



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**Estudio de las erupciones plinianas del volcán Misti
pertenecientes al Pleistoceno Superior que emplazaron
los depósitos “Sandwich Inferior” y Sandwich Superior”
en la ciudad de Arequipa**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR

Gian Marco ESCOBAR CRUZ

ASESOR

Guillermo Nicanor DIAZ HUAINA

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Escobar, G. (2021). *Estudio de las erupciones plinianas del volcán Misti pertenecientes al Pleistoceno Superior que emplazaron los depósitos “Sandwich Inferior” y Sandwich Superior” en la ciudad de Arequipa*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Académico Profesional de Profesional de Ingeniería Geológica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos Complementarios

Datos del autor	
Nombres y Apellidos	Gian Marco Escobar Cruz
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	48080028
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-1351-3799
Datos del asesor	
Nombres y Apellidos	Guillermo Nicanor Diaz Huaina
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07426765
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9005-3605
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y Apellidos	Tomas Ezequiel Gallarday Bocanegra
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08009915
Miembro del jurado 1	
Nombres y Apellidos	Ciro Sergio Bedia Guillen
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06130412
Miembro del jurado 2	
Nombres y Apellidos	Lourdes Janet Quiñones Lavado
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07426765
Datos de investigación	
Línea de Investigación	No Aplica
Grupo de Investigación	No Aplica
Agencia de Financiamiento	Perú, INGEMMET – FONDECYT, Convenio 158-2017.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Arequipa Provincia: Arequipa Distritos: Alto Selva Alegre, Cayma, Chiguata, Mariano Melgar, Miraflores y Paucarpata. Latitud: -16.341852°

	Longitud: -71.456365°
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Setiembre 2019 - setiembre 2020
URL de disciplinas OCDE	Geología
	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06
	Vulcanología
	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.07



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú, Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO**

De acuerdo a la Resolución Rectoral N° 01242-R-20, usando la plataforma virtual Google Meet el miércoles 20 de octubre del año 2021 siendo las 6:00 pm, y luego de instalar el acto académico protocolar el Vicedecano Dr. Jaime César Mayorga Rojas en la presencia de los miembros del jurado calificador:

Dr. TOMAS EZEQUIEL GALLARDAY BOCANEGRA	(Presidente de Jurado)
Dr. CIRO SERGIO BEDIA GUILLEN	(Miembro de Jurado)
Ing. LOURDES JANET QUIÑONES LAVADO	(Miembro de Jurado)

Reunidos para el acto académico virtual público de colación de la Tesis del Bach. **GIAN MARCO ESCOBAR CRUZ**, quien sustentará virtualmente la Tesis titulada: **ESTUDIO DE LAS ERUPCIONES PLINIANAS DEL VOLCÁN MISTI PERTENECIENTES AL PLEISTOCENO SUPERIOR QUE EMPLAZARON LOS DEPÓSITOS "SANDWICH INFERIOR" Y "SANDWICH SUPERIOR" EN LA CIUDAD DE AREQUIPA**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Geólogo. Su asesor fue el docente Magister, Guillermo Nicanor Díaz Huayna

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación virtual, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A SATISFACCIÓN DEL JURADO

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

APROBADO POR UNANIMIDAD CON NOTA DE (16) Dieciséis

Habiendo sido aprobada la sustentación virtual de la Tesis por el jurado calificador, el Presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO** al Bach. **GIAN MARCO ESCOBAR CRUZ**.

Siendo las 19.20 pm horas se dio por concluido el acto académico virtual, expidiéndose dos (02) Actas Originales de la Sustentación de la Tesis.

Lima, 20 de octubre de 2021



Firmado digitalmente por
GALLARDAY BOCANEGRA Tomas
Ezequiel FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 20.10.2021 19:28:18 -05:00

DR. TOMAS EZEQUIEL GALLARDAY BOCANEGRA
PRESIDENTE DE JURADO



Firmado digitalmente por BEDIA
GUILLEN Cirio Sergio FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 21.10.2021 18:08:54 -05:00

DR. CIRO SERGIO BEDIA GULLEN
MIEMBRO DE JURADO



Firmado digitalmente por QUIÑONES
LAVADO Lourdes Janet FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 20.10.2021 22:49:04 -05:00

ING. LOURDES JANET QUIÑONES LAVADO
MIEMBRO DE JURADO


ING. GUILLERMO NICANOR DIAZ HUAINA
MIEMBRO ASESOR

DEDICATORIA

A mi madre y tíos abuelos, pues sin su apoyo no habría recorrido este largo camino que me llevo a realizar esta tesis, aspirar a ser ingeniero y una persona de bien.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco al FONDO NACIONAL DE DESARROLLO CIENTÍFICO, TECNOLÓGICO Y DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA (FONDECYT) y al INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO (INGEMMET) quienes han financiado (Convenio N° 158-2017) el proyecto de investigación científica básica titulado: “Determinación de los periodos de recurrencia y procesos desencadenantes de erupciones explosivas recientes de los volcanes Misti y Chachani: implicaciones en la prevención del riesgo volcánico en Arequipa” a cargo de la investigadora principal M.Sc. Nélide Manrique Llerena. La realización de esta tesis tuvo la finalidad de completar parte del proyecto y a la vez me brindó la oportunidad de optar el título profesional de Ingeniero Geólogo.

