorteada (figura 48a). La matriz consiste principalmente de ceniza



y los componentes han sido ordenados según su abundancia como: juvenil > cristales > líticos (tabla 4).

Se ha realizado un análisis a escala macroscópica de las litofacies. Se ha observado que el componente juvenil en promedio 15 - 20 % consiste de pómez y vidrio masivo en la matriz, además las pómez son masivas y aplastadas (tabla 5). El componente cristalino representa entre 5 – 10 %, y consiste en cristales con formas subhedrales y fuertemente rotos, además según su abundancia se clasifican como: feldespatos > cuarzos > biotitas > otros (tabla 6). El componente lítico, con un porcentaje entre 1 – 5 %, se compone de fragmentos de lavas y areniscas.

Las **litofacies 2**, consisten de tobas ricas en cristales y ceniza, de color gris claro y sueltas a endurecidas (grado de soldadura I-II). Las litofacies 2 tienen una textura microclástica y moderadamente sorteada (figura 48b y 48c). La matriz se compone principalmente de ceniza y vidrio masivo. Los componentes han sido ordenados según su abundancia como sigue: cristales > juvenil > líticos (tabla 4).

De acuerdo a un análisis de las litofacies 2 a nivel macroscópico, se ha observado que el componente juvenil representa el 10 – 20 % y consiste de pómez y vidrio. Las pómez son fibrosas y porosas, mientras que el vidrio se presenta de forma masiva en la matriz (tabla 5). El componente cristalino representa en promedio el 10 – 20 %, consiste de cristales de formas subhedrales y ligeramente rotos, además se los ha ordenado según su abundancia como: plagioclasas > feldespatos > cuarzos > biotitas (tabla 6). El componente lítico con un porcentaje entre 1 – 3 %, consiste principalmente de fragmentos de lava como líticos accesorios.

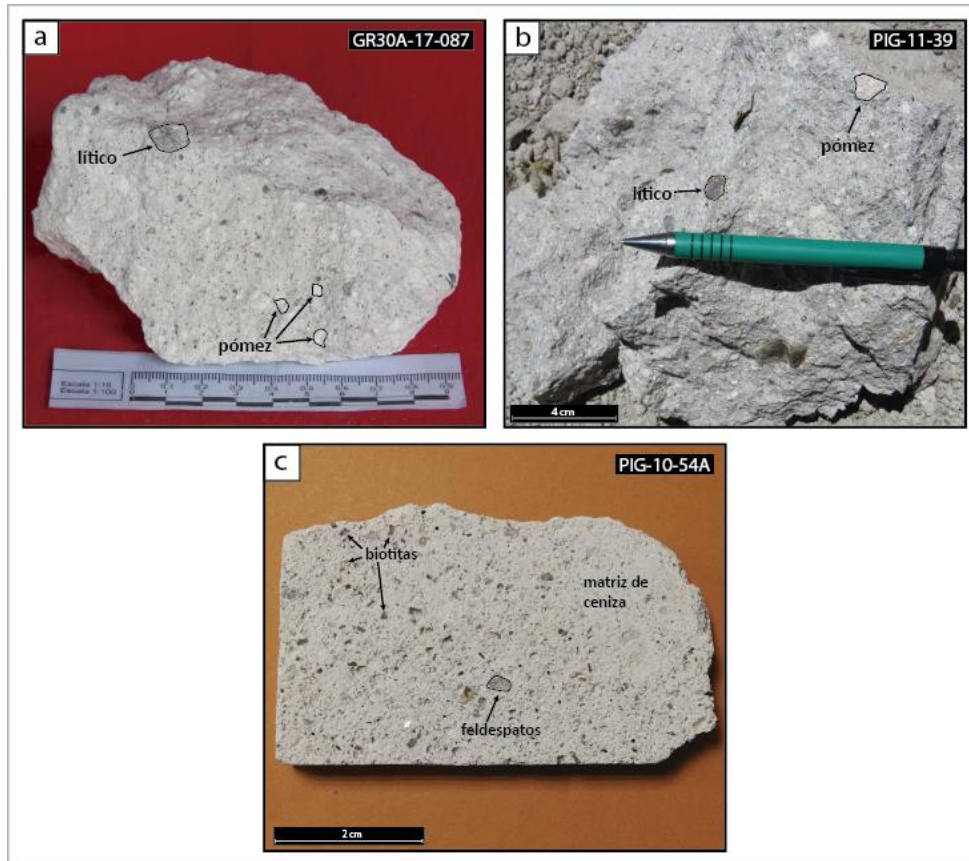


Figura 48. *Litofacies de las Ignimbritas Caraveli.* **a)** **Litofacies 1** consisten de tobas de ceniza ricas en pómez (GR30A-17-087). **b) y c)** **Litofacies 2** consisten de tobas ricas en cristales y ceniza (FIG-10-54A, FIG-11-39).

5.1.2.5. Ignimbritas del Grupo Sencca

Ignimbritas Sencca Inferior (Np-se)

Para las Ignimbritas Sencca Inferior, se ha reconocido tres litofacies: **1)** litofacies en la base de las secuencias, que consisten de tobas de ceniza ricas en pómez y líticos, con grado de soldadura entre suelto a endurecido (muestras FIG-17-15-bis y FIG-17-14); **2)** litofacies en el medio de las secuencias, consisten de tobas de pómez y ceniza, ligeramente soldado (muestras FIG-11-57-A, B); y **3)** litofacies en el tope de las secuencias, que consisten de tobas ricas en pómez y ceniza, con soldadura entre ligera a moderadamente soldadas (muestras FIG-17-04 y GR30A-17-074).

Las **litofacies 1** han sido descritas a 2 km al oeste arriba del pueblo de Huaynacotas y a 2 Km al SEE arriba del pueblo de Quillumsa. Estas litofacies consisten de tobas de ceniza ricas en pómez y líticos, de color blanco rosáceo y son sueltos a endurecidos (grado de soldadura I-II), así mismo presentan una textura clásica y pobremente sorteada (figura 49a – 49f). La matriz está compuesta principalmente de ceniza, y los componentes han sido ordenados según su abundancia como sigue: juvenil > líticos > cristales (tabla 4).

El componente juvenil consiste en promedio entre 20 – 60 % de pómez y vidrio. Las pómez son fibrosas y ligeramente aplastadas, mientras que el vidrio se encuentra de forma masiva en la matriz (tabla 5). En secciones delgadas, se observó que las pómez son incoloras, vesiculares y fibrosas, además tienen inter-crecimiento de cristales (p. ej. plagioclasas, óxidos, y vidrio volcánico), así también algunas pómez están fuertemente devitrificadas mostrando esferulitas (anexos C.11, C.12). En los afloramientos se han identificado, fiammes formados de vitrófiros. Se ha elaborado una sección delgada de la muestra de un vitrófiro (muestra PIG-17-15), y se ha observado que presenta intercrecimiento de algunos cristales y muy pocas pómez (anexo C.10).

El componente cristalino representa en promedio el 5 – 10 % y según su abundancia se los ha ordenado como: feldespatos \geq plagioclasas > biotitas \geq cuarzos \geq piroxenos \geq anfíboles > óxidos (tabla 6). En secciones delgadas, se ha observado que los cristales están moderada a fuertemente rotos con relleno de vidrio por sus fracturas (anexos C.10, C.11, C.12).

El componente lítico representa entre 5 – 15 %. Se ha observado líticos accesorios que consisten de fragmentos de lavas, líticos accidentales representados por fragmentos de lavas oxidadas y xenolitos que consisten de areniscas (anexos C.11, C.12).



Las **litofacies 2** han sido descritas en el acantilado ubicado al NO y arriba del pueblo de Pampamarca. Las litofacies 2 consisten de tobas de pómez y ceniza, de colores que varían entre rosados a amarillos (figura 49g y 49j), además son ligeramente soldadas (grado de soldadura III). Poseen una textura micro-clástica y moderadamente sorteada. La matriz se compone principalmente de ceniza y los componentes se han ordenado de acuerdo a su abundancia como: juvenil > cristales > líticos (tabla 4).

Los diversos componentes, han sido identificados y estudiados a nivel macroscópico. Los componentes juveniles representan entre el 10 – 30 % y se componen de pómez y vidrio. Las pómez son de formas fibrosas y vesiculares, de colores blancos y marrones, mientras que el vidrio se presenta de forma masiva en la matriz (tabla 5). El componente cristalino representa en promedio entre 5–15 % y los cristales han sido ordenados según su abundancia como: plagioclasas \geq feldespatos > biotitas > cuarzo (tabla 6). Los cristales son de formas subhedrales y están ligeramente rotos. Los componentes líticos representan < 2 % y consisten de líticos accesorios que son principalmente fragmentos de lava (tabla 6).

Las **litofacies 3** han sido reconocidas a 9 Km al NE arriba del pueblo de SJA, y arriba del pueblo de Charcana (lado oeste del cañón del Río Cotahuasi). Las litofacies 3 consisten de tobas ricas en pómez y ceniza, de color blanco y son ligera a moderadamente soldadas (grado de soldadura III-IV). Poseen texturas clásticas y pobremente sorteadas, además la matriz consiste principalmente de ceniza blanca (figura 49k - 49m). Los componentes han sido ordenados según su abundancia como: juvenil > cristales > líticos (tabla 4).

De acuerdo a estudios macroscópicos, el componente juvenil representa entre el 20 – 40 % y consiste de pómez y vidrio (tabla 5). Las pómez presentan colores verdes y



amarillos, son de formas porosas y fibrosas, además están ligeramente aplastadas y en algunas muestras se presentaban formando fiammes. Se considera que el vidrio se presenta de forma masiva en la matriz. El componente cristalino en promedio representa entre el 5 – 10 %. Los cristales son de formas subhedrales y ligeramente rotos, además han sido ordenados según su abundancia como: feldespatos > biotitas > cuarzo > anfíboles > otros (tabla 6). El componente lítico en promedio 1 – 5 % consiste de fragmentos de lavas como líticos accesorios, lavas oxidadas como líticos accidentales y areniscas como xenolitos.



Ignimbritas Sencca Superior (Qp-se)

Se ha reconocido tres litofacies para las Ignimbritas Sencca superior: **1)** litofacies en la base de las secuencias, que consisten en tobas ricas en pómez y ceniza con grado de soldadura suelto (muestra PIG-17-13); **2)** litofacies en el medio de las secuencias, que consisten en tobas de pómez y ceniza, con grado de soldadura entre ligera a moderadamente soldada (muestra GR30A-17-083) y **3)** litofacies en el tope de las secuencias, que consisten en tobas de ceniza ricas en pómez, con grado de soldadura suelto (PIG-17-11).

Las **litofacies 1** han sido descritas a 4 Km al NEE arriba del pueblo Toro (Cerro Quimsa Orco). Las litofacies 1 consisten de tobas ricas en pómez y ceniza, de color blanco y suelto (grado de soldadura I). Presentan texturas clásticas y pobremente sorteadas (figura 50a - 50c) y la matriz está compuesta principalmente de ceniza blanca. Los componentes han sido ordenados según su abundancia como: juvenil > cristales > líticos (tabla 4).

Los componentes juveniles representan el 40 – 60 % y consisten principalmente de pómez. Las pómez son de color blanco, porosas, fibrosas y débilmente aplastadas (tabla 5). En secciones delgadas, las pómez son incoloras y presentan inter-crecimiento de cristales (p. ej. plagioclasas, biotitas y anfíboles) (figura 50b, anexo C.14).

El componente cristalino representa en promedio 10 – 20 % y ha sido ordenado según su abundancia como: plagioclasas > feldespatos > biotitas > cuarzo > anfíboles > piroxenos (tabla 6). En secciones delgadas, los cristales son euhedrales a subhedrales, ligeros a fuertemente rotos y no presentan devitrificación. Los cristales de biotita en particular, presentan inter-crecimiento de algunos cristales de titanina y óxidos. El



componente lítico en promedio representa $< 1 \%$ y está constituido de fragmentos de lava como líticos accesorios (anexo C.14).

Las **litofacies 2** han sido descritas en el Cerro Pararapa, ubicado a 6 Km al NO del pueblo de Huaynacotas. Estas litofacies consisten de tobas de pómez y ceniza, de color blanco amarillento y son ligera a moderadamente soldadas (grado de soldadura III-IV) (figura 50d - 50f). La matriz está compuesta principalmente por ceniza y vidrio, además los componentes han sido ordenados según su abundancia como: juvenil $>$ cristales $>$ líticos (tabla 4).

El componente juvenil representa entre el 40 – 70 % y consiste principalmente de vidrio y pómez. El vidrio se encuentra masivo en la matriz, mientras que las pómez son porosas y están ligeramente deformadas (tabla 5). En secciones delgadas, se ha observado que las pómez presentan inter-crecimiento de cristales (p. ej. cuarzo, biotitas, anfíboles, óxidos), además se encuentran fuertemente devitrificados mostrando esferulitas (figura 50f, anexo C.15).

El componente cristalino representa en promedio entre 10 – 25 % y según su abundancia se ha ordenado como: plagioclasas $>$ feldespatos $>$ biotita $>$ cuarzos $>$ anfíboles (tabla 6, anexo C.15). En secciones delgadas, los cristales están ligera a moderadamente rotos, además se observa inter-crecimiento de vidrio por las fracturas de los cristales. En caso de las biotitas, éstas se presentan fuertemente deformadas y con inter-crecimiento de vidrio y óxidos en sus planos de exfoliación (figura 50f). Finalmente, el componente lítico consiste en promedio $< 2 \%$ de fragmentos de lava (tabla 6, anexo C.15).

Las **litofacies 3** se han descrito en el Cerro Pucaorcco, ubicado a 4 Km al oeste y arriba del pueblo de Charcana. Las litofacies 3 consisten de tobas de ceniza ricas en



pómez, de color blanco rosáceo y suelto (grado de soldadura I). Presenta una textura clástica y pobremente sorteada (figura 50g), además la matriz se compone principalmente de ceniza. Los componentes han sido ordenados según su abundancia como: juvenil > líticos > cristales.

Se ha descrito esta litofacie a nivel macroscópico en campo, y el componente juvenil consiste en promedio 40 – 50 % de pómez (figura 50g y 50h). Las pómez son de color blancas, porosas y están débilmente deformadas. En secciones delgadas las pómez son incoloras y presentan inter-crecimiento de algunos cristales (p. ej. plagioclasa y biotita), así lo demuestra la sección delgada de una pómez (anexo C.16). En los afloramientos de campo se ha observado que las pómez pueden tener diámetros entre 1 cm a 20 cm (figura 50h).

El componente cristalino representa en promedio 1 – 5 % y se lo ha ordenado según su abundancia como: plagioclasas \geq biotitas > óxidos. En secciones delgadas, los cristales son subhedrales, ligeramente rotos e inter-crecen en la matriz de ceniza y en algunas pómez (anexo C.16). El componente lítico representa en promedio entre 10 – 20 % y consiste de fragmentos de lava como líticos accesorios y areniscas como xenolitos. En los afloramientos en campo, se ha observado que los líticos pueden tener diámetros entre 5 cm a 20 cm.

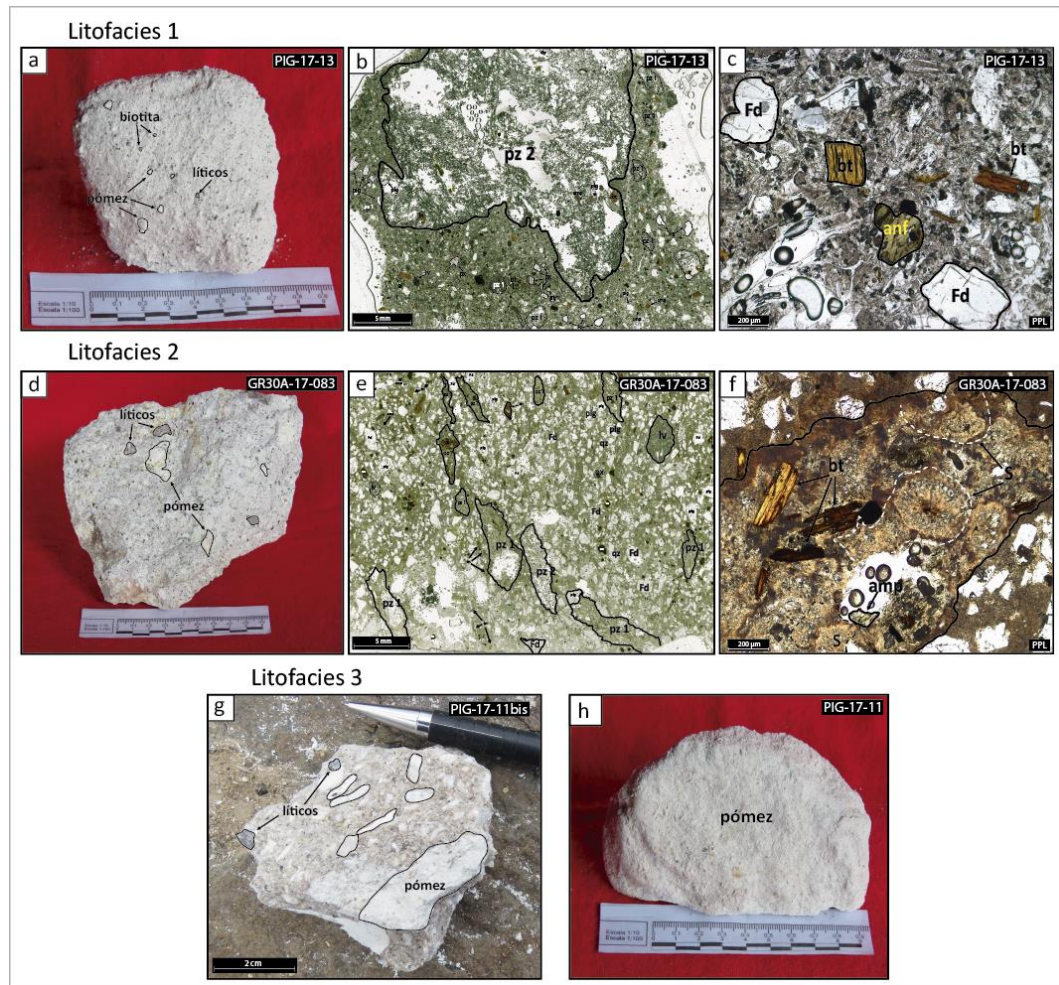


Figura 50. *Litofacies de las Ignimbritas Sencca Superior.* **a) a c) Litofacies 1**, consisten de tobas ricas en pómez y ceniza (PIG-17-13). Las secciones delgadas en b), muestran una pómez grande. La sección delgada en c) muestra el componente cristalino de las litofacies 1. **d) a f) Litofacies 2**, consisten en tobas de pómez y ceniza (GR30A-17-083). La sección delgada en e), muestra las pómez y los componentes cristalinos y líticos. La sección delgada en f) muestra una pómez con esferulitas (S) e inter-crecimiento de cristales. **g) y h) Litofacies 3**, son tobas de ceniza ricas en pómez (PIG-17-11). En la foto g) se observa pómez y algunos líticos con tamaños > 2 cm. En la foto h) se observa una pómez de tamaño > 5 cm.

5.1.2.6. Ignimbritas Lomas (Qp-lo)

Se ha descrito una litofacie (muestra GR30A-17-081) en el tope de las secuencias de las Ignimbritas Lomas, que se ubican a lo largo del camino hacia la Laguna Llanájile a 4 Km al NO arriba del pueblo de Huaynacotas. Las ignimbritas Lomas consisten de tobas de ceniza ricas en pómez, de color rojo y son sueltas (grado de soldadura I). Poseen

una textura clástica y moderadamente sorteada (figura 51a). La matriz se compone principalmente de ceniza rojiza y los componentes han sido ordenados según su abundancia como: juvenil > cristales > líticos (tabla 4).

Las litofacies de las Ignimbritas Lomas, han sido descritas a nivel macroscópico en muestras de mano. El componente juvenil es representado en promedio 15- 20 % por pómez, las cuales son de color rojizo, de formas fibrosas y porosas (tabla 5). En los afloramientos en campo se ha reconocido pómez con tamaños desde 1 cm hasta 20 cm de longitud (figura 51b).

Los cristales representan en promedio 5 – 10 % y han sido ordenados según su abundancia como: feldespatos \geq obsidiana > cuarzo > otros (tabla 6). Los cristales son de formas subhedrales y se encuentran ligeramente rotos. El componente lítico en promedio 1 – 5 % consiste de fragmentos de lavas y areniscas.

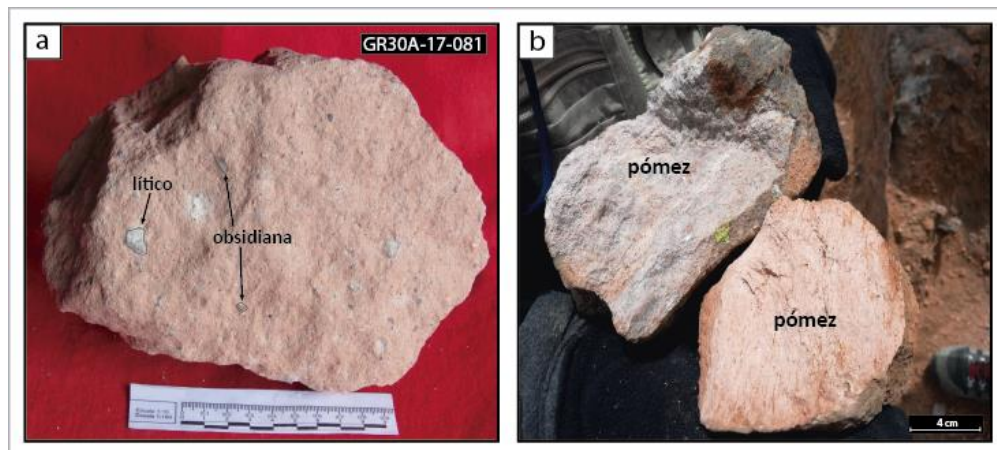


Figura 51. Litofacies de las Ignimbritas Lomas. En a) se observa la litofacies que consiste de tobas de ceniza ricas en pómez (GR30A-17-081). En la fotografía b) se muestra una pómez de tamaño entre 1 – 20 cm.

5.1.2.7. Depósitos de CDP Capilla (Qp-ca)

Para los depósitos de CDP Capilla, se ha descrito una litofacie, ubicado a 6 Km al NE del pueblo de SJA y a 5 Km al oeste arriba del pueblo de Charcana. La litofacie de



CDP Capilla consiste de tobas ricas en cristales, de color gris rosáceo y son endurecidos a ligeramente soldadas (grado de soldadura II - III) (muestra PIG-17-01). Poseen una textura micro- clásica y moderadamente sorteada (figura 52a y b). La matriz se compone principalmente de vidrio, mientras que los componentes han sido ordenados según su abundancia como: juvenil > cristales (tabla 4).

El componente juvenil es representado en promedio 60 – 80 % por vidrio. En una muestra de mano el vidrio es masivo en la matriz (tabla 5). En secciones delgadas, el vidrio es incoloro, además se encuentra fuertemente deformado, aplastado y fuertemente devitrificado ya que muestra textura esferulítica y axiolítica (figura 52c y anexo C.17).

El componente cristalino consiste en promedio 10 – 25 % y se ha ordenado según su abundancia como: plagioclasas > feldespatos > biotitas > cuarzos > anfíboles > óxidos (tabla 6). En secciones delgadas, los cristales se observan de formas subhedrales, moderadamente rotos, con inter-crecimiento de vidrio por sus fracturas (figura 52d y anexo C.17). En particular los cristales de biotitas están ligeramente aplastados y presentan oxidación. No se ha observado líticos.

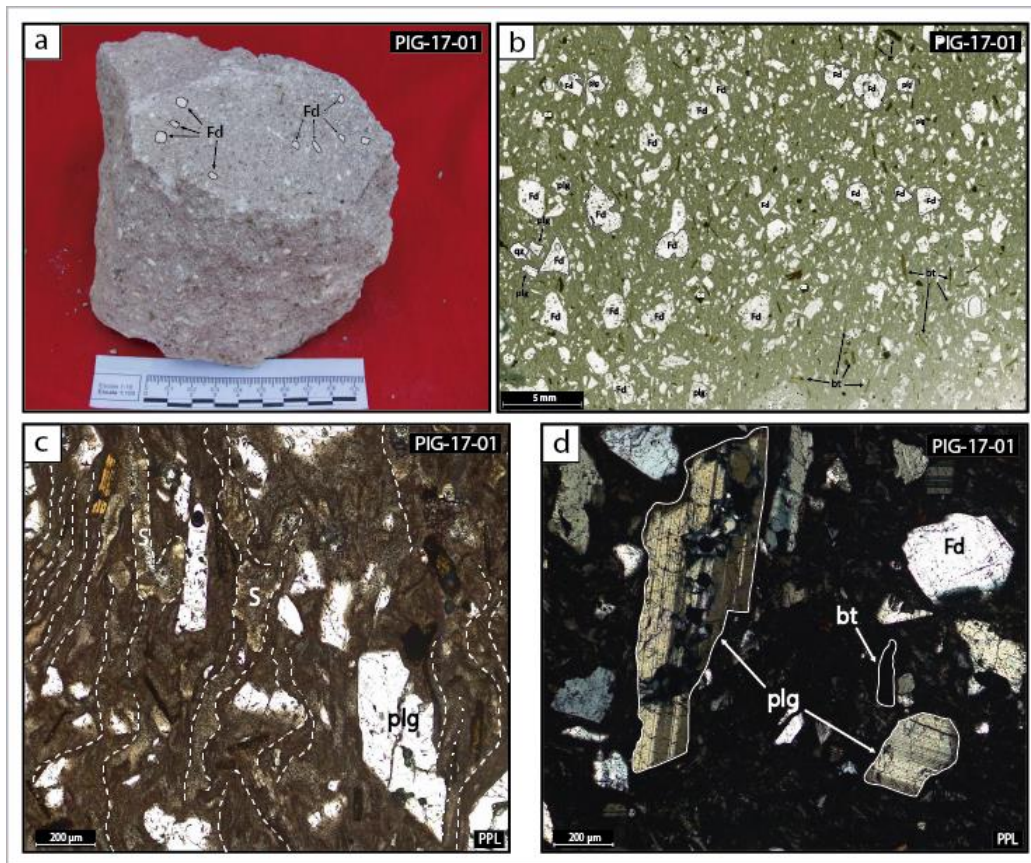


Figura 52. Litofacies de los Depósitos CDP Capilla. En **a)** Muestra de mano, que consiste en una toba rica en cristales. **b)** Sección delgada que muestra los componentes juvenil y cristalino. En la sección delgada **c)**, se muestra la matriz de vítrea fuertemente devitrificada mostrando esferulitas (S). **d)** Se observa cristales rotos y de formas subhedrales.

Tabla 4. Texturas y Principales Características de las Ignimbritas en la Región OCM

Capa de Ignimbrita	Localidad	Coord. Este/Norte/Altitud	Código muestra	Litología	Color	Matriz composición	Textura	Tamaño clastos / % clastos	Grado sorteamiento de granos	Vesicularidad (%)	Ranking componentes	Grado de soldadura	Características de devitrificación
CAPILLA													
Tope	Camino de Charcana a Oyoto	701616 / 8312684 / 4765	PIG-17-01	Toba de cristales	Gris rosado	Ceniza y vidrio	Micro clástica	Ceniza / 20-30	Moderado	Media (5-7)	juvenil > cristales	Endurecido a ligeramente soldado (II-III)	Ligera a moderadamente devitrificado
LOMAS													
Tope	Huaynacotas	731343 / 8329565 / 4461	GR30A-17-081	Ignimbrita	Rojizo	Ceniza	Clástica	Ceniza a lapilli / 10-15	Moderado	Media (7-10)	juvenil > cristales > líticos	Suelto (I)	-
GRUPO SENCICA													
Sencica superior													
Tope	Charcana	703023 / 8314028 / 4532	PIG-17-11	Pómez	Blanco	Ceniza	Micro clástica	Ceniza / 0-3	Alto	Alta (15-20)	juvenil > cristales	Suelto (I)	No devitrificado
Intermedio	Huaynacotas	731559 / 8329013 / 4395	GR30A-17-083	Ignimbrita	Blanco amarillento	Ceniza y vidrio	Clástica	Ceniza / 25-30	Moderado	Baja a media (1-6)	juvenil > cristales > líticos	Ligera a moderadamente soldado (III-IV)	Ligera a moderadamente devitrificado
Base	Quillumsa	726714 / 8312532 / 3893	PIG-17-13	Ignimbrita	Blanco	Ceniza	Clástica	Ceniza a lapilli / 5-10	Pobre	Muy alta (> 30)	juvenil > cristales > líticos	Suelto (I)	No devitrificado
Sencica inferior													
Cerca tope	San Javier de Alpacamba (SJA)	684832 / 8343144 / 4480	PIG-17-04	Ignimbrita	Blanco	Ceniza	Micro clástica	Ceniza a lapilli / 10-15	Pobre	Media (5-7)	juvenil > cristales > líticos	Endurecido a ligeramente soldado (II-III)	-
Cerca tope	Charcana	706787 / 8314254 / 3591	GR30A-17-074	Ignimbrita	Blanco	Ceniza	Clástica	Ceniza a lapilli / 10-15	Moderado	Media (5-10)	juvenil > cristales > líticos	Moderadamente soldado (III-IV)	-

Tabla 4. Continuación

Capa de Ignimbrita	Localidad	Coord. Este/ Norte/ Altitud	Código muestra	Litología	Color	Matriz composición	Textura	Tamaño clastos / % clastos	Grado sorteamiento de granos	Vesicularidad (%)	Ranking componentes	Grado de soldadura	Características de devitrificación
Intermedio	Pampamarca	725156 / 8327129 / 3855	PIG-11-57-A	Ignimbrita	Blanco rosáceo	Ceniza	Micro clásica	Ceniza a lapilli / 15-25	Moderado	Alta (15-25)	juvenil > cristales > líticos	Ligeramente soldado (III)	-
Intermedio	Pampamarca	725156 / 8327129 / 3855	PIG-11-57-B	Ignimbrita	Amarillo	Ceniza	Micro clásica	Ceniza a lapilli / 10-15	Moderado	Alta (15-25)	juvenil > cristales	Endurecido a ligeramente soldado (II-III)	-
Base	Quillumsa	726597 / 8315138 / 3151	PIG-17-14	Ignimbrita	Blanco rosáceo	Ceniza	Clásica	Ceniza a lapilli / 20-40	Pobre	Alta (20 - 25)	juvenil > líticos > cristales	Suelto a endurecido (I-II)	Ligeramente devitrificado
Base	Huaynacotas	732742 / 8326648 / 3784	PIG-17-15	Vitrofiro	Negro	Vidrio volcánico	Micro clásica	Ceniza / 1-3	Alto	Muy alta (>30)	juvenil > cristales	Suelto (I)	No devitrificado
Base	Huaynacotas	732742 / 8326648 / 3784	PIG-17-15 bis	Ignimbrita	Blanco rosáceo	Ceniza	Clásica	Ceniza a lapilli / 25-30	Pobre	Media a alta (15-20)	juvenil > líticos > cristales	Suelto a endurecido (I-II)	Ligeramente devitrificado
Base	SJA	683460 / 8342837 / 4309	PIG-17-05	Ignimbrita	Blanco a gris rosáceo	Ceniza y vidrio	Clásica	Ceniza a lapilli / 20-25	Pobre	Baja (1-3)	juvenil > cristales	Ligeramente soldado (III)	Moderadamente devitrificado
CARAVELI													
Intermedio	Río Arma	732973 / 8283329 / 3825	PIG-10-54-A	Ignimbrita	Gris claro	Ceniza y vidrio	Micro clásica	Ceniza a lapilli / 20-25	Moderado	Media (5-10)	cristales > juvenil > líticos	Suelto a endurecido (I-II)	-
Base	Salamanca	734564 / 8286712 / 3721	GR30A-17-087	Ignimbrita	Beige blanquecino	Ceniza	Clásica	Ceniza a lapilli / 15-20	Pobre	Media (5-10)	juvenil > cristales > líticos	Suelto a endurecido (I-II)	-
HUARCAYA													
Base	San Javier de Alpabamba	680113 / 8336276 / 2761	PIG-17-M16	Ignimbrita	Blanco	Ceniza	Micro clásica	Ceniza / 0-5	Muy alto	Baja (1-3)	juvenil > cristales > líticos	Endurecido a ligeramente soldado (II-III)	Fuertemente devitrificado