Así mismo agradezco al Dr. Christopher Harpel (asociado investigador del VDAP, del Servicio Geológico de Estados Unidos), M. Sc. Rigoberto Contreras Aguilar, M. Sc. Edu Taipe Maquerhua (Coordinador del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET) y Dr. Marco Rivera Porras (Investigador Científico Principal en el Instituto Geofísico del Perú) por brindarme su asesoría, apoyo, conocimientos y paciencia en la elaboración de esta tesis.

A todos los Ingenieros, practicantes, pasantes y personal del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET por brindarme un año de gran aprendizaje, buenos momentos y amistad.

Finalmente, de forma muy sentida. Gracias a mi madre Ernestina, a mis tíos abuelos que son como dos padres Jorge y Berlín, a mi tía abuela que en paz descansa Hilda que fue como mi segunda madre y mi tía abuela Juana, a ellos les agradezco infinitamente por su incondicional apoyo.

ÍNDICE

RELACIÓN DE FIGURAS	8
RELACIÓN DE TABLAS	11
ABREVIATURAS	14
SIMBOLOGÍA	14
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
PRÓLOGO	17
1. INTRODUCCIÓN	18
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.3. JUSTIFICACIÓN	20
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	21
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	21
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	21
1.5. ANTECEDENTES	22
1.5.1. <i>Estudios Geológicos Previos</i>	22
1.5.2. <i>Actividad Volcánica del Misti</i>	23
1.6. BASES TEÓRICAS.....	25
1.6.1. <i>Peligro Volcánico</i>	25
1.6.2. <i>Parámetros Eruptivos</i>	27
1.6.3. <i>Clasificación de los Depósitos de Caída Piroclástica y sus Fragmentos</i>	32
1.6.4. <i>Estilo de Fragmentación</i>	34
1.7. GLOSARIO.....	34
¿POR QUÉ “SANDWICH INFERIOR” Y “SANDWICH SUPERIOR”?	34
1.8. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS	35
1.8.1. <i>Hipótesis General</i>	35
1.8.2. <i>Hipótesis Específicas</i>	35
1.9. IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES.....	35
1.10. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	36
1.11. POBLACIÓN Y MUESTRA	37
1.12. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	37
2. GENERALIDADES	39
2.1. UBICACIÓN Y ACCESO	39
2.2. POBLACIÓN	42
2.3. CLIMA.....	43
3. GEOLOGÍA, ESTRATIGRAFÍA, TECTÓNICA Y TEFROESTRATIGRAFÍA ... 44	
3.1. GEOMORFOLOGÍA	44
3.2. ESTRATIGRAFÍA.....	51

3.2.1. <i>Estratigrafía Regional</i>	51
3.2.2. <i>Estratigrafía Local (Pre Misti)</i>	51
3.2.3. <i>Tefro-estratigrafía del Volcán Misti</i>	51
3.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA.....	65
3.3.1. <i>Contexto Tectónico Regional</i>	65
3.3.2. <i>Contexto Tectónico Local</i>	66
3.3.3. <i>Geología Estructural</i>	67
3.3.4. <i>Estructuras Volcánicas</i>	69
4. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DEPÓSITOS “SANDWICH INFERIOR” Y “SUPERIOR”	71
4.1. DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA.....	71
4.1.1. <i>“Sandwich Inferior”</i>	71
4.1.2. <i>Capa Intermedia entre el “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	72
4.1.3. <i>“Sandwich Superior”</i>	72
4.2. CORRELACIÓN CRONOESTRATIGRÁFICA DE DEPÓSITOS CENOZOICOS DEL MISTI 73	
4.2.1. DISTRIBUCIÓN DE LOS DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS.....	80
4.3. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS DEPÓSITOS DE CAÍDA PIROCLÁSTICA ..	85
4.3.1. <i>Metodología</i>	85
4.3.2. <i>Procedimiento</i>	86
4.3.3. <i>Parámetros Estadísticos</i>	87
4.3.4. <i>Resultados de los Parámetros Estadísticos de los Depósitos “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	90
4.3.5. <i>Interpretación de los Parámetros Estadísticos</i>	93
4.3.6. <i>Diagrama de Walker</i>	97
4.4. COMPONENTES LITOLÓGICOS DE DEPÓSITOS DE CAÍDA PIROCLÁSTICA	97
4.4.1. <i>Proporción de los Componentes Litológicos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	102
4.5. <i>DIFERENCIACIÓN POR PROPORCIÓN DE COMPONENTES Y ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO ENTRE EL “SANDWICH INFERIOR” Y SANDWICH SUPERIOR”</i>	104
4.6. CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE TEFRAS.....	104
4.6.1. <i>Valores de Densidad para los Depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	105
4.7. PETROGRAFÍA.....	105
4.7.1. <i>Pómez del “Sandwich Inferior”</i>	105
4.7.2. <i>Escoria del “Sandwich Inferior”</i>	106
4.7.3. <i>Pómez del “Sandwich Superior”</i>	107
4.7.4. <i>Escoria del “Sandwich Superior”</i>	109
4.7.5. <i>Proporción y Diferencias Mineralógicas entre el “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	111
4.8. GEOQUÍMICA.....	112
4.8.1. <i>Clasificación Geoquímica de la Serie</i>	112
5. MODELO ERUPTIVO EN BASE AL ESTUDIO DE SUS DEPÓSITOS	114

5.1. CÁLCULO DE PARÁMETROS ERUPTIVOS DE LAS ERUPCIONES LIGADAS A LOS DEPÓSITOS DEL “SANDWICH INFERIOR” Y “SANDWICH SUPERIOR”	114
5.1.1. Mapa de Isópacas	115
5.1.2. Estimación del Volumen de los Depósitos de Caída	120
5.1.3. Volumen del Magma	125
5.1.4. Mapa de Isopletas	126
5.1.5. Estimación de la Altura de la Columna Eruptiva	130
5.1.6. Estimación de la Dispersión	132
5.1.7. Duración de la Erupción	133
5.1.8. Estilo Eruptivo	134
5.1.9. Magnitud e Intensidad	137
5.1.10. Índice de Explosividad Volcánica (IEV)	137
6. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN	138
6.1. DIFERENCIAS ENTRE LOS NIVELES DE LOS DEPÓSITOS	139
6.2. DIFERENCIAS EN LOS PARÁMETROS ERUPTIVOS DE LOS DEPÓSITOS	140
6.3. ESTILO DE FRAGMENTACIÓN	141
6.4. EDAD DE LOS DEPÓSITOS DEL “SANDWICH INFERIOR” Y “SANDWICH SUPERIOR”	142
6.5. MODELO DEL SUCESO ERUPTIVO	143
6.6. PELIGRO VOLCÁNICO Y ALCANCE AREAL DE LAS ERUPCIONES	144
6.6.1. Mapa de Peligros en Base a Simulaciones de las Erupciones Asociadas a los Depósitos del “Sandwich”	146
CONCLUSIONES	154
RECOMENDACIONES	156
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
ANEXOS	163
ANEXO I: TABLA DE POBLACIÓN SEGÚN EL INEI DESDE EL 2007 AL 2015 PARA LOS DISTRITOS DE LA PROVINCIAL DE AREQUIPA,	164
ANEXO II: PRINCIPALES COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS ELABORADAS EN BASE A DATOS DE CAMPO Y FOTOS ASOCIADAS.	165
ANEXO III: TABLAS DEL TAMIZADO REALIZADO EN LOS LABORATORIOS DEL INGEMMET	172
ANEXO IV: BASE DE DATOS HISTÓRICO METEOROLÓGICAS DEL SENAMHI (HTTPS://WEB2.SENAMHI.GOB.PE/?P=DATA-HISTORICA), DE LAS ESTACIONES CHIGUATA, LAS SALINAS Y LA PAMPILLA.	174
ANEXO V: VISTAS EN NICOLES PARALELOS Y NICOLES CRUZADOS DE SECCIONES DELGADAS DE MUESTRAS DEL “SANDWICH INFERIOR” Y “SANDWICH SUPERIOR”	177

Relación de Figuras

Figura 1	18
<i>Mapa del límite urbano y rural de la ciudad de Arequipa y el volcán Misti</i>	18
Figura 2	20
<i>Depósitos volcánicos sobreyaciendo el poblado de Calicanto</i>	20
Figura 3	26
<i>Mapa de Peligros por Caídas de Tefra para erupciones de IEV 3 a 6</i>	26
Figura 4	32
<i>“Diagrama de clasificación que ilustra los tipos de fragmentos que forman un depósito volcanoclástico, y los tipos de depósitos volcanoclásticos primarios y secundarios”</i>	32
Figura 5	40
<i>Mapa de ubicación del volcán Misti y la Zona Volcánica de los Andes Centrales</i> ..	40
Figura 6	41
<i>Mapa del área de estudio para los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	41
Figura 7	48
<i>Vista aérea de la cumbre, la caldera, el cráter y la cima del Misti</i>	48
Figura 8	48
<i>Parte intermedia de la llanura de inundación, atravesado por el río Chili</i>	48
Figura 9	49
<i>Tres fotos de coladas de lava de los volcanes Misti y Chachani</i>	49
Figura 10	50
<i>Mapa geomorfológico que involucra los volcanes Misti, Complejo Volcánico Chachani y Complejo Volcánico PichuPichu</i>	50
Figura 11	52
<i>Secuencia estratigráfica pre Misti cerca de Charcani V (base Gneis Charcani)</i>	52
Figura 12	52
<i>Tres fotos de: Afloramiento, extracción y muestra de mano de la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa (IAA) en la cantera Añashuayco</i>	52
Figura 13	53
<i>Dos fotos de los flujos de lava (Fl_m1,1) del volcán Misti</i>	53
Figura 14	61
<i>Columna estratigráfica del edificio Misti 3 (grupos 3-3 y 3-4)</i>	61
Figura 15	61
<i>Columna estratigráfica del edificio Misti 4</i>	61
Figura 16^a	63
<i>Mapa geológico del Misti modificado</i>	63
Figura 16^b	64
<i>Leyenda del mapa geológico (Figura 16^a)</i>	64
Figura 17	68
<i>Mapa neotectónico que involucra el área de estudio</i>	68
Figura 18	70
<i>Mapa con las principales estructuras y sistemas de fallas cercanas al volcán Misti</i> 70	70
Figura 19	75
<i>Columna estratigráfica de un afloramiento representativo de los depósitos de caída del volcán Misti</i>	75
Figura 20	76