Tabla 4. Continuación

Capa de Ignimbrita	Localidad	Coord. Este/ Norte/ Altitud	Código muestra	Litología	Color	Matriz composición	Textura	Tamaño clastos / %	Grado sorteamiento de granos	Vesicularidad (%)	Ranking componentes	Grado de soldadura	Características de devitrificación
CHUQUIBAMBA													
Tope	San Javier de Alpbamba (SJA)	682683 / 8342775 / 4143	PIG-17-06	Ignimbrita	Blanco grisáceo	Ceniza	Clástica	Ceniza a lapilli / 20-25	Moderado	Media (10-15)	juvenil > cristales > líticos	Ligera a moderadamente y soldado (III-IV)	Moderado a fuertemente devitrificado
Intermedio	SJA	682220 / 8342385 / 4088	GR30A-17-060	Ignimbrita	Blanco	Ceniza	Micro clástica	Ceniza / 3-5	Muy alto	Baja a media (2-6)	juvenil > cristales > líticos	Suelto a endurecido (I-II)	Moderadamente devitrificado
Intermedio	SJA	680932 / 8341996 / 3850	GR30A-17-061	Ignimbrita	Blanco	Ceniza y vidrio	Clástica	Ceniza a lapilli / 20-25	Moderado	Baja (1-3)	juvenil > cristales > líticos	Endurecido a ligeramente soldado (II-III)	Fuertemente devitrificado
Base	SJA	680095 / 8339627 / 3310	PIG-17-03	Ignimbrita	Blanco Amarillento	Ceniza	Clástica	Ceniza a lapilli / 10-15	Moderado	Baja a media (1-6)	juvenil > cristales > líticos	Ligera a moderadamente y soldado (III-IV)	Moderadamente devitrificado
Base	SJA	681623 / 8333894 / 2966	PIG-17-02	Ignimbrita	Gris rosáceo	Ceniza	Micro clástica	Ceniza a lapilli / 10-15	Moderado	Baja a media (1-5)	juvenil > cristales > líticos	Endurecido a ligeramente soldado (II-III)	Moderado a fuertemente devitrificado
ALPABAMBA													
Cerca tope	Cerca de Oyolo	693607 / 8318171 / 3165	PIG-17-10	Ignimbrita	Blanco verdoso	Ceniza	Clástica	Ceniza a lapilli / 30-40	Pobre	Muy alta (> 25)	juvenil > cristales > líticos	Endurecido (II)	No devitrificado
Base	Pampamarca	725354 / 8324234 / 3320	PIG-13-20	Ignimbrita	Gris rosáceo	Ceniza	Clástica	Ceniza a lapilli / 5-10	Pobre	Media (5-10)	juvenil > cristales > líticos	Endurecido (II)	No devitrificado
Base	Puica	746091 / 8332512 / 3590	PIG-13-21	Ignimbrita	Rosado	Ceniza y vidrio	Clástica	Ceniza a lapilli / 15-20	Pobre	Media (5-10)	juvenil > cristales > líticos	Suelto a endurecido (I-II)	Moderadamente devitrificado

Tabla 5. Texturas y Características del Componente Juvenil (pómez y vidrio) en Muestras de Ignimbritas

Capa de Ignimbrita	Localidad	Código muestra	Pómez				Vidrio					
			Textura	Deformación	Color	Tamaño (mm)	Porcentaje (%)	Forma	Deformación	Color	Tamaño (mm)	Porcentaje (%)
CAPILLA												
Tope	Camino de Charcana a Oyolo	PIG-17-01	No pómez	-	-	-	-	Masivo en la matriz	Moderadamente aplastado	Gris rosáceo	Masivo	60 - 80
LOMAS												
Tope	Huaynacotas	GR30A-17-081	Fibroso	No deformado	Blanco rojizo	3-20	15-20	Masivo en la matriz	no	Rosáceo	Masivo	1-5
SENCCA SUPERIOR												
Tope	Charcana	PIG-17-11	Masivo	No	Blanco	> 50	80 - 95	no	no	no	no	no
Intermedio	Huaynacotas	GR30A-17-083	Poroso	Ligeramente aplastado	Blanco amarillento	1 - 5	5 - 10	Masivo	no	Gris	Masivo	40 - 60
Base	Quillumsa	PIG-17-13	Fibroso y poroso	No deformado	Blanco	2 - 10	15-20	Masivo, shards	no	Rosáceo	Masivo, < 2	20 - 40
SENCCA INFERIOR												
Cerca tope	San Javier de Alfabamba (SJA)	PIG-17-04	Poroso, fibroso	Ligeramente aplastado	Blanco, verde	0,5 - 4	10 - 15	Masivo	no	Incoloro	Masivo	10 - 20
Cerca tope	Charcana	GR30A-17-074	Masivo	Ligeramente aplastado	Verde	2 - 20	10 - 15	Masivo	no	Incoloro	Masivo	10 - 20
Intermedio	Pampamarca	PIG-11-57-A	Poroso, fibroso	Ligeramente aplastado	Gris	1 - 5	1 - 5	Masivo en la matriz	no	Blanco a incoloro	Masivo	10 - 20
Intermedio	Pampamarca	PIG-11-57-B	Masivo y poroso	No deformado	Marrón y blanco	2-5	1-5	Masivo en la matriz	no	Amarillo	Masivo	10 - 20
Base	Quillumsa	PIG-17-14	Tubular y poroso	No deformado	Blanco, gris	2 - 8	10 - 15	Masivo, amorfo y forma de shards	Ligeramente aplastado	Obsidiana negro, incoloros	Masivo, < 1	30 - 50
Base	Huaynacotas	PIG-17-15	Poroso	Rotos	Blanco a gris	1 - 5	< 1	Amorfo, poroso	No deformado	Obsidiana es negro	Masivo	80 - 90
Base	Huaynacotas	PIG-17-15 bis	Fibroso y tubular	Ligeramente aplastado	Blanco rosáceo, gris	1 - 7	10 - 15	Masivo y en forma de shards	Ligeramente aplastado	Obsidiana es negro	Masivo, < 2	20 - 40
Base	SJA	PIG-17-05	Ligeramente poroso	Ligeramente deformado	Blanco	2 - 15	30 - 50	Masivo en la matriz	No deformado	Rosáceo	Masivo	10 - 20

Tabla 5. Continuación

Capa de Igmbrita	Localidad	Código muestra	Pómez			Vidrio						
			Textura	Deformación	Color	Tamaño (mm)	Porcentaje (%)	Forma	Deformación	Color	Tamaño (mm)	Porcentaje (%)
CARAVELI												
Intermedio	Río Arma	PIG-10-54A	Poroso fibroso	No deformado	Blanco	2 - 5	1 - 5	Masivo en la matriz	No	Gris claro	Masivo	5 - 15
Base	Salamanca	GR30A-17-087	Fibroso y masivo	Ligeramente aplastado	Blanco	1 - 5	10 - 15	Masivo en la matriz de ceniza	No	Beige	Masivo	5 - 10
HUARCAYA												
Base	San Javier de Alpabamba	PIG-17-M16	Masivo	No deformado	blanco	no	<1	Masivo en la matriz	No	Blanco	Masivo	40 - 60
CHUQUIBAMBA												
Tope	San Javier de Alpabamba (SJA)	PIG-17-06	Fibroso y poroso	Ligeramente aplastado	Blanco y amarillo verdoso	1 - 4	10 - 15	Masivo	No	Blanco	Masivo	30 - 50
Intermedio	SJA	GR30A-17-060	Fibroso y masivo	Ligeramente aplastado	Blanco	1 - 4	5 - 10	Masivo	No	Blanco	no	30 - 50
Intermedio	SJA	GR30A-17-061	Ligeramente poroso	Ligeramente aplastado	Blanco	1 - 5	60 - 70	Masivo	No	Blanco	Masivo	10 - 15
Base	SJA	PIG-17-03	Poroso y fibroso	Deformado, aplastado	Amarillo, blanco	1 - 6	10 - 15	Masivo en la matriz	No deformado	No	Masivo	30 - 50
Base	SJA	PIG-17-02	Masivo	Ligeramente aplastado	Blanco rosa, amarillo	< 8	1 - 5	Masivo	No deformado	Incoloro a rosáceo	Masivo	60 - 70
ALPABAMBA												
Cerca tope	Cerca de Oyolo	PIG-17-10	No pómez	no	no	no	0	Masivo en la matriz	Ligeramente deformado	Incoloro a verdoso	Masivo	40 - 60
Base	Puica	PIG-13-21	Fibroso, masivo	Ligeramente aplastados, rotos	Verde claro	2 - 8	15 - 20	Masivo en la matriz	No	Rosáceo	Masivo	20 - 30

Tabla 6. Texturas y Características de los Componentes Cristalinos y Líticos en Muestras de Igimbritas

Capa de Igimbrita	Localidad	Código muestra	Cristales			Líticos			Alteración por meteorización	
			Porcentaje de cristal (%)	Deformación	Forma	Tamaño (mm)	Porcentaje de líticos (%)	Deformación		Forma
CAPILLA										
Tope	Camino Charcana a Oyolo	PIG-17-01	pfg 5-10, Fds 1-5, bt 1-3, qz < 1, anf < 1, oxs < 0,5	Moderadamente rotos	Euhedrales y subhedrales	< 5	No observado	-	-	
LOMAS										
Tope	Huaynacotas	GR30A-17-081	Fds 1-5, obsidiana 1-5, qz < 1, otros < 1	Ligeramente rotos	subhedrales	< 2	Accesorios (lavas < 2), xenolito (areniscas < 2)	No deformado	Subredondeado	10-20
SENCCA SUPERIOR										
Tope	Charcana	PIG-17-11	pfg y bt < 1, ox < 0,5	No	euhedrales	< 1	No observado	-	-	
Base	Huaynacotas	GR30A-17-083	Pfg 10-15, Fds 1-5, bt 1-5, qz 1-3, anf < 1	Rotos	subhedrales y euhedrales	< 2	Accesorios (lava 1-2)	No deformado	Subredondeado	2-5
Tope	Quillumsa	PIG-17-13	pfg 5-10, Fds 1-3, bt 1-3, anf < 1, px < 1, qz < 1	Rotos	Euhedrales a subhedrales	< 2	Accesorios (lavas < 1)	No deformado	Subredondeado	2-5
SENCCA INFERIOR										
Cerca tope	San Javier de Alpabamba (SJA)	PIG-17-04	Fds 1-5, bt < 1, qz 1-3, anf < 0,5	Ligeramente rotos	subhedrales	< 2	Accesorios (lavas 1-3) accidentales (lavas oxidadas < 1), xenolito (areniscas < 1)	No deformado	Subredondeado	3-5
Cerca tope	Charcana	GR30A-17-074	Fds 1-8, bt 1-5, qz 1-3	Ligeramente rotos	subhedrales	< 2	Accesorios (lavas 1-5), xenolito (areniscas 1-3)	No deformado	Subredondeado	1-50
Intermedio	Pampamarca	PIG-11-57-A	pfg 1-5, Fs 1-5, bt 1-3, qz < 1	Ligeramente rotos	subhedrales	< 2	Accesorios (lava < 2)	No deformado	Subredondeado	3-10
Intermedio	Pampamarca	PIG-11-57-B	pfg 1-5, Fd 1-3, bt 1-3	Ligeramente rotos	subhedrales	< 2	No observado	-	-	-
Base	Quillumsa	PIG-17-14	pfg 1-3, Fds 1-3, bt < 0,5, qz < 0,5, anf < 0,5, obsid < 1	Rotos	subhedrales	< 2	Accesorios (lavas 5-10), accidentales (lavas oxidadas 1-3), xenolitos (areniscas < 2)	No deformado	Angular a subredondeado	5-10
Base	Huaynacotas	PIG-17-15	pfg 1-3, Fds < 1, bt < 0,5, px < 0,5	Rotos	subhedrales	1-3	No observado	-	-	-
Base	Huaynacotas	PIG-17-15 bis	pfg 1-5, Fds 1-5, bt < 1, qz < 1, px < 1, anf < 1	Rotos	subhedrales	< 2	Accesorios (lavas 1-5), accidentales (lavas oxidadas < 1), xenolitos (areniscas 1-3)	No deformado	Angular a subredondeado	5-10
Base	SJA	PIG-17-05	Fs 0-2, qz 1-3, bt < 1	Rotos	subhedrales	< 1	No observado	-	-	-

Tabla 6. Continuación

Capa de Ignimbrita	Localidad	Código muestra	Cristales			Lítics			Alteración por meteorización		
			Porcentaje de cristal (%)	Deformación	Forma	Tamaño (mm)	Porcentaje de líticos (%)	Deformación		Forma	Tamaño (mm)
CARAVELI											
Base	Río Arma	PIG-10-54-A	plg 5-10, Fd 1-3, qz 1-5, bt 1-3	Ligeramente rotos	subhedrales	2 - 5	Accesorios (lavas 1-3)	No deformado	Subredondeado	1 - 6	Oxidación de biotitas
Base	Salamanca	GR30A-17-087	Fds 1-5, qz < 2, bt < 1, otros < 2	Ligeramente rotos	subhedrales	< 2	Accesorios (lavas 1-3), xenolito (areniscas 1-5)	No deformado	Subredondeado	10 - 50	-
HUARCAYA											
Base	San Javier de Alpacamba	PIG-17-M16	qz 5-10, zeo 5-10, plg < 0.5, Fs < 1, ox < 1	Ligeramente rotos	subhedrales	< 2	Cognatos (lavas < 0.5)	No deformado	Se confunde con la matriz	1 - 6	Oxidación
CHUQUIBAMBA											
Tope	San Javier de Alpacamba (SJA)	PIG-17-06	Fds 1-5, plg 1-3, qz < 1, bt < 1	Rotos	subhedrales	< 2	Accesorios (lavas < 5), accidentales (lavas oxidadas < 2)	Deformado y ligeramente aplastado	Subredondeado a subangular	1 - 7	Oxidación de bt y lavas
Intermedio	SJA	GR30A-17-060	Fds 1-3, qz < 0.5, bt < 0.1, cb < 0.1, zeo < 0.5	Rotos	subhedrales	< 2	Accesorios (lava < 0.3)	No deformado	Subredondeado	< 2	-
Intermedio	SJA	GR30A-17-061	qz 1-5, oxs 1-5, Fds 1-3, bt < 1	Rotos	subhedrales	< 3	xenolito (areniscas 1-3)	No deformado	Subangular a subredondeado	1-8	-
Base	SJA	PIG-17-03	plg 1-5, Fds 1-3, qz 1-3, bt < 1, anf < 1	Rotos	subhedrales	< 2	Accesorios (lavas 1-5), accidentales (lavas oxidadas < 0.5), xenolitos (areniscas < 0.5)	No deformado	Subangular a angular	1 - 8	Alteración de pómez
Base	SJA	PIG-17-02	Plg 1-5, Fs 1-5, bt 1-3, qz 1-3, oxs < 1, zeo < 1	Fd y qz rotos, las bt ligeramente aplastadas	subhedrales	< 2	Accesorios (lavas < 0.5), accidentales (lavas oxidadas < 0.3)	No deformado	Subangular	1 - 2	-
ALPABAMBA											
Cerca tope	Cerca de Oyolo	PIG-17-10	Fds 5-10, plg 5-10, qz 1-3, bt 1-3, cb 1-3	fd, plg y qz son rotos, bt ligeramente aplastado	subhedrales a anhedrales	< 2	Accesorios (lavas 1-3)	No deformado	Subangular	2 - 15	-
Base	Puica	PIG-13-21	Fds 1-5, plg 1-5, bt < 1, qz < 0.5, ox < 0.5	Moderadamente rotos	subhedrales	< 2	Accesorios (lavas 1-3)	No deformado	Subredondeado	3 - 10	-

5.2 GEOCRONOLOGÍA U-Pb

5.2.1. Nuevas edades U-Pb

Se ha realizado dataciones con el método U-Pb en cristales de circón de muestras de ignimbritas. Con el fin de obtener la edad de los cristales de circón, se ha utilizado la técnica basada en Espectrometría de Masas de Plasma Acoplado Inductivamente por Ablación Láser (LA-ICP-MS) y los resultados se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. *Edades U-Pb de Ignimbritas en la Región OCM*

Capa de Ignimbrita	Código Muestra	Este	Norte	Altitud	Localidad	Litología	Material	Edad (Ma)	
Sencca superior									
1	Base	PIG-17-13	726714	8312532	3893	Cerro Quimsa Orco	ignimbrita	circón	1.626 ± 0.035
Sencca inferior									
2	Tope	PIG-17-14	726597	8315138	3151	Arriba del pueblo de Quillumsa	ignimbrita	circón	3.67 ± 0.040
3	Base	PIG-17-15	732742	8326648	3784	Arriba del pueblo de Huaynacotas	ignimbrita	circón	5.03 ± 0.08
4	Base	PIG-11-57-A,B	725156	8327129	3855	Arriba del pueblo de Pampamarca	ignimbrita	circón	5.10 ± 0.08
Caraveli									
5	Base	PIG-11-41	732543	8282416	3920	Lado izquierdo del Río Arma	ignimbrita	circón	9.39 ± 0.08
6	Base	PIG-10-54-A	732973	8283329	3825	Lado derecho del Río Arma	ignimbrita	circón	9.55 ± 0.07
Huarcaya									
7	Base	PIG-17-M16	680113	8336276	2761	N del pueblo de SJA	ignimbrita	circón	12.66 ± 0.08
Chuquibamba									
8	Tope	PIG-17-06	682683	8342775	4143	NE de SJA	ignimbrita	circón	13.46 ± 0.12
9	Medio	PIG-17-03	680095	8339627	3310	NE de SJA	ignimbrita	circón	13.15 ± 0.11
10	Base	PIG-17-02	681623	8333894	2966	NE de SJA	ignimbrita	circón	14.57 ± 0.08
Alpabamba									



11	Cerca al tope	PIG-17-10	693607	8318171	3165	SE del pueblo de Oyolo	ignimbrita	circón	19.07 ± 0.14
----	---------------	-----------	--------	---------	------	------------------------	------------	--------	--------------

5.2.2. Diagramas Tera – Wasserburg (T-W) de ignimbritas en la región OCM

Se han generado diagramas Tera-Wasserburg para once muestras de ignimbritas obteniéndose edades entre 19.07 Ma y 1.26 Ma.

Las **Ignimbritas Alpabamba**, poseen las edades más antiguas del norte de la región OCM. Éstas ignimbritas afloran en el SE del pueblo de Oyolo, dónde se ha datado la muestra PIG-17-10, que muestra una población de circones con intersección en 19.07 ± 0.14 Ma. Así también se observa un circón heredado más viejo, con edad aproximada de 24 Ma (figura 53a). La edad obtenida, se puede comparar con otras edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y U/Pb reportadas para las Ignimbritas Alpabamba en otras localidades. Por ejemplo, en el norte del río Huarcaya y en otras dos localidades fuera de la región OCM, Thouret *et al.* (2007, 2016) reportaron edades de 20.13 ± 0.17, 18.23 ± 0.17 y 18.90 ± 0.50 Ma. Así mismo, en la región de Orcopampa, Swanson *et al.* (2004) reportaron edades de 19.7 y 19.47 ± 0.025 Ma para las “Tobas Manto” y “Tobas Quebrada Achaco” respectivamente.

Para las **Ignimbritas Chuquibamba**, se ha datado tres muestras ubicadas en el lado izquierdo del cañón del Río Huanca Huanca y se ha obtenido edades entre 13 y 14 Ma. Para la unidad basal de las Ignimbritas Chuquibamba, se ha datado la muestra PIG-17-02, la cual arrojó una edad de 14.57 ± 0.08 Ma indicando el inicio del emplazamiento de éstas ignimbritas (figura 53d). Para la unidad intermedia, la muestra PIG-17-03 arrojó una edad de 13.15 ± 0.11 Ma (figura 53c), observándose la presencia de circones heredados con edad aproximada de 26 Ma. Para la unidad superior se ha datado la muestra PIG-17-06, y se ha observado dos poblaciones de circones: 1) la primera población de cristales de circón arrojó una edad de 14.36 ± 0.15 Ma, indicando una primera cristalización; mientras que 2) la segunda población de cristales de circón dio una edad

de 13.46 ± 0.12 Ma (figura 53b), además se observa que hay presencia de cristales de circón heredados que poseen edades entre 25 y 22 Ma.

Las edades obtenidas de las ignimbritas ubicadas en el lado este del cañón del Río Huanca Huanca, se comparan con las edades reportadas en otros trabajos como los realizados por Thouret *et al.* (2016), Noble *et al.* (1974) y Cuellar (2019). Cerca del pueblo de Chuquibamba, en el acantilado de Cuno Cuno, Thouret *et al.* (2016) nombraron como “Ignimbritas Chuquibamba”, a aquellas ignimbritas con edades entre 14.25 ± 0.08 Ma y 13.19 ± 0.07 Ma. Así mismo en este trabajo se ha decidido adoptar la denominación acuñada por Thouret *et al.* (2016). Otros autores como: Noble *et al.* (1974), reportaron una edad de 13.8 ± 0.3 Ma, arriba del pueblo de Chuquibamba; y Cuellar (2019) reportaron edades de 13.20, 13.22 y 13.18 Ma para las “Ignimbritas Riolíticas Huallhua”, que se ubican en la mina Inmaculada a 14 Km al NEE del pueblo de SJA.

Para las **Ignimbritas Huarcaya**, se ha datado la muestra PIG-17-M16, que se ubica en el norte del Río Huanca Huanca. Los resultados arrojaron una edad de 12.66 ± 0.08 Ma, además se observaron cristales de circón heredados con edad aproximada de 14 Ma (figura 53e). El término de “Huarcaya”, también fue acuñado por Thouret *et al.* (2016), quienes reportaron una edad de 10.78 ± 0.13 Ma, para unas ignimbritas confinadas en el paleo-valle cortado en las Ignimbritas Alpabamba, en el norte del Río Huarcaya.

Las **Ignimbritas Caraveli**, fueron descritas en el lado este del Río Arma. Se ha datado la muestra PIG-11-41 obteniéndose una edad de 9.39 ± 0.08 Ma, además se ha observado la presencia de un circón heredado con edad aproximada entre 10 y 11 Ma (figura 53f). Así mismo se ha datado la muestra PIG-10-54A, que arrojó una edad de 9.55 ± 0.07 Ma, ésta muestra también presenta un circón heredado con una edad entre 12 y 11 Ma (figura 53g). El término Ignimbritas Caraveli fue acuñado por Thouret *et al.* (2007,



2016), quienes describieron unas ignimbritas con edades entre 9.4 ± 0.83 y 8.97 ± 0.06 Ma, en el lado oeste del río Ocoña y cerca al pueblo de Caravelí.

Para las **Ignimbritas Sencca inferior**, se ha datado cuatro muestras de ignimbritas. Las primeras muestras PIG-11-57A y 57B, arrojaron una edad promedio de 5.10 ± 0.08 Ma (figura 53k), éstas muestras fueron recolectadas en el acantilado que se encuentra al NO y arriba del pueblo de Pampamarca. Una tercera muestra la PIG-17-15, que se ha recolectado al NO y arriba del pueblo de Huaynacotas, ha dado una edad de 5.03 ± 0.08 Ma (figura 53i), además se ha observado circones heredados con edades aproximadas de 11 Ma, 18-20 Ma y 26 Ma (figura 53j). La cuarta muestra es PIG-17-14, la cual dio una edad de 3.67 ± 0.04 Ma (figura 53h), ésta muestra ha sido recolectada en el camino de Cotahuasi hacia el Río Arma.

Para las **Ignimbritas Sencca superior**, se ha datado la muestra PIG-17-13, que ha sido recolectado en el Cerro Quimsa Orco a 4 Km al NEE del pueblo Toro. Los resultados de datación dieron una edad de 1.626 ± 0.035 Ma (figura 53l), ésta es la edad más joven obtenida en este proyecto de investigación.

Los resultados que se han obtenido para las Ignimbritas Sencca inferior y Sencca superior, son comparados con los rangos de edad reportados por Thouret *et al.* (2007, 2016), quienes obtuvieron edades entre 5.13 ± 0.01 y 2.82 ± 0.04 Ma para las Ignimbritas Sencca inferior y edades entre 2.20 ± 0.15 y 1.80 ± 0.04 Ma para las Ignimbritas Sencca superior. Así mismo en la región Orcopampa, Swanson *et al.* (2004) reportaron edades de 4.4 ± 0.1 y 4.3 ± 0.16 Ma para la “Toba inferior riolítica”, también reportaron otra edad de 2.7 ± 0.1 Ma para la “Toba de ceniza superior”. Existen otras edades reportadas por Paquereau *et al.* (2005, 2006 2008) en la región de Arequipa, las cuales son $4.86 \pm$



0.07 Ma, 1.65 ± 0.04 Ma y 1.03 ± 0.09 Ma para las “Ignimbritas La Joya”, “Ignimbrita Aeropuerto Arequipa” y “Tobas Yura” respectivamente.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la actividad volcánica explosiva en el norte de la región OCM, inició hace al menos 26 Ma, demostrado por la presencia de cristales de circón heredados en las Ignimbritas Alpabamba y Chuquibamba (figuras 53a, 53b y 53c). Los intervalos de edad de cada capa de Ignimbrita y depósito de CDP que se ha adoptado en este trabajo, corresponde a los rangos de edad atribuido por Thouret *et al.* (2016).

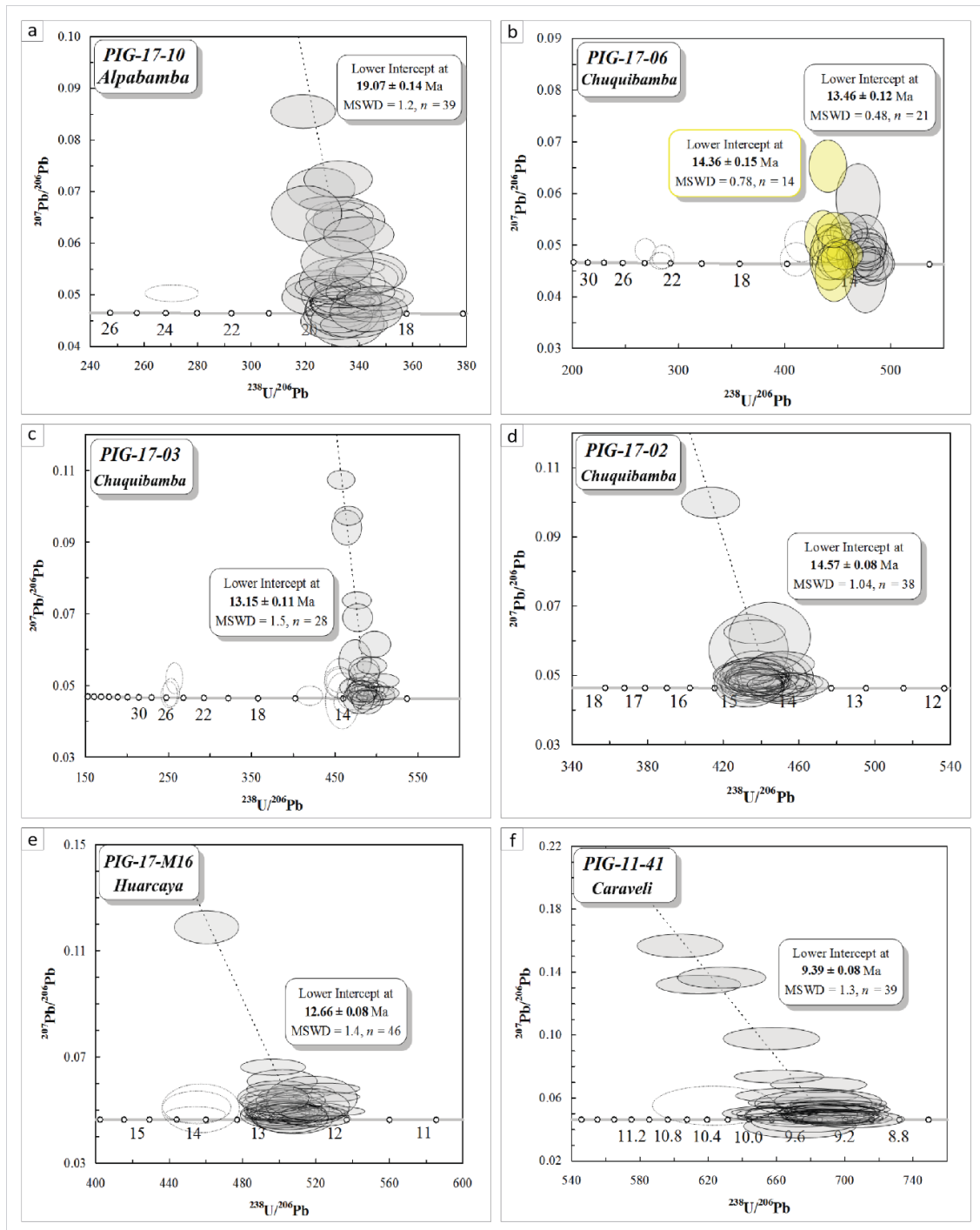


Figura 53. Diagramas Tera-Wasserburg de Muestras de Ignimbritas.

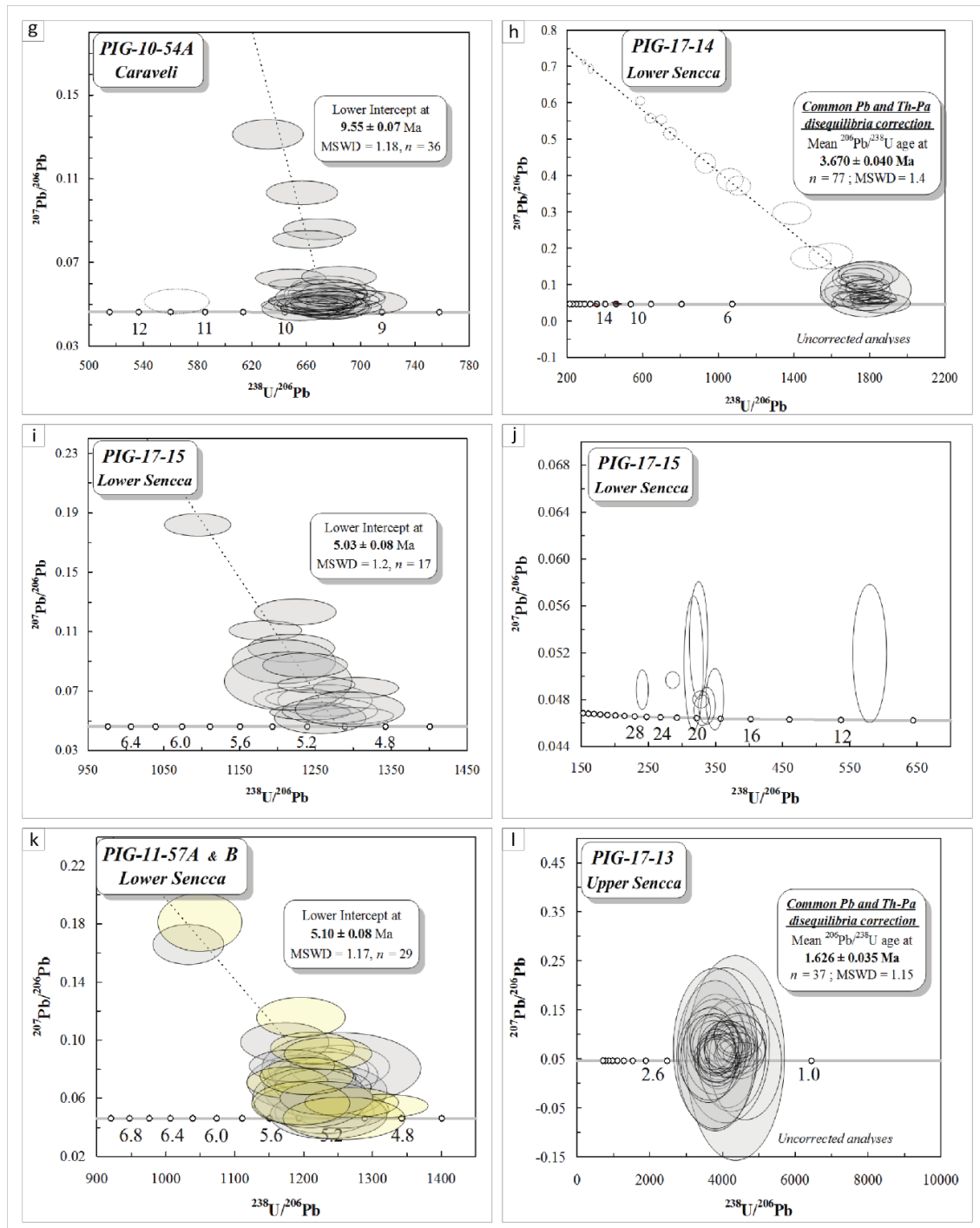


Figura 53. Continuación.