<i>Afloramiento representativo de depósitos de caída de tefra del Misti (>33.7 ka)....</i>	76
Figura 21	77
<i>Afloramiento representativo de caídas del Misti en donde se tienen los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	77
Figura 22	78
<i>Columna estratigráfica de un afloramiento tipo de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	78
Figura 23	79
<i>Afloramiento tipo de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” .</i>	79
Figura 24	82
<i>Correlación de columnas estratigráficas de la zona proximal de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” (S.I. y S.S)</i>	82
Figura 25	83
<i>Nota: Los números al costado en algunas capas de los depósitos indican el espesor real.</i>	83
<i>Correlación de columnas estratigráficas de la zona distal de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	83
Figura 26	84
<i>Mapa de ubicación de puntos de afloramiento (38 para el SI y 33 para el SS)</i>	84
Figura 27	85
<i>Materiales para realizar el cribado de muestras piroclásticas</i>	85
Figura 28	89
<i>Tipos de asimetría según la gráfica de la curva</i>	89
Figura 29	90
<i>Tipos de Kurtosis según su curva de frecuencia.....</i>	90
Figura 30	91
<i>Histogramas y curvas de frecuencia para muestras del “Sandwich Inferior”</i>	91
Figura 31	93
<i>Histogramas y curvas de frecuencia para muestras del “Sandwich Superior”</i>	93
Figura 32	95
<i>Correlación de Media vs Asimetría para muestras del “SI” y “SS”.....</i>	95
Figura 33	95
<i>Correlación de Kurtosis vs Asimetría para muestras del “SI” y “SS”.....</i>	95
Figura 34	96
<i>Correlación de Kurtosis vs Asimetría para muestras del “SI” y “SS”.....</i>	96
Figura 35	97
<i>Diagrama de Walker para muestras del “S.I.” y “S.S.”, con los campos establecidos para diferenciar caídas, oleadas y flujos piroclásticos.....</i>	97
Figura 36	98
<i>Componentes litológicos de la caída del “Sandwich Inferior” (malla 4 mm).....</i>	98
Figura 37	99
<i>Componentes litológicos de la caída del “Sandwich Inferior” (malla 0.125 mm)</i>	99
Figura 38	101
<i>Componentes litológicos de la caída del “Sandwich Superior” (mallas 8 y 4 mm)</i>	101
Figura 39	101
<i>Foto de componentes litológicos de la caída del “SS” (malla 0.125 mm)</i>	101
Figura 40	105
<i>Vistas en nicoles paralelos y nicoles cruzados de pómez del “Sandwich Inferior”</i>	106

Figura 41	107
<i>Vistas en nicoles paralelos y nicoles cruzados de escorias del “Sandwich Inferior”</i>	107
Figura 42	108
<i>Vistas en nicoles paralelos y nicoles cruzados de pómez del “Sandwich Superior”</i>	108
Figura 43	110
<i>Vistas en nicoles paralelos y nicoles cruzados de escorias del “Sandwich Superior”</i>	110
Figura 44	113
<i>Clasificación de las pómez y escorias del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” en el diagrama TAS.....</i>	113
Figura 45	113
<i>Clasificación de las pómez y escorias del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”, en el diagrama de variación SiO₂ vs K₂O</i>	113
Figura 46	114
<i>Clasificación de las pómez y escorias del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” en el diagrama ternario AFM</i>	114
Figura 47	117
<i>Mapa de isópacas de los depósitos de caída del “Sandwich Inferior”</i>	117
Figura 48	119
<i>Mapa de isópacas de los depósitos de caída del “Sandwich Superior”</i>	119
Figura 49	120
<i>Dos gráficos para hallar el volumen de los depósitos del “SI” según el método exponencial “(ln)espesor vs área” y “espesor vs (raíz)área”</i>	120
Figura 50	121
<i>Dos gráficos para hallar el volumen de los depósitos del “SS” según el método exponencial “(ln)espesor vs área” y “espesor vs (raíz)área”</i>	121
Figura 51	123
<i>Gráfico para hallar el volumen de los depósitos del “SI” según el método de “ley de potencia” (“(ln)espesor vs (raíz)área”).....</i>	123
Figura 52	123
<i>Gráfico para hallar el volumen de los depósitos del “SS” según el método de “ley de poder” (“(ln)espesor vs (raíz)área”).....</i>	123
Figura 53	124
<i>Gráfico para hallar el volumen de los depósitos del “SI” según el “Modelo de Integración de una Función Tipo Weibull” (“espesor vs (raíz)área”).....</i>	124
Figura 54	125
<i>Gráfico para hallar el volumen de los depósitos del “SS” según el “Modelo de Integración de una Función Tipo Weibull” (“espesor vs (raíz)área”).....</i>	125
Figura 55	126
<i>Mapa de isópletas de pómez del depósito de caída de tefra del Sandwich Inferior</i>	126
Figura 56	127
<i>Mapa de isópletas de pómez del depósito de caída de tefra del “Sandwich Superior”</i>	127
Figura 57	128