5.3. GEOQUÍMICA

Se ha procesado la data de 45 muestras de ignimbritas en el norte de la región OCM, de las cuales 40 muestras fueron recolectadas por Jean-Claude Thouret entre los años 2000 a 2010 y cinco muestras fueron recolectadas como parte de este trabajo de investigación en el año 2017 (anexo D). Los análisis de elementos mayores (i.e. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , MnO y P_2O_5) se han realizado en el Laboratorio de Magmas y Volcanes de la Universidad Clermont Auvergne - Francia.

5.3.1. Elementos mayores

5.3.1.1. Diagramas de álcalis totales vs SiO_2 (TAS) y K_2O vs SiO_2

Los resultados de los análisis químicos, han sido graficados en el diagrama TAS (después de Le Bas *et al.*, 1986) y en el diagrama K_2O vs SiO_2 (después de Peccerillo y Taylor, 1976) el cual es usado para la división de las rocas sub-alcálicas (figura 54 y 55).

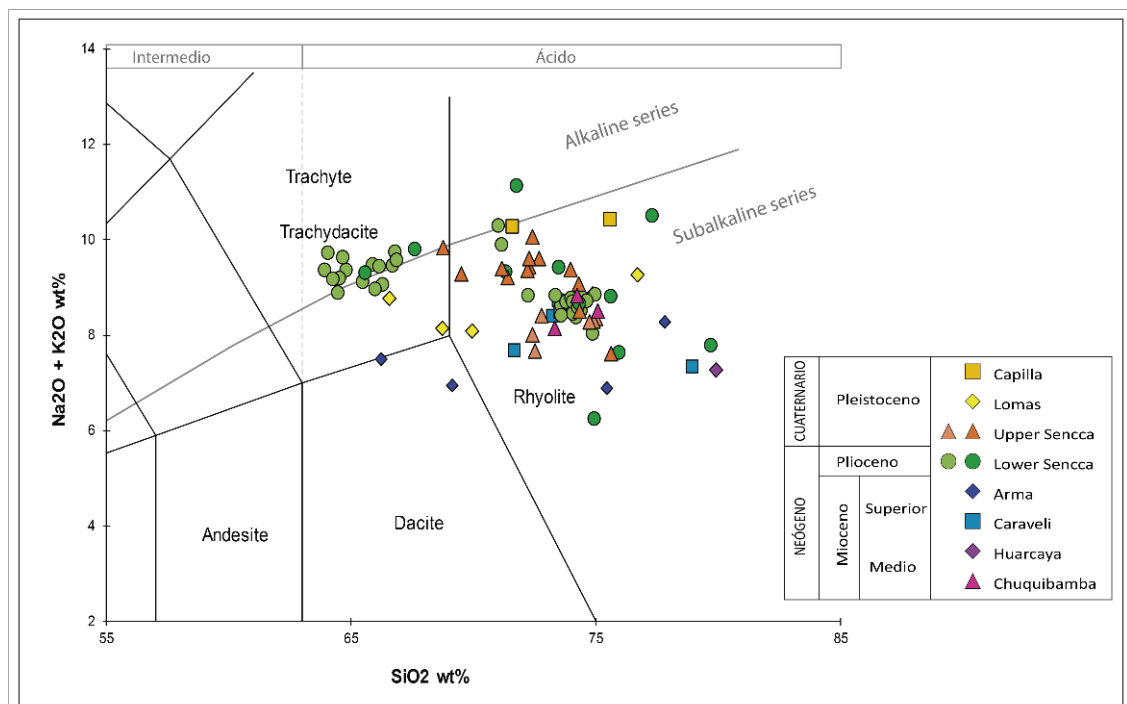


Figura 54. Diagrama TAS para Clasificación de Rocas Volcánicas. Diagrama TAS (después de Le Bas *et al.*, 1986). La división entre las series alcalinas y sub-alcálicas, está basada

en varios trabajos de investigación (MacDonald and Katsura, 1964; MacDonald, 1968; Irvine and Baragar, 1971 y Rickwood, 1989).

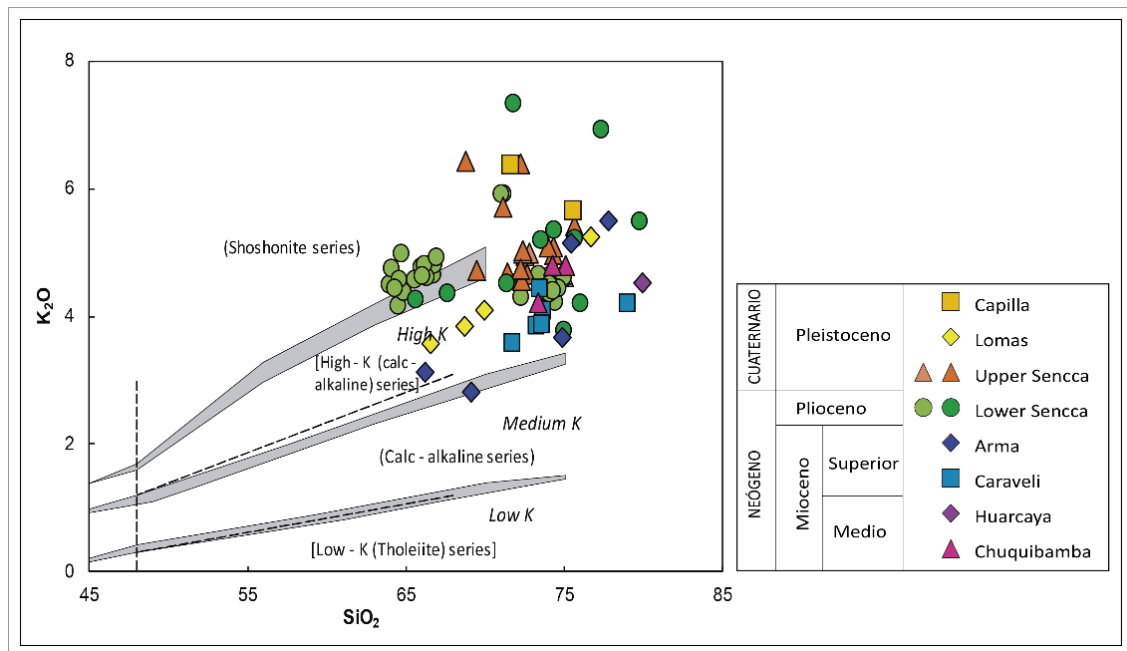


Figura 55. Diagrama K_2O vs SiO_2 para Clasificación de Rocas Sub-alcálinas. Diagrama K_2O vs SiO_2 (después de Peccerillo y Taylor, 1976). La Nomenclatura en cursiva y el límite con líneas discontinuas, está basado en Le Maitre et al. (1989). La nomenclatura en paréntesis está basado en Rickwood (1989).

De acuerdo a la clasificación de rocas volcánicas de Le Bas *et al.* (1986), las ignimbritas y depósitos de CDP del norte de la región OCM, muestran composiciones evolucionadas, con concentraciones de $SiO_2 > 63\%$ y concentraciones de álcalis totales ($Na_2O + K_2O$) entre 6 – 11 % (figura 54). Las muestras de ignimbritas analizadas en el norte de la región OCM, poseen principalmente una composición riolítica. Sin embargo, algunas capas de ignimbritas como las Ignimbritas Lomas y Sencca inferior, muestran variaciones entre traquidacitas a riolitas. Así mismo, los depósitos de CDP Arma muestran variaciones de dacitas a riolitas.

Basado en la clasificación de rocas sub-alcálinas de Peccerillo y Taylor (1976), las capas de ignimbritas y los depósitos de CDP en el norte de la región OCM, pertenecen a la serie alto-K (calco-alcálico) (figura 55). Los resultados obtenidos en este trabajo,

corroboran lo mencionado en muchos estudios, que indican que el vulcanismo en la Zona Volcánica Central (ZVC) es generalmente de características de alto-K (Thorpe *et al.*, 1979; Wilson M., 1989; De Silva, 1989; Francis *et al.*, 1989, De Silva *et al.*, 1994, Caffè *et al.*, 2008, Mamani *et al.*, 2010).

5.3.1.2. Diagramas Harker

Los diagramas de variaciones binarias de óxidos, muestran el contenido de SiO₂ en el eje “x” frente a los óxidos de los elementos principales a lo largo del eje “y” (figura 56). Se ha observado que las ignimbritas en el norte de la región OCM, muestran composiciones evolucionadas con contenido de SiO₂ entre 60 – 85 %, como se muestra en la figura 54.

Los diagramas en la figura 56, exhiben una tendencia negativa de Al₂O₃, CaO y Na₂O, estas variaciones corresponden a procesos controlados por la cristalización de plagioclasas, apuntando a una cristalización fraccionada. Así mismo, las tendencias negativas de los óxidos de Fe₂O₃, MgO y TiO₂, corresponden a la cristalización fraccionada de minerales ferromagnesianos como los piroxenos (e. g. clino y ortopiroxenos). El Mg y el Fe también están presentes en la estructura de las biotitas. Por otro lado, la disminución de Ti, puede deberse a la asimilación en óxidos como la magnetita (variedad titanomagnetita), estos minerales y otros óxidos se han observado en secciones delgadas de rocas, y han sido clasificados como óxidos en general.

La tendencia positiva del K₂O, indica que inicialmente era un elemento incompatible y que luego, cuando el magma estuvo altamente diferenciado, las concentraciones de K₂O pasaron a ser directamente proporcionales con el aumento de sílice, formando minerales principalmente feldespatos (p. ej. sanidinas). El K, también puede residir en la estructura de las micas como las biotitas.

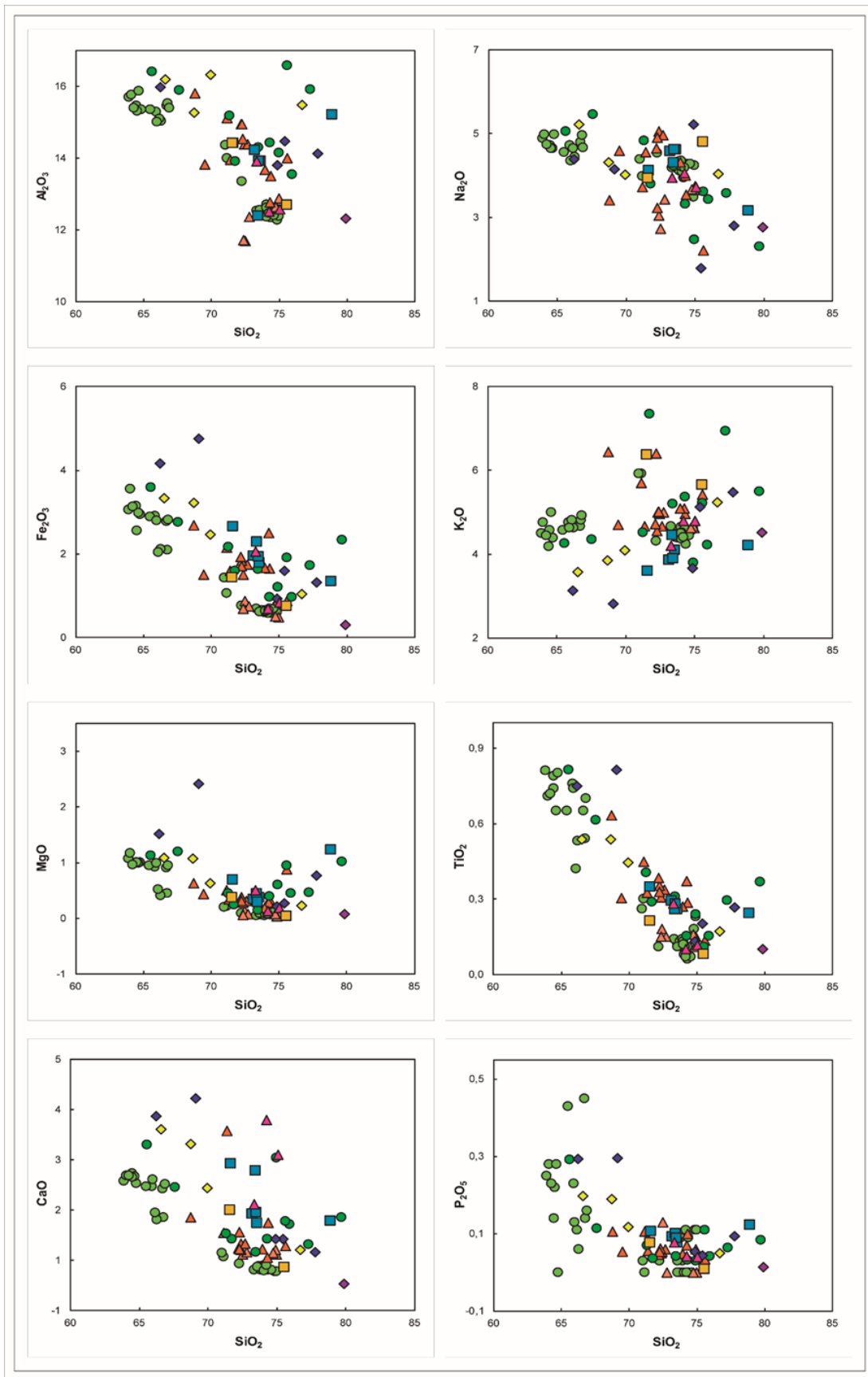


Figura 56. Diagramas de Variación Harker para Ignimbritas y depósitos de CDP en el Norte de la Región OCM.

5.3.2. Química mineral

En esta etapa del trabajo, se han analizado cristales de tres capas de ignimbritas como: Ignimbritas Chuquibamba, Ignimbritas Sencca inferior e Ignimbritas Sencca superior, con el método de análisis de microsonda electrónica (EPMA). Luego se ha realizado el cálculo preliminar de las fórmulas estructurales para cristales (i. e. feldespatos, biotitas, anfíboles y piroxenos). Los resultados de los cálculos de los cristales de feldespatos y piroxenos fueron ploteados en diagramas ternarios, como: 1) el diagrama de anortita – albita – ortoclasa (An – Ab – Or), para feldespatos; y 2) el diagrama de wollastonita – enstanita – ferrosilita (Wo – En – Fe), para piroxenos (figura 57). Para los resultados de los cristales de biotitas, se ha elaborado el diagrama ASFE (Annite-Siderofilita-Flogopita-Eastonita) utilizado por varios autores en la clasificación de biotitas como Karimpour *et al.* (2011) y Sirqueira *et al.* (2018), además se ha asignado la nomenclatura descrita por Deer *et al.* (1992) (figura 58). Así mismo, se ha clasificado a los cristales de anfíboles dentro del grupo cálcico, y la nomenclatura fue asignada de acuerdo a Leake (1978), Leake *et al.* (1997) y Hawthorne *et al.* (2012) (figura 57 y 59).

5.3.2.1. Feldespatos

Para las Ignimbritas Chuquibamba se ha analizado las muestras PIG-17-02, PIG-17-03 y PIG-17-06. Los cuales muestran dos grupos de plagioclasas y un grupo de feldespato alcalino (figura 57). El grupo de las plagioclasas, está representado por la andesina y la oligoclasa, se observa una disminución en los valores de anortita ($An_{12 \rightarrow 41}$), aumento en valores de albita ($Ab_{56 \rightarrow 80}$) y valores bajos de ortoclasa ($Or_{2 \rightarrow 7}$). La sanidina, representa al grupo de los feldespatos alcalinos, con valores altos de ortoclasa ($Or_{94 \rightarrow 96}$).