<i>Mapa de isopletas de líticos del depósito de caída de tefra del “Sandwich Inferior”</i>	128
Figura 58	129
<i>Mapa de isopletas de líticos del depósito de caída de tefra del “Sandwich Superior”</i>	129
Figura 59	133
<i>Diagrama de Sparks et al. (1997) para hallar la tasa de descarga de masa de las erupciones asociadas a los depósitos del “SI” y “SS”</i>	133
Figura 60	134
<i>Diagrama de Mastin et al. (2009) para determinar el estilo eruptivo de las erupciones asociadas a los depósitos del “SI” y “SS”</i>	134
Figura 61	135
<i>Diagrama de Bonadonna y Costa (2013) para determinar el estilo eruptivo de las erupciones asociadas a los depósitos del “SI” y “SS”</i>	135
Figura 62	147
<i>Cuatro mapas de simulación en caso una erupción similar al “Sandwich Inferior” se diera en las condiciones climáticas del día 01-12-2018, comenzando a las 20:00 horas con una duración de 9.6 horas</i>	147
Figura 63	148
<i>Mapas de simulación en caso una erupción similar al “Sandwich Superior” se diera en las condiciones climáticas del día 28-12-2017, comenzando a las 21:00 horas con una duración de 10 horas</i>	148
Figura 64	152
<i>Mapa de Peligro por caídas de tefra en base a erupciones de IEV 5-4 que dejaron los depósitos del “Sandwich” (uso académico)</i>	152
Figura 65	153
<i>Mapa de Peligro por caídas de tefra en base a erupciones de IEV 5-4 que dejaron los depósitos del “Sandwich” (uso académico)</i>	153

Relación de Tablas

Tabla 1	23
<i>Depósitos de caída piroclástica del Misti de los últimos 33.7 ka</i>	24
Tabla 2	24
<i>Resumen de reportes del monitoreo volcánico del Misti (2015 al 2021)</i>	24
Tabla 3	28
<i>Parámetros eruptivos, descripción y métodos de cálculo más usados</i>	28
Tabla 4	34
<i>Determinación del estilo de fragmentación según la vesicularidad, morfología de los juveniles y proporción de líticos cogenéticos</i>	34
Tabla 5	36
<i>Variables y unidades de medida asociados a depósitos de tefra</i>	36
Tabla 6	36
<i>Características observadas y medibles del estudio</i>	36
Tabla 7	37
<i>Técnicas, instrumentos y materiales de recolección de datos para el estudio de tefras</i>	37
Tabla 8	42

<i>Datos de población y distritos que hubieran sido afectados si erupciones similares a las que depositaron el “Sandwich”, hubieran ocurrido en la actualidad</i>	42
Tabla 9	43
<i>Resumen de datos mensuales y anuales (2018 - 2021) de la estación meteorológica Chiguata (precipitación, dirección de viento y velocidad de viento).</i>	43
Tabla 10	45
<i>Descripción de las unidades geomorfológicas relacionadas a depósitos piroclásticos de los volcanes Misti, Chachani y Pichu Pichu</i>	45
Tabla 11	54
<i>Resumen de la estratigrafía regional, local y del volcán Misti asociada al estudio de depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”.</i>	54
Tabla 12	87
<i>Datos tomados del cribado de las muestras de los depósitos de caída “Sandwich Inferior” (SI) y “Sandwich Superior” (SS)</i>	87
Tabla 13	88
<i>Criterios sedimentológicos más usados en base a la desviación estándar gráfica.</i>	88
Tabla 14	89
<i>Clasificación de la asimetría (Sk1) según sus rangos de valor Phi (\emptyset).</i>	89
Tabla 15	90
<i>Rangos para la clasificación de la kurtosis (KG)</i>	90
Tabla 16	90
<i>Clases de tamaño según mm y phi para partículas volcánicas primarias</i>	90
Tabla 17	91
<i>Resultados estadísticos del software SFT Kware para muestras del “S.I.”</i>	91
Tabla 18	92
<i>Resultados estadísticos del software SFT Kware para muestras del “S.S.”</i>	92
Tabla 19	102
<i>Proporción de componentes litológicos del “Sandwich Inferior”</i>	102
Tabla 20	103
<i>Proporción de componentes litológicos del “Sandwich Superior”</i>	103
Tabla 21	112
<i>Proporción mineralógica del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	112
Tabla 22	115
<i>Área y espesor de las isópacas para los depósitos del “Sandwich Inferior”</i>	115
Tabla 23	118
<i>Área y espesor de las isópacas para los depósitos del “Sandwich Superior”</i>	118
Tabla 24	125
<i>Valores obtenidos del software AshCalc para el “Modelo de Integración de una Función Tipo Weibull” en base a los datos de isópacas de los depósitos del “SI” y “SS”</i>	125
Tabla 25	131
<i>Resultados del cálculo en MatLab para hallar la velocidad del viento y la altura máxima de la columna eruptiva de los depósitos del “SI”</i>	131
Tabla 26	131
<i>Resultados del cálculo en MatLab para hallar la velocidad del viento y la altura máxima de la columna eruptiva de los depósitos del “SS”</i>	131
Tabla 27	132

<i>Altura de la columna eruptiva máxima (Hmax) sobre el cráter hallados para el “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” y la constante “k” de Wilson & Walker (1987).....</i>	132
Tabla 28	134
<i>Tabla de datos calculados de MER (tasa de descarga) y Mt (masa total) con los cuales se obtuvo la duración de la erupción (ED) de los depósitos “SI” y “SS”</i>	134
Tabla 29	136
<i>Resumen de valores calculados para los parámetros de las erupciones asociadas a los depósitos del “SI” y “SS”</i>	136
Tabla 30	136
<i>Tabla de “Clasificación del Estilo Eruptivo” de las erupciones asociadas a los depósitos del “SI” y “SS” en base a sus parámetros eruptivos.</i>	136
Tabla 31	137
<i>Tabla de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) con valores planteados de los parámetros de las erupciones asociadas al “SI” y “SS”</i>	138
Tabla 32	140
<i>Datos combinados y normalizados resultado del conteo granulométrico y conteo por puntos de secciones delgadas para los depósitos del “SI” y “SS”</i>	140
Tabla 33	140
<i>Comparación de resultados obtenidos para los parámetros eruptivos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	140
Tabla 34	141
<i>Resumen de resultados obtenidos de la tasa de descarga de volumen, duración de la erupción, estilo eruptivo y el Índice de Explosividad Volcánica (IEV), para las erupciones asociadas a los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”</i>	141
Tabla 35	141
<i>Resumen de datos obtenidos de conteo granulométrico y conteo por puntos de secciones delgadas para los depósitos del “SI” y “SS”</i>	142
Tabla 36	142
<i>Depósitos de caída de tefra conocidos ligados a erupciones plinianas del volcán Misti.....</i>	142
Tabla 37	143
<i>Características principales para reconstruir el suceso eruptivo de las erupciones ligadas a los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”.....</i>	143
Tabla 38	144
<i>Distritos en donde hay presencia de depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” con sus respectivos espesores encontrados</i>	144
Tabla 39	145
<i>Resultados del análisis de cargas de colapso para techos de viviendas en base a la zona de influencia del volcán Galeras.....</i>	145
Tabla 40	149
<i>Descripción de las zonas de los Mapas de Peligros por Caídas de Tefra para Erupciones de Magnitudes Similares al “Sandwich” IEV 5-4 (uso académico).....</i>	149
Tabla 41	150
<i>Puntos más distales en caso se dieran erupciones similares al “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” en la actualidad.....</i>	150

ABREVIATURAS

- ka** : “kilo annum”, “kilo” es un neologismo del griego χίλιοι (“chilioi”) que se traduce como mil y “annum” del latín “annus” que se traduce como años.
- Ma** : “mega annum”, “mega” es una voz de origen griego que se traduce como grande o importante, pero actualmente se ha empleado para designar la escala del “millón”. Entonces Ma se entiende como “millones de años”
- IEV** : “Índice de Explosividad Volcánica”.
- CDP** : “corrientes de densidad piroclástica”, el cual es un depósito volcanoclástico primario que incluye a flujos piroclásticos (CDP concentrada) y oleadas piroclásticas (CDP diluida).
- PF** : del inglés “pyroclastic flows”, traducida como “flujo piroclástico”. Es una CDP concentrada, la cual de acuerdo a sus componentes se divide en: PF de bloques y ceniza, PF de bombas y ceniza y PF de pómez y/o escoria (ignimbrita).
- W** : del inglés “west”, se traduce como “oeste” y puede ir acompañado de otros puntos cardinales como complemento. Ej. NW: noroeste
- ca.** : del inglés “circa”, se entiende como “aproximadamente”.
- d.C.** : “después de Cristo”.
- EE. UU.**: Estados Unidos.
- ZVC** : “Zona Volcánica Central de los Andes”
- USGS** : siglas en inglés de “Servicio Geológico de Estados Unidos”
- ASH3D**: nombre o denominación para “Volcanic Ash Dispersion Model”, traducido se entiende como “Modelo de Dispersión de Ceniza Volcánica”
- Qda.** : “quebrada”

SIMBOLOGÍA

- ~ : Indica cantidad aproximada o estimación

Resumen

El volcán Misti, clasificado como volcán activo y considerado el más peligroso del sur peruano, está ubicado a 17 km al noreste de la ciudad de Arequipa. En los últimos 33.7 mil años ha tenido por lo menos 11 erupciones sub-plinianas a plinianas, de las cuales la octava y novena erupción están ligados a los depósitos de caída piroclástica denominados “Sandwich Inferior” (“S.I.”) y “Sandwich Superior” (“S.S.”) (hasta antes de esta tesis unidades de un único depósito denominado “Sandwich”), comúnmente separados por una capa intermedia delgada (espesor ~6 cm) de paleosuelo y/o material retrabajado. Estos depósitos tienen espesores máximos encontrados de 64 y 31 cm, mínimos de 8 y 8 cm con un alcance de 15.1 y 15.3 km en un área semielíptica de 197.7 km² y 202.07 km² distribuidos al suroeste (SO) desde el cráter del Misti y se componen principalmente de pómez 20 y 13 %, escoria 67 y 73 %, líticos cogenéticos 12 y 11 %, líticos xenolíticos 0.7 y 1.7; y líticos accesorios rojizos 0 y 1% respectivamente para el “S.I.” y “S.S.”.