Para las Ignimbritas Sencca inferior, se ha analizado cristales de las muestras PIG-17-14, PIG-17-15 y PIG-17-15-bis y además se ha identificado dos grupos de plagioclasas



y dos grupos de feldespatos alcalinos (figura 57). Las plagioclasas, consisten en labradorita y oligoclasa, además se observa un decrecimiento progresivo en anortita ($An_{71 \rightarrow 13}$), aumento progresivo de albita ($Ab_{27 \rightarrow 79}$) y ortoclasa ($Or_{1 \rightarrow 7}$). El grupo de los feldespatos alcalinos, consiste en anortoclasa y sanidina, con incremento de los valores de ortoclasa ($Or_{19 \rightarrow 50}$), albita ($Ab_{45 \rightarrow 65}$), y anortita ($An_{3 \rightarrow 18}$).

Para las Ignimbritas Sencca superior, se ha analizado los cristales de la muestra FIG-17-13. Las plagioclasas son principalmente andesina, que presenta valores de anortita ($An_{30 \rightarrow 40}$) y albita ($Ab_{58 \rightarrow 62}$) (figura 57).

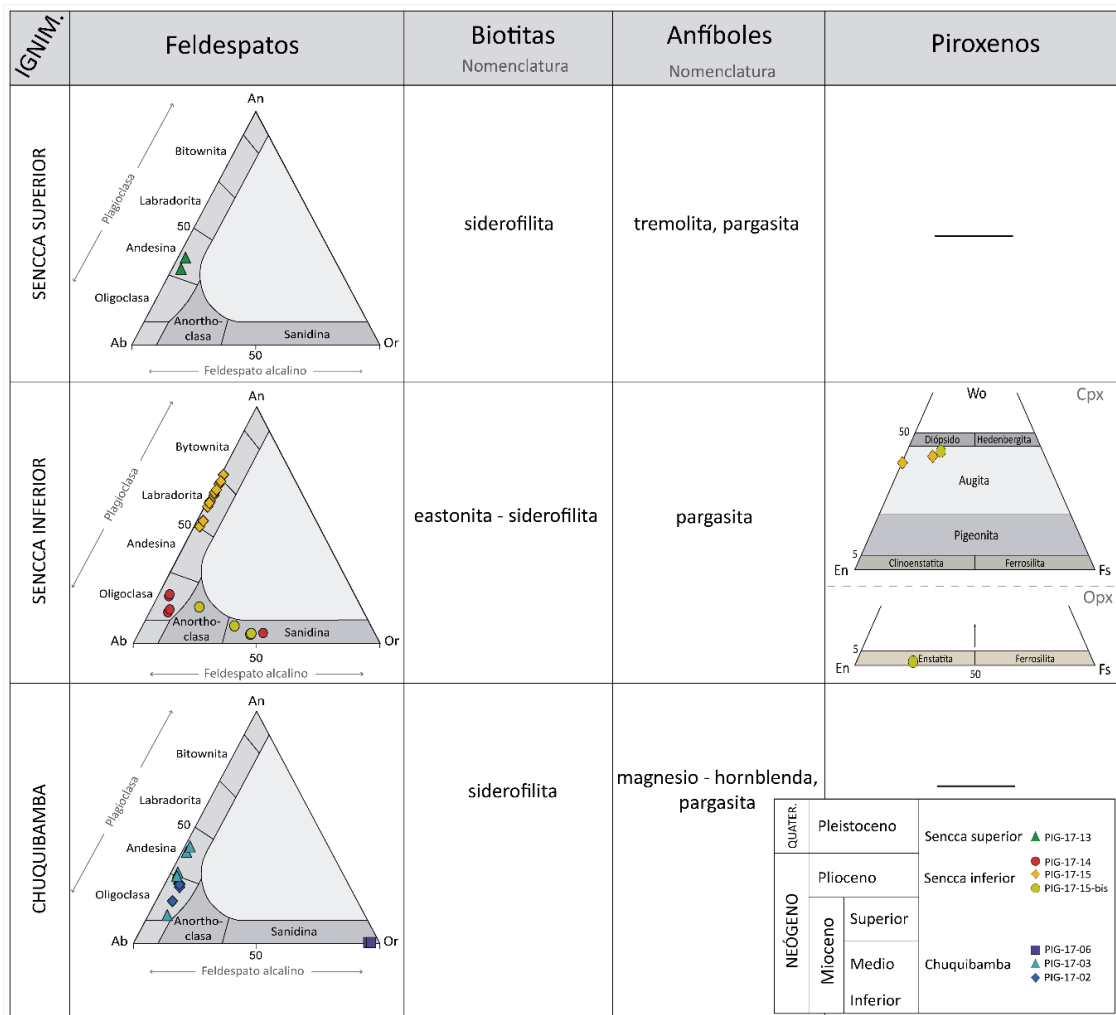


Figura 57. Clasificación y Nomenclatura de Cristales de Tres Ignimbritas en el Norte de la Región OCM.

5.3.2.2. Biotitas

Se han analizado cristales de biotita en secciones delgadas de muestras de tres ignimbritas; las Ignimbritas Chuquibamba, Sencca inferior y Sencca superior. Así también, para la clasificación de las biotitas, se ha usado el diagrama ASFE (Annite-Siderofilita-Flogopita-Eastonita) con la nomenclatura basada en Deer *et al.* (1992) (figura 58).

Los cristales de biotitas de las Ignimbritas Chuquibamba consisten principalmente de siderofilitas. Dos muestras de las Ignimbritas Chuquibamba presentan una proporción de $Fe/(Fe+Mg)$ entre 0.32 - 0.43 y Al^{iv} entre 2.04 - 2.45. Sin embargo los

crisales de biotita analizados en la muestra PIG-17-06, presentan valores altos de $Fe/(Fe+Mg)$ entre 0.59 - 0.6 y Al^{IV} entre 3.33 - 3.35, esto puede ser debido a que las biotitas de ésta muestra se encuentran deformadas y cloritizándose.

Las Ignimbritas Sencca inferior contienen $Fe/(Fe+Mg)$ entre 0.29 - 0.39 y Al^{IV} entre 2.08 - 2.53, por lo cual las biotitas de las Ignimbritas Sencca inferior consisten de siderofilas principalmente. Las biotitas de las Ignimbritas Sencca superior, consisten también de siderofilas con proporciones de $Fe/(Fe+Mg)$ entre 0.36 - 0.41 y Al^{IV} entre 2.02 - 2.21.

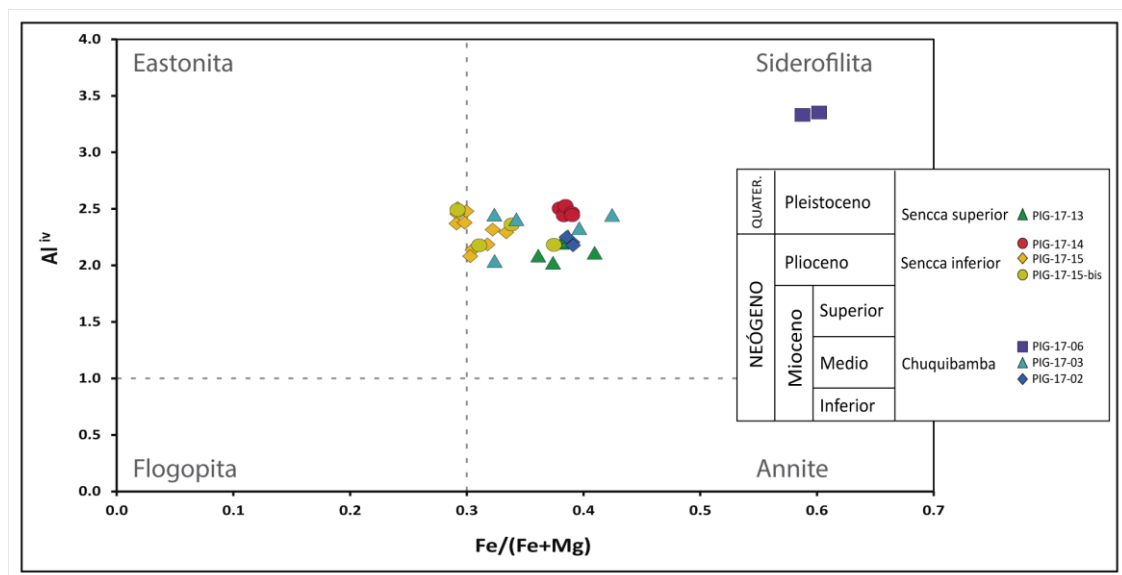


Figura 58. Composición de los Cristales de Biotitas de Tres Ignimbritas en el Norte de la Región OCM.

5.3.2.3. Anfíboles

Los cristales de anfíboles de las Ignimbritas Chuquibamba, Sencca inferior y Sencca superior no son tan abundantes como los cristales de feldespatos y biotitas. Luego de los cálculos de fórmulas estructurales de los anfíboles, se los ha clasificado dentro del grupo de anfíboles cálcicos. En la figura 59, se muestra las seis composiciones raíz de los

anfíboles cálcicos con la nomenclatura basada en Leake (1978), Leake *et al.* (1997) y Hawthorne *et al.* (2012).

Los cristales de anfíboles de las Ignimbritas Chuquibamba consisten principalmente de magnesio-horblenda y pargasita. Los anfíboles de las Ignimbritas Sencca inferior, son principalmente pargasita. Así mismo, los cristales de anfíboles de las Ignimbritas Sencca superior, consisten de pargasita y tremolita.

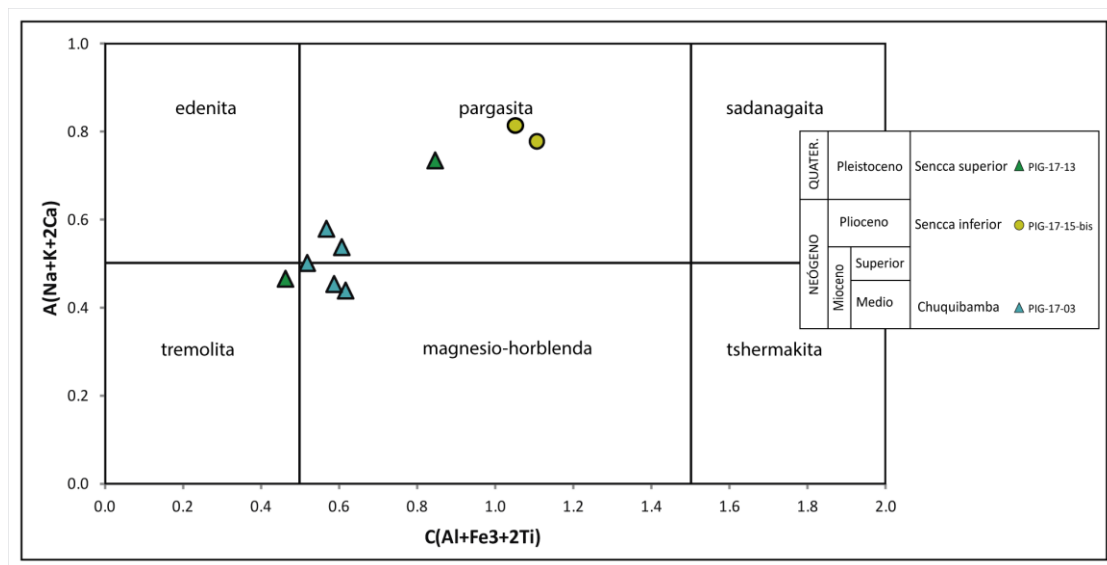


Figura 59. Nomenclatura de Anfíboles de Tres Ignimbritas en el Norte de la Región OCM.

5.3.2.4. Piroxenos

El contenido de cristales de piroxenos es mucho menor que el contenido de cristales de anfíboles, feldespatos o biotitas. En este trabajo se ha identificado unos pocos cristales de piroxenos en las muestras de las Ignimbritas Sencca inferior. Los piroxenos identificados, pertenecen principalmente al grupo de los clinopiroxenos, tienen porcentajes de wollastonita entre 39 – 45 % ($W_{0.39-0.45}$) y son clasificados como augitas. Sin embargo un cristal de piroxeno pertenece al grupo de los ortopiroxenos y es clasificado como enstatita ($W_{0.5}$) (figura 57).

5.4. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIONES

Los resultados previos acerca del estudio de análisis de litofacies, geocronología y geoquímica, permiten comprender mejor la evolución temporal y espacial de las ignimbritas y depósitos de CDP en el norte de la región de los cañones de Ocoña-Cotahuasi-Marán (OCM). Estos resultados, asociados con otros datos de estudios pre-existentes como los realizados por Noble *et al.* (1974), Tosdal *et al.* (1981), Swanson *et al.* (2004), Paquereau *et al.* (2006), Thouret *et al.* (2007), De la Rupelle (2013), Brandmeier *et al.* (2014), Thouret *et al.* (2016, 2017) y Cuellar (2019), contribuyen al conocimiento que se tiene sobre la estratigrafía volcánica de las ignimbritas y depósitos de CDP del Mioceno y Cuaternario en el norte de la región OCM y en el sur del Perú. De manera general, en la región OCM se ha observado que los depósitos generados del vulcanismo explosivo Neógeno y Cuaternario, cubren rocas del basamento sedimentario Cretácico y rocas del Grupo Tacaza del Oligoceno, así también son cubiertos por conos compuestos del Cuaternario (figura 60).



Figura 60. Secuencia Estratigráfica Generalizada del Cañón de Cotahuasi, Vista al NW.



5.4.1. Correlación de ignimbritas y depósitos de CDP en la región de los cañones de OCM y en el sur del Perú

A partir de los análisis de las litofacies y la correlación de las edades U/Pb, se ha identificado y descrito siete capas de ignimbritas y dos depósitos de CDP que son: Ignimbritas Alfabamba (19.07 ± 0.14 Ma), Ignimbritas Chuquibamba (13.15 ± 0.11 Ma, 13.46 ± 0.12 Ma y 14.57 ± 0.08 Ma), Ignimbritas Huarcaya (12.66 ± 0.08 Ma), Ignimbritas Caraveli (9.39 ± 0.08 Ma, 9.55 ± 0.07 Ma), CDP Arma (rango de edad entre 7.97 - 7.99 Ma reportado por Thouret *et al.*, 2016), Ignimbritas Sencca inferior (3.67 ± 0.04 Ma, 5.03 ± 0.08 Ma y 5.1 ± 0.08 Ma), Ignimbritas Sencca superior (1.626 ± 0.035 Ma), Ignimbritas Lomas (rango de edad entre 1.54 - 1.26 Ma reportado por Thouret *et al.*, 2016) y CDP Capilla (con edad 0.91 Ma reportado por Thouret *et al.*, 2016).

En este trabajo se ha decidido adoptar la nomenclatura estratigráfica y los rangos de edad propuestos por Thouret *et al.* (2016), quienes propusieron una estratigrafía volcánica refinada en el sur de la región OCM. Por otro lado, la nomenclatura adoptada en este trabajo difiere de la denominación por Arcos volcánicos propuesto por Mamani *et al.* (2010), que encierra a aquellas rocas volcánicas con rango de edad ente 24 - 10 Ma dentro del Arco Huaylillas, dentro del Arco Barroso inferior (10 - 3 Ma) o dentro del Arco Barroso superior (3 - 1 Ma). Ya que como se ha observado en este trabajo, en el norte de la región OCM existen variedad de capas de ignimbritas y depósitos de CDP, con edades y características que pueden ser correlacionados temporal y espacialmente a lo largo del sur del Perú.

De acuerdo a los resultados obtenidos de los análisis de litofacies y las edades U/Pb obtenidas, en el norte de la región OCM, las unidades volcánicas descritas y mapeadas por muchos autores como una sola “Formación Alfabamba” (Pecho Gutierrez



,1983; Olchanski y Dávila, 1994; Martínez y Cervantes, 2001; Muñoz *et al.*, 2014), en realidad consisten de una variedad de capas de ignimbritas y depósitos de CDP, que poseen edades desde el Mioceno como 19 Ma (Ignimbritas Alpacabamba) hasta edades jóvenes del Pleistoceno como 1.6 Ma (Ignimbritas Sencca superior) (ítem 4.1, anexos A.1 y A.2). Es el caso de las ignimbritas que afloran en el lado este del cañón del río Huanca Huanca y aguas arriba del pueblo de San Javier de Alpacabamba (SJA), en donde Guevara y Dávila (1983) describieron cerca de 1000 m de espesor de tobas dacíticas a riódacíticas de color blanco amarillento, a las cuales denominaron como “Formación Alpacabamba”. Sin embargo, en este trabajo de investigación, se ha datado las capas de ignimbritas de la sección de SJA (figura 28), obteniéndose edades U/Pb de 14.57 Ma, 13.15 Ma y 13.46 Ma (tabla 7), éstas edades corresponden al rango de edad asignado para las ignimbritas Chuquibamba. Además en la sección de SJA (figura 28), no solamente se ha identificado las Ignimbritas Chuquibamba, sino que también se ha logrado identificar las Ignimbritas Sencca inferior, las Ignimbritas Huarcaya, los depósitos de CDP Capilla y depósitos de flujos de lavas del Barroso.

En la Sección de SJA, las Ignimbritas Chuquibamba que afloran en la sección de SJA (figura 28), consisten de 3 unidades de flujo, la unidad basal que consiste de flujos de tobas ricas en cristales de color gris rosáceo y soldadura II a III. La unidad intermedia, que se compone de flujos de tobas de pómez y ceniza de color blanco a ligeramente amarillo y gris, con grado de soldadura III-IV. Y finalmente la unidad superior que son flujos de tobas ricas en pómez y ceniza de color blanco y soldadura entre II-III. Asimismo, en la sección de SJA, se ha identificado a las Ignimbritas Sencca inferior, que consisten de flujos de tobas ricas en pómez y ceniza, de color blanquecinos a ligeramente rosados y con grado de soldadura entre II-III, que sobreyacen a las Ignimbritas Chuquibamba.



La similitud de las litofacies entre las Ignimbritas Chuquibamba y Sencca inferior, expuesto en los párrafos anteriores, hace creer que se tratara de una sola capa de ignimbrita. Ésta podría ser la razón por la que Guevara y Dávila (1983) consideraron una sola unidad de aproximadamente 1000 m de espesor y a la que denominaron como “Formación Alfabamba”. Cabe recalcar que el estudio de litofacies en conjunto con las edades obtenidas en este trabajo, ha ayudado a definir las capas de Ignimbritas y depósitos de CDP, presentes tanto en la sección de SJA como en las otras secciones estudiadas en este trabajo de investigación.

5.4.2. Recurrencia de erupciones de ignimbritas y depósitos de CDP

En este trabajo de investigación se compara las edades U/Pb obtenidas, con los rangos de edad atribuidos por Thouret *et al.* (2007, 2016) y con las edades reportadas en otros trabajos de investigación como Noble *et al.* (1974, 1979), Sébrier *et al.* (1979), Tosdal *et al.* (1981), Vatin-Perignon *et al.* (1996), Swanson *et al.* (2004), Paquereau *et al.* (2005, 2006), Schildgen *et al.* (2007, 2009), De La Rupelle (2013), Brandemeier (2014) y Cuellar (2019). Observándose, que en el norte de la región OCM, el vulcanismo explosivo inició al menos hace 26 y 24 Ma (figura 53a), produciéndose al menos siete capas de ignimbritas y dos depósitos de CDP (figura 61).

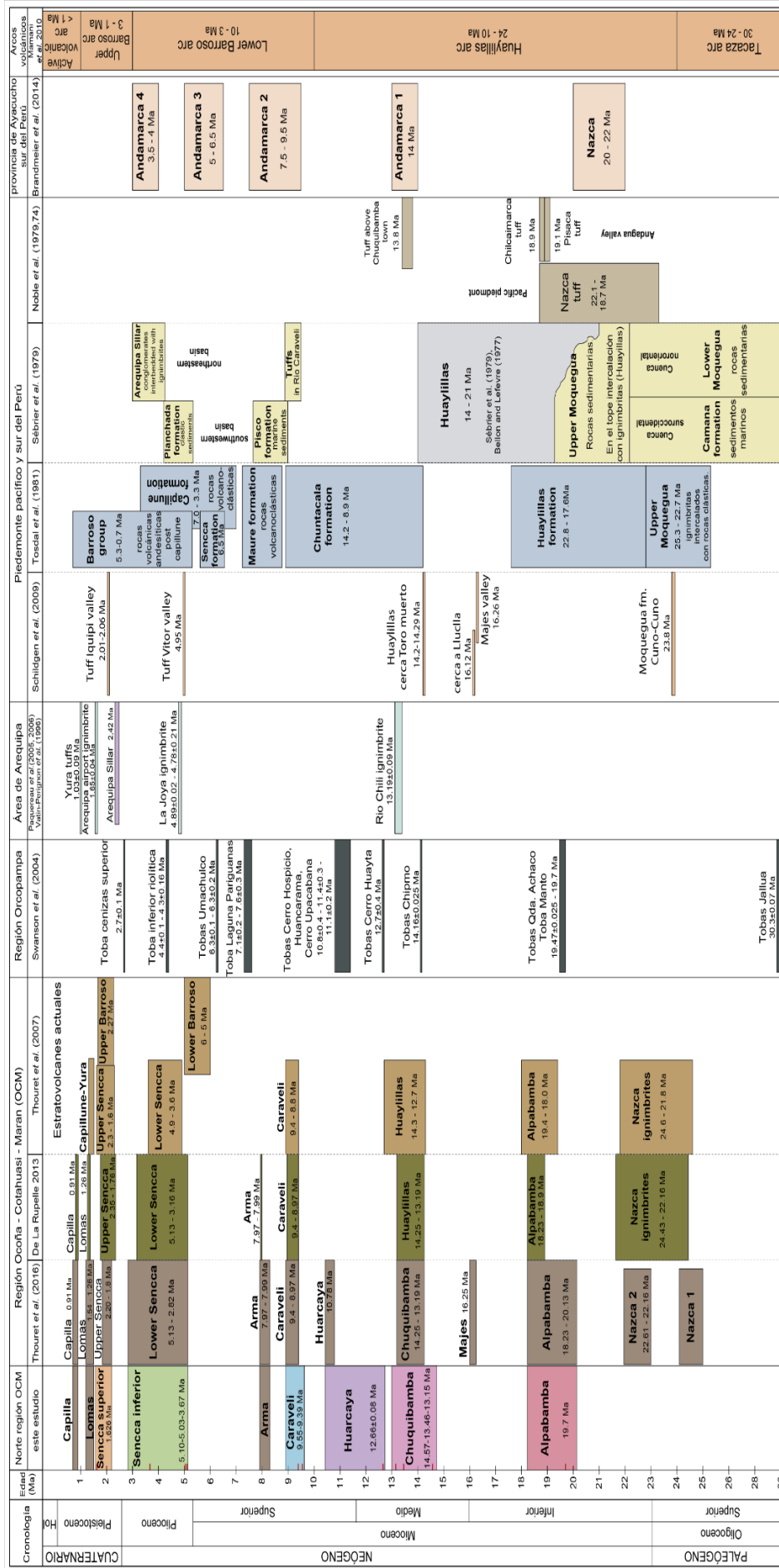


Figura 61. Estratigrafía de Ignimbritas y depósitos de CDP en el norte de la Región OCM, y Correlación con Unidades a lo Largo del Piedemonte Pacífico, áreas de Arequipa, Ayacucho y en el Sur del Perú. Recopilado de Noble *et al.* (1974, 1979), Sébrier *et al.* (1979), Tosdal *et al.* (1981), Vatin-Perignon *et al.* (1996), Swanson *et al.* (2004), Paquereau *et al.* (2005), Paquereau (2006), Thouret *et al.* (2007), Schildgen *et al.* (2007, 2009), Mamani *et al.* (2010), De La Rupelle (2013), Brandmeier (2014) y Thouret *et al.* (2016).

5.4.3. Geoquímica de las ignimbritas y depósitos de CDP en la región OCM y en la ZVC

Las rocas del norte de la región OCM, están relacionados a un proceso de cristalización fraccionada. Los diagramas Harker elaborados (figura 56) muestran disminución en Al_2O_3 , CaO y Na_2O frente al aumento de SiO_2 , esto corresponde a la fraccionación de plagioclasas que varían desde labradoritas hasta oligoclasas (figura 57). También se ha notado un incremento del K_2O frente al aumento de SiO_2 , el cual se traduce en la formación de feldespatos como las sanidinas (figura 57). Así también, la disminución de Fe_2O_3 , MgO y TiO_2 frente al aumento de SiO_2 , se debe a la cristalización de minerales ferromagnesianos como los piroxenos y biotitas (figura 57). Los resultados corroboran lo mencionado por Wilson M. (1989), que menciona que los magmas andinos pueden resultar de la contaminación y cristalización fraccionada dentro de la corteza y de la fusión parcial y cristalización fraccionada dentro del manto.

Las ignimbritas y depósitos de CDP en el norte de la región OCM, poseen valores altos de $\text{SiO}_2 > 63\%$, son de composiciones principalmente riolíticas, mostrando también variaciones de dacitas-riolitas o traquidacitas-riolitas (figura 54). Así mismo, el vulcanismo en la región OCM es principalmente de alto-K (calco-alcalino) (figura 55). Estos resultados afirman lo estudiado por autores como Thorpe *et al.* (1979), De Silva (1989), Wilson M. (1989), Francis *et al.* (1989), De Silva *et al.* (1994), Caffè *et al.* (2008) y Mamani *et al.* (2010), quienes describen rocas de composiciones intermedias a ácidas y de características de alto-K, ubicados en áreas dentro de la Zona Volcánica Central ZVC.



VI. CONCLUSIONES

- La caracterización de las litofacies y la correlación con la geocronología U/Pb de rocas, permitió redefinir la estratigrafía y determinar unidades de flujo para las ignimbritas y depósitos de CDP que afloran en el norte de la región OCM. Donde afloran siete capas de ignimbritas y dos depósitos de CDP, denominadas en orden cronológico del más antiguo al más joven como: Ignimbritas Alpbamba, Ignimbritas Chuquibamba, Ignimbritas Huarcaya, Ignimbritas Caraveli, CDP Arma, Ignimbritas Sencca inferior, Ignimbritas Sencca superior, Ignimbritas Lomas, CDP Capilla.
- Se ha obtenido edades U/Pb para seis capas de ignimbritas que son: Ignimbritas Alpbamba (edad de 19.07 ± 0.14 Ma), Ignimbritas Chuquibamba (rango de edad entre 13.15 ± 0.11 Ma y 14.57 ± 0.08 Ma), Ignimbritas Huarcaya (edad de 12.66 ± 0.08 Ma), Ignimbritas Caraveli (rango de edad entre 9.39 ± 0.08 Ma y 9.55 ± 0.07 Ma), Ignimbritas Sencca inferior (rango de edad de 3.67 ± 0.04 Ma a 5.1 ± 0.08 Ma), Ignimbritas Sencca superior (edad de 1.626 ± 0.035 Ma). Según los datos geocronológicos obtenidos en este trabajo y la correlación con otros trabajos, podemos concluir que en el norte de la región OCM, las rocas mapeadas como una única “Formación Alpbamba” en realidad consisten de una variedad de capas de ignimbritas y depósitos de CDP con edades que abarcan desde el Mioceno hasta el Pleistoceno. Además el vulcanismo explosivo en el norte de la región OCM inició hace al menos 26 Ma.



- El vulcanismo ignimbrítico en el norte de la región OCM es principalmente de características de alto- K (calco-alkalino), además las muestras de roca analizadas son fuertemente evolucionadas con valores altos de $\text{SiO}_2 > 63\%$ y son de composiciones principalmente riolíticas con variaciones de dacitas-riolitas y traquidacitas-riolitas. Así mismo, los magmas en el norte de la región OCM están relacionados a un proceso de cristalización fraccionada, según los análisis químicos (i.e. diagramas Harker) y estudios mineralógicos en secciones delgadas.



VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda ampliar los estudios al norte de la región de los cañones OCM, para determinar la continuidad y los límites de las ignimbritas y depósitos de CDP.
- Realizar más estudios de litofacies y hacer el cálculo de volúmenes de las ignimbritas y depósitos de CDP, para determinar las posibles áreas fuentes y la evolución espacial del vulcanismo explosivo en la región OCM. Así mismo, para determinar unidades de flujo y de enfriamiento de las capas de ignimbritas y depósitos de CDP en el sur del Perú.
- Realizar más dataciones radiométricas, estos datos correlacionados con edades de otros estudios dará una mejor visión del comportamiento temporal del vulcanismo explosivo de la región OCM y por consiguiente del sur del Perú.
- Ampliar los análisis de elementos mayores a un estudio de elementos traza sobre las rocas volcánicas del sur del Perú.



VIII. REFERENCIAS

- Alván, A., Eynatten, H., Dunkl, I., & Gerdes, A. (2015). Zircon U.Pb geochronology and heavy mineral compositions of the Camaná Formation, southern Peru: Constraints on sediment provenance and uplift of the Coastal and Western Cordilleras. *Journal of South American Earth Sciences*, 61, 14-32.
- Bellido, E., & Narvaez, S. (1960). *Geología del Cuadrángulo de Atico (Hoja 330)*. [Boletín n°2], Comisión Carta Geológica Nacional.
- Benavides, V. (1962). *Estratigrafía Pre-terciaria de la Región de Arequipa*. Sociedad Geológica del Perú - Segundo Congreso Nacional de Geología.
- Brandmeier, M., & Wörner, G. (2016). Compositional variations of ignimbrite magmas in the Central Andes over the past 26 Ma-A multivariate statistical perspective. *Lithos*, 262, 713-728.
- Brandmeier, M., Mamani, M., Jicha, B., & Wörner, G. (2014). *A remote sensing and geospatial statistical approach to understanding distribution and evolution of ignimbrites in the Central Andes with a focus on Southern Peru*. [Tesis doctoral, Georg-August-Universität zu Göttingen]. Dissertationen an der Georg-August-Universität Göttingen. <http://hdl.handle.net/11858/00-1735-0000-0022-5E6A-3>.
- Branney, M., & Kokelaar, P. (2002). *Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites* (Vol. Memoir 27). The Geological Society.
- Caffe, P. J., Soler, M. M., Coira, B. L., Onoe, A. T., & Cordani, U. G. (2008). The Granada ignimbrite: A compound pyroclastic unit and its relationship with Upper Miocene caldera volcanism in the northern Puna. *Journal of South American Earth Sciences*, 25, 464-484. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.10.004>
- Cas, R., & Wright, J. (1987). *Volcanic Successions Modern and Ancient* (1 ed.). Chapman & Hall.



- Cobbing, E. J., Ozard, J. M., & Snelling, N. J. (1977). Reconnaissance geochronology of the crystalline basement rocks of the Coastal Cordillera of southern Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 88, 241-246.
- Cuellar Q., J. C. (2019). *The Geology, Geochronology, and Geochemistry of the Miocene Volcanic Rocks at the Inmaculada Ag-Au mine, Southern Peru*. [Tesis de maestría inédita]. Oregon State University.
- Dalmayrac, B., Lancelot, J. R., & Leyreloup, A. (1977). Two-Billion-Year Granulites in the Late Precambrian Metamorphic Basement Along the Southern Peruvian Coast. *Science*, 198, 49-51.
- De La Rupelle, A. (2013). *Le volcanisme ignimbritique des canyons Ocoña-Cotahuasi (Sud du Pérou): chronostratigraphie, sources et liens avec la surrection andine*. [Tesis doctoral inédita]. Université Blaise Pascal - Clermont - Ferrand II.
- De Silva, S. L. (1989). Geochronology and Stratigraphy of the Ignimbrites from the 21°30'S to 23°30'S portion of the Central Andes of Northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37, 93-131. doi:10.1016/0377-0273(89)90065-6
- De Silva, S. L., Self, S., Francis, P. W., Drake, R. E., & Ramirez, C. (1994). Effusive silicic volcanism in the Central Andes: The Chao dacite and other young lavas of the Altiplano-Puna Volcanic Complex. *Journal of Geophysical Research*, 99(B9), 17,805-17,825. doi:10.1029/94JB00652
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). *An Introduction to the Rock-Forming Minerals* (2nd ed.).
- Dickin, A. P. (2005). *Radiogenic Isotope Geology* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Douglas, J. A. (1920). Geological sections through the Andes of Peru and Bolivia: II- From the port of Mollendo to the Inambari River. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, LXXVI, 1-61.
- Douglas, J. A. (1921). Geological sections through the Andes of Peru and Bolivia: III- From the Port of Callao to the River Perene. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, LXXVII, 246-284.
- Fisher, R., & Schmincke, H. (1984). *Pyroclastic Rocks*. Springer-Verlag.