Debido a la peligrosidad que este volcán representa para la ciudad de Arequipa (con más de un millón de habitantes), se ha calculado que las erupciones mencionadas (octava y novena) tuvieron un IEV máximo de 5 y 4, se originaron por un estilo de fragmentación magmática e involucraron la mezcla de dos magmas andesíticos (“mingling”). Las columnas eruptivas formadas tuvieron una altura máxima de 26.6 km y 24.6 km, influenciadas por vientos hacia el suroeste (SW) con una velocidad de 13 y 25 m/s que terminaron depositando un volumen de 6.1×10^7 m³ y 4.8×10^7 m³ de piroclastos en la ciudad de Arequipa.

Para determinar el posible alcance areal se utilizaron 24 modelamientos de dispersión de ceniza realizados en ASH3D (USGS) con los cuales se elaboró el “Mapa de Peligros por Caídas de Tefra para Erupciones de Magnitudes Similares al “Sandwich” IEV 5-4”, este mapa revela espesores de hasta 3 mm de lapilli de tefra en un área semielíptica de 83,754 km² y tres ejes menores. Sus dos puntos más distales son a ~294 km al este-noreste (desde el cráter) y 220 km al oeste-suroeste (desde el cráter), abarcando casi el área total del lago Titicaca y Moquegua, el ~50% del sur de Arequipa y Puno, llegando hasta la localidad de Achacachi en Bolivia, Mirave en Tacna, 208 km de playas y ~31 millas del Océano Pacífico.

Palabras clave: *Misti, tefra, erupción pliniana, mapa de peligros.*

Abstract

The Misti volcano (classified as an active volcano and considered the most dangerous in southern Peru) located in the Arequipa region (17 km northeast of the city of the same name) in the last 33.7 thousand years has had at least 11 sub-Plinian to Plinian eruptions, of which the eighth and ninth eruptions are linked to the pyroclastic fall deposits called "Lower Sandwich" (S.I.) and "Upper Sandwich" (S.S.), (until before this thesis units of a single deposit called "Sandwich"), commonly separated by a thin intermediate layer (thickness ~ 6 cm) of paleosol and / or reworked material. These deposits have maximum thicknesses found of 64 and 31 cm, minimums of 8 and 8 cm with a range of 15.1 and 15.3 km in a semi-elliptical area of 197.7 km² and 202.07 km² distributed to the southwest (SW) from the Misti crater and are composed mainly pumice 20 and 13%, slag 67 and 73%, cogenetic lithics 12 and 11%, xenolytic lithics 0.7 and 1.7; and lithic reddish accessories 0 and 1% respectively for the "S.I." and "S.S.".

Due to the danger that this volcano represents for the city of Arequipa (with more than one million inhabitants), it has been calculated that the mentioned eruptions (eighth and ninth) had a maximum IEV of 5 and 4, originated by a style of magmatic fragmentation and involved the mixing of two andesitic magmas ("mingling"). The eruptive columns formed had a maximum height of 26.6 km and 24.6 km, influenced by winds towards the southwest (SW) with a speed of 13 and 25 m/s that ended up depositing a volume of 6.1×10^7 m³ and 4.8×10^7 m³ of pyroclasts in the city of Arequipa.

To determine the possible areal range, 24 ash dispersion models were used, carried out in ASH3D (USGS), with which the "Map of Hazards due to Tephra Falls for Eruptions of Similar Magnitudes to the "Sandwich" IEV 5-4" was elaborated, this map reveals thickness of up to 3 mm of tephra lapilli in a semi-elliptical area of 83,754 km² and three minor axes. Its two most distal points are ~ 294 km east-northeast (from the crater) and 220 km west-southwest (from the crater), encompassing almost the total area of Lake Titicaca and Moquegua, $\sim 50\%$ of southern Arequipa and Puno, reaching the town of Achacachi in Bolivia, Mirave in Tacna, 208 km of beaches and ~ 31 miles of the Pacific Ocean.

Keywords: Misti, tephra, Plinian eruption, hazard map.

Prólogo

El estudio de los depósitos de caída piroclástica es importante para caracterizar los procesos eruptivos de los volcanes y determinar la magnitud, frecuencia, alcance e impacto que podrían generar en la población, infraestructura y el medio ambiente que los rodea.

Esta tesis se basa en el análisis del depósito de caída piroclástica “Sandwich” (originado por una erupción pleistocénica del volcán Misti), escogido de por lo menos nueve depósitos de caída piroclástica del volcán Misti que aún no han sido estudiados a detalle, debido a que tiene una frecuencia alta en los afloramientos reconocidos en estudios anteriores (Cacya, 2006; Rivera, 2010; Mariño 2016) y además porque tiene la peculiaridad de haber sido descrita como dos unidades divididas por una capa intermedia de ceniza oscura según Mariño et al. (2016), lo cual no es común en los otros depósitos. El nombre “Sandwich” fue una denominación práctica para su reconocimiento en los afloramientos (ver glosario), la cual se ha continuado en este y otros estudio actuales del Misti (ver glosario), por esta razón hemos nombrado a sus unidades “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”, sin embargo, desde los primeros trabajos de campo de esta tesis se encontraron indicios de que estas unidades podrían ser en realidad depósitos independientes, por tal uno de los objetivos específicos es definir en base a análisis tefroestratigráficos, sedimentológicos, petrográficos y geoquímicos; si el “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” son unidades o depósitos.