- Francis, P. W., Sparks, R. S., Hawkesworth, C. J., Thorpe, R. S., Pyle, D. M., Tait, S. R., . . . McDermott, F. (1989). Petrology and geochemistry of volcanic rocks of the Cerro Galan caldera northwest Argentina. *Geological Magazine*, 126(5), 515-547. doi:10.1017/S0016756800022834
- Freymuth, H., Brandmeier, M., & Wörner, G. (2015). The origin and crust/mantle mass balance of Central Andean ignimbrite magmatism constrained by oxygen and strontium isotopes and erupted volumes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 169, 1-24. doi:10.1007/s00410-015-1152-5
- Gäbler, H.-E. (2002). Applications of magnetic sector ICP-MS in geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 75, 1-15. doi:10.1016/S0375-6742(01)00197-2
- Garziona, C. N., Hoke, G. D., Libarkin, J. C., Withers, S., MacFadden, B., Eiler, J., . . . Mulch, A. (2008). Rise of the Andes. *Science*, 320, 1304-1307. doi:10.1126/science.1148615
- Guevara, C., & Dávila, D. (1983). Estratigrafía y Tectónica terciaria de área Coracora - Pacapausa. *Bol Sociedad Geológica del Perú*, 71, 281-289.
- Hanchar, J. M., & Hoskin, P. W. (Eds.). (2003). *ZIRCON* (Vol. 53). Mineralogical Society of America and Geochemical Society.
- Harker, A. (1909). *The Natural History of Igneous Rocks*. Cambridge University Press.
- Hawthorne, F. C., Oberti, R., Harlow, G. E., Maresch, W. V., Martin, R. F., Schumacher, J. C., & Welch, M. D. (2012). Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, 97(11-12), 2031-2048. doi:https://doi.org/10.2138/am.2012.4276
- Irvine, T. N., & Baragar, W. R. (1971). A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548. doi:http://dx.doi.org/10.1139/e71-055
- Karimpour, M. H., Stern, C. R., & Mouradi, M. (2011). Chemical composition of biotite as a guide to petrogenesis of granitic rocks from Maherabad, Dehnow, Gheshlagh, Khajehmourad and Najmabad, Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 18(4), 89 - 100.



- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., & Zanettin, B. (1986). A chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 745-750. doi:<https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre Le Bas, M. J., Sabine, P. A., . . . Zanettin, B. (1989). *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell, Oxford.
- Leake, B. E. (1978). Nomenclature of amphiboles. *American Mineralogist*, 63, 1023-1052.
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C., Birch, W. D., Charles Gilbert, M., Grice, J. D., . . . Youzhi, G. (1997). Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *The Canadian Mineralogist*, 35, 219-246.
- Lockwood, J., & Hazlett, R. (2010). *Volcanoes Global Perspectives*. Wiley-Blackwell.
- MacDonald, G. A. (1968). Composition and Origin of Hawaiian lavas. *Geological Society of America Memoirs*, 116, 477-522. doi:<http://dx.doi.org/10.1130/MEM116-p477>
- MacDonald, G. A., & Katsura, T. (1964). Chemical composition of Hawaiian lavas. *Journal of Petrology*, 5, 82-133. doi:<http://dx.doi.org/10.1093/petrology/5.1.82>
- Mamani, M., Wörner, G., & Sempere, T. (2010). Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Geological Society of America Bulletin*, 122, 162-182. doi:10.1130/B26538.1
- Martinez, W., & Cervantes, J. (2001). *Mapa Geológico del Cuadrangulo de Pausa Hojas 31p I-IV, ESCALA 1:50,000*. [Mapa]. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET.
- McPhie, J., Doyle, M., & Allen, R. (1993). *Volcanic Textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. University of Tasmania.
- Mégard, F. (1967). Commentaire d'une coupe schématique a travers les Andes Centrales du Pérou. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, 9(4), 335-346.



- Mégard, F. (1978). *Etude Géologique des Andes du Pérou Central: Contribution a L'étude Géologique des Andes*. Instituto de Geología y Minería-Perú, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer.
- Mendivil, S. (1965). *Geología de los cuadrángulos de Maure y Antajave (Hojas 35-X, 35-Y)*. [Boletín n°10], Comisión Carta Geológica Nacional.
- Muñoz, L., Coaquira, F., Chacon, A., Pajuelo, D., & Ordoñez, E. (2014). *Mapa Geológico del Cuadrángulo de Cotahuasi Hojas 31q I-IV, Escala 1:50,000*. [Mapa]. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET.
- Newell, N. D. (1949). Geology of the Lake Titicaca Region, Peru and Bolivia. *Geological Society of America, GSA Memoirs*, 36. doi:<https://doi.org/10.1130/MEM36-p1>
- Noble, D. C., Farrar, E., & Cobbing, E. J. (1979). The Nazca group of south-central Peru age, source and regional volcanic and tectonic significance. *Earth and Planetary Science Letters*, 45, 80-86. doi:[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(79\)90109-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(79)90109-2).
- Noble, D. C., McKee, E. H., Farrar, E., & Petersen, U. (1974). Episodic Cenozoic volcanism and tectonism in the Andes of Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 21, 213-220. doi:[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(74\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(74)90057-0)
- Olchanski, E., & Dávila, D. (1994). *Geología de los cuadrángulos de Chuquibamba y Cotahuasi Hojas;32-q y 31-q*. [Boletín N°50], Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET.
- Ortiz, A., Suzaño, N., Hauser, N., Becchio, R., & Nieves, A. (2019). New hints on the evolutions of the Eastern Magmatic Belt, Puna Argentina. SW Gondwana margin: Zircon U-Pb ages and Hf isotopes in the Pachamama Igneous-Metamorphic Complex. *Journal of South America Earth Sciences*, 94, 1-21.
- Paquereau, P., Thouret, J.-C., Wörner, G., Fornari, M., Macedo, O., & Pierrick, R. (2005). Caractérisation des ignimbrites néogènes du bassin d'Arequipa, Pérou. *Comptes Rendus Geoscience*, 337, 477-486. doi:[10.1016/j.crte.2004.12.004](https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.12.004)
- Paquereau-Lebti, P., Fornari, M., Roperch, P., Thouret, J.-C., & Macedo, O. (2008). Paleomagnetism, magnetic fabric, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Pliocene and Quaternary ignimbrites in the Arequipa area, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 70, 977-997. doi:[10.1007/s00445-007-0181-y](https://doi.org/10.1007/s00445-007-0181-y)



- Paquereau-Lebti, P., Thouret, J.-C., Wörner, G., & Fornari, M. (2006). Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154, 251-275. doi:10.1016/j.jvolgeores.2006.02.014
- Paquette, J., Barbosa, J., Rohais, S., Cruz, S., Goncalves, P., Peucat, J., . . . Martin, H. (2015). The geological roots of South America: 4.1 Ga and 3.7 Ga zircon crystals discovered in N.E. Brazil and N.W. Argentina. *Precambrian Research*. doi:10.1016/j.precamres.2015.09.027
- Paquette, J.-L., Médard, E., Francomme, J., Bachèlery, P., & Hénot, J.-M. (2019). LA-ICP-MS U/Pb zircon timescale constraints of the Pleistocene latest magmatic activity in the Sancy stratovolcano (French Massif Central). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 52-61. doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.02.015
- Peccerillo, A., & Taylor, S. (1976). Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81. doi:10.1007/BF00384745
- Pecho Gutierrez, V. (1983). *Geología de los cuadrángulos de Pausa y Caraveli (Hojas 31-p y 32-p)*. [Boletín N°37], Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET.
- Quane, S., & Russell, J. (2004). Ranking welding intensity in pyroclastic deposits. *Bull. Volcanol*, 67, 129-143. doi:10.1007/s00445-004-0367-5
- Ramos, V. A. (2008). The basement of the Central Andes: The Arequipa and Related Terranes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36, 289-324. doi:10.1146/annurev.earth.36.031207.124304
- Reiners, P. W., Carlson, R. W., Renne, P. R., Cooper, K. M., Granger, D. E., McLean, N. M., & Schoene, B. (2018). *Geochronology and Thermochronology* (1 ed.). Wiley.
- Rickwood, P. C. (1989). Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22, 247-263. doi:10.1016/0024-4937(89)90028-5



- Rollinson, H. R. (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific & Technical.
- Ross, C., & Smith, R. (1961). Ash-Flow Tuffs: Their Origin, Geologic Relations and Identification. *US Geological Survey, Professional Paper, 366*.
- Sabidussi, J. (2014). *Etude de quelques ignimbrites miocenes du sud du Perou: Mesures d'Anisotropie de Susceptibilité Magnétique et de quelques parametres physiques*. [Tesis de maestría inédita]. Université Blaise Pascal - Clermont - Ferrand.
- Schildgen, T. F., Hodges, K. V., Whipple, K. X., Pringle, M. S., van Soest, M., & Cornell, K. (2009). Late Cenozoic structural and tectonic development of the western margin of the central Andean Plateau in southwest Peru. *Tectonics, 28*, 2-21. doi:10.1029/2008TC002403
- Schildgen, T. F., Hodges, K. V., Whipple, K. X., Reiners, P. W., & Pringle, M. S. (2007). Uplift of the western margin of the Andean plateau revealed from canyon incision history, southern Peru. *Geology, 35*(6), 523-526. doi:10.1130/g23532a.1
- Schoene, B. (2014). U-Th-Pb-Geochronology. In H. D. Holland, & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (2nd ed., pp. 341-378). Elsevier.
- Sébrier, M., Lavenu, A., Fornari, M., & Soulas, J.-P. (1988). Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and Northern Chile) from Eocene to present. *Géodynamique, 3*, 85-106.
- Sébrier, M., Marocco, R., & Jacques, J. (1979). Evolución Neógena del piedemonte pacífico de los andes del sur del Perú. *Segundo congreso geológico de Chile, 171-188*.
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S. R., Rymer, H., & Stix, J. (2015). *The Encyclopedia of Volcanoes* (2nd ed.). Academic Press.
- Sirqueira, A. R., Moura, M. A., Botelho, N. F., & Kyser, T. K. (2018). Nature and Evolution of Paleoproterozoic Sn and Rare Metal Albitites from Central Brazil: Constraints Based on Textural, Geochemical, Ar-Ar, and Oxygen Isotopes. *Minerals, 8*(9), 1-22. doi:10.3390/min8090396
- Smith, R. (1960a). Ash Flows. *Bulletin of the Geological Society of America, 71*, 795-842.



- Smith, R. (1960b). Zones and Zonal Variations in Welded Ash Flows. *Geological Survey, Professional papers, 354-F*, 149-159.
- Suhr, N., Rojas-Agramonte, Y., Chew, D. M., Pinto, A. J., Villagómez-Díaz, D., Toulkeridis, T., & Mertz-Kraus, R. (2019). Detrital-zircon geochronology and provenance of the El Oro Metamorphic Complex, Ecuador: Geodynamic implications for the evolution of the western Gondwana margin. *Journal of South America Earth Sciences, 90*, 520-539. doi:10.1016/j.jsames.2018.12.010
- Sundell, K., Saylor, J. E., & Pecha, M. (2019). Provenance and recycling of detrital zircons from Cenozoic Altiplano strata and the crustal evolution of western South America from combined U-Pb and Lu-Hf isotopic analysis. In B. K. Horton, & A. Folguera (Eds.), *Andean Tectonics* (1st ed., pp. 363-397). Elsevier.
- Swanson, K. E., Noble, D., Connors, K., Mayta, O., McKee, E., Sánchez, A., & Heizler, M. (2004). *Geologic map of the Orcopampa quadrangle, South of Perú*. [Boletín N°137], Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET.
- Tera, F., & Wasserburg, G. J. (1972). U-Th-Pb systematics in three apollo 14 basalts and the problem of initial Pb in lunar rocks. *Earth and Planetary Science Letters, 14*, 281-304. doi:10.1016/0012-821X(72)90128-8
- Tera, F., & Wasserburg, G. J. (1973). A response to a comment on U-Pb systematics in lunar basalts. *Earth and Planetary Science Letters, 19*, 213-217. doi:10.1016/0012-821X(73)90117-9
- Tera, F., & Wasserburg, G. J. (1974). U-Th-Pb systematics on lunar rocks and inferences about lunar evolution and the age of the moon. *Proceedings of the fifth Lunar Conference (Supplement 5, Geochimica et Cosmochimica Acta), 2*, 1571-1599.
- Thorpe, R. S., Francis, P. W., & Moorbath, S. (1979). Rare earth element and strontium isotope evidence concerning the petrogenesis of the north Chilean ignimbrites. *Earth and Planetary Science Letters, 42*, 359-367. doi:10.1016/0012-821X(79)90044-X
- Thouret, J.-C., Gunnell, Y., Jicha, B. R., Paquette, J.-L., & Braucher, R. (2017). Canyon incision chronology based on ignimbrite stratigraphy and cut-and-fill sediment sequences in SW Peru documents intermittent uplift of the western Central Andes. *Geomorphology, 298*, 1-19.



- Thouret, J.-C., Jicha, B. R., Paquette, J.-L., & Cubukcu, E. H. (2016). A 25 myr chronostratigraphy of ignimbrites in south Perú: implications for the volcanic history of the Central Andes. *Journal of the Geological Society*, 173. doi:10.1144/jgs2015-162
- Thouret, J.-C., Wörner, G., Gunnell, Y., Singer, B., Zhang, X., & Souriot, T. (2007). Geochronologic and stratigraphic constraints on canyon incision and Miocene uplift of the Central Andes in Peru. *Earth and Planetary Science*, 263, 151-166. doi:10.1016/j.epsl.2007.07.023
- Tosdal, R. M., Clark, A. H., & Farrar, E. (1984). Cenozoic poliphase landscape and tectonic evolution of the Cordillera Occidental, southernmost Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 1318-1332.
- Tosdal, R. M., Farrar, E., & Clark, A. H. (1981). K-Ar Geochronology of the late Cenozoic volcanic rocks of the cordillera occidental, southernmost Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal research*, 10, 157-173. doi:10.1016/0377-0273(81)90060-3
- Vatin-Perignon, N., Poupeau, G., Oliver, R. A., Lavenu, A., Labrin, E., Keller, F., & Bellot-Gurlet, L. (1996). Trace and rare-earth element characteristics of acidic tuffs from Southern Peru and Northern Bolivia and a fission-track age for the Sillar of Arequipa. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(1/2), 91-109.
- Wetherill, G. W. (1956). Discordant Uranium-Lead Ages, I. *Transactions, American Geophysical Union*, 37(3), 320-326. doi: 10.1029/TR037i003p00320
- Wilson, C., & Hildreth, W. (2003). Assembling an Ignimbrite: Mechanical and Thermal Building Blocks in the Bishop Tuff, California. *The Journal of Geology*, 111, 653-670.
- Wilson, J. J. (1963a). Cretaceous Stratigraphy of Central Andes of Peru. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 47(1), 1-34.
- Wilson, J. J. (1963b). *Geología del Cuadrángulo de Huaylillas (Hoja 37-x)*. [Boletín N°6], Comisión Carta Geológica Nacional.
- Wilson, J., & Garcia, W. (1962). *Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca (Hojas 36-v y 36-x)*. [Boletín], Comisión Carta Geológica Nacional.



Wilson, M. (1989). *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonics Approach* (1st ed.). Springer.

Wörner, G., Mamani, M., & Blum-Oeste, M. (2018). Magmatism in the Central Andes. *Elements*, 14(4), 237-244. doi:DOI: 10.2138/gselements.14.4.237

WEBGRAFÍA

APPLIED-SPECTRA. (s.f.). *What is LA-ICP-MS?* Obtenido de <https://appliedspectra.com/technology/la-icp-ms.html>

CAMECA. (s.f.). *Introduction to EPMA.* Obtenido de <https://www.cameca.com/products/epma/technique>

GEOCATMIN (s.f.). *Data geocronológica del Perú.* Obtenido de <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>



ANEXOS