Estudiar un depósito del Misti es importante ya que este volcán activo (considerado “activo” debido a su actividad volcánica en los últimos 10 ka) perteneciente a la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC), según Macedo et al. (2016) es considerado el más peligroso del Perú y tiene un riesgo volcánico relativo de 197.4. Según Mariño et al. (2016) el Misti tiene un volumen de 50 km³, una altitud de 5822 m.s.n.m. (3.5 km sobre la superficie de la ciudad) y un cráter que se encuentra a 17.8 km del centro (Plaza de Armas de Arequipa) de la provincia de Arequipa (población de 1,080,635 habitantes según INEI - 2017).

La presente tesis se desarrolló en el marco del **CONVENIO N° 158-2017-FONDECYT** celebrado entre el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológico – FONDECYT y el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), **con la finalidad de desarrollar el proyecto de investigación científica básica**, titulado **“Determinación de los períodos de recurrencia y procesos desencadenantes de erupciones explosivas recientes de los volcanes Misti y Chachani: implicaciones en la prevención del riesgo volcánico en Arequipa”**.

1. Introducción

1.1. Identificación del Problema

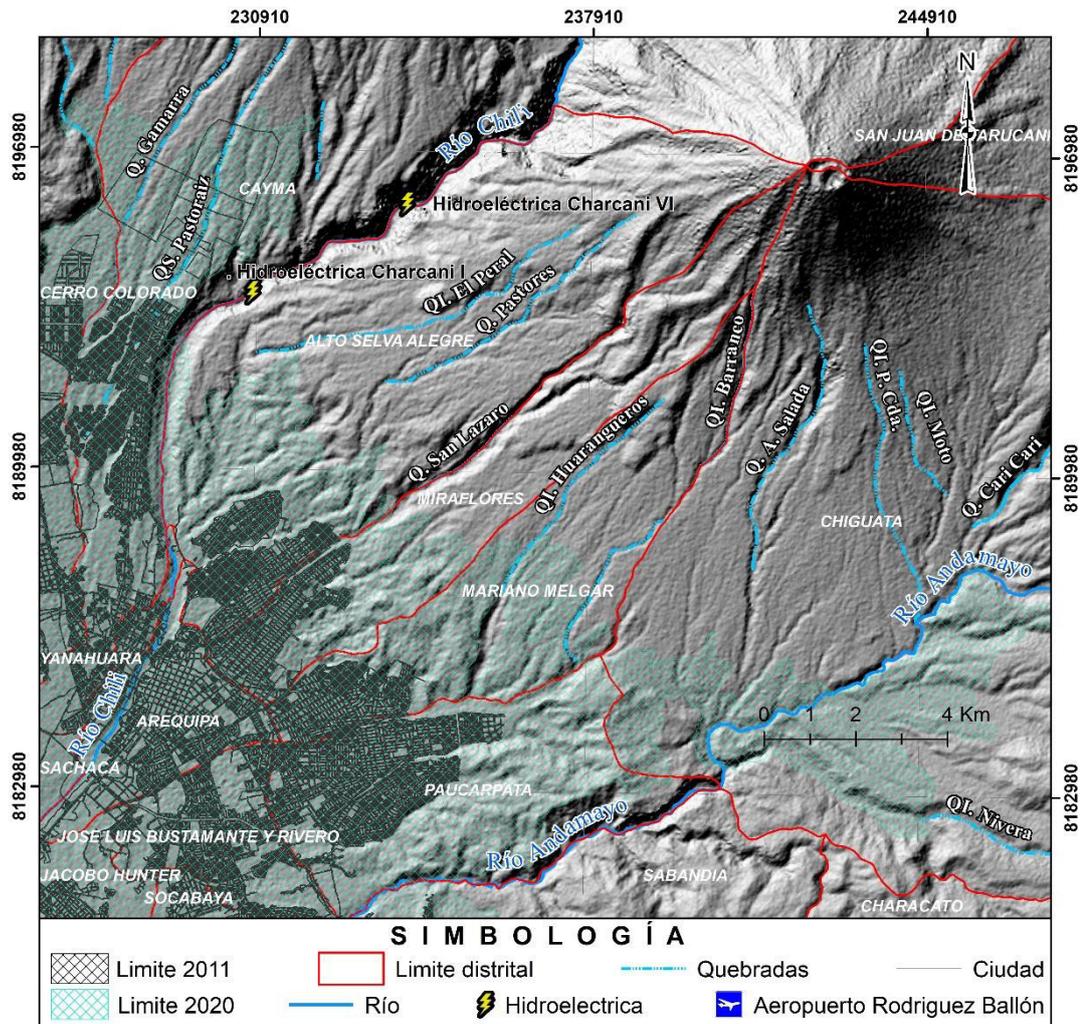
La provincia de Arequipa, segunda provincia más poblada del Perú con 1,080,635 habitantes (INEI, 2017), segunda región con mayor actividad económica del país (según PBI por departamentos; INEI, 2017), vive en situación de riesgo, debido al volcán activo del Misti (considerado “activo” porque presentó actividad eruptiva en los últimos 11 mil años).

Por lo menos en cuatro distritos de esta provincia (Mariano Melgar, Chiguata, Alto Selva Alegre y Miraflores) se han encontrado depósitos de caídas piroclásticas pertenecientes a erupciones explosivas ocurridas en el Pleistoceno Superior-Holoceno. Entre estos se puede identificar depósitos piroclásticos denominados como “**Sandwich**”, encontrados entre 5.5 y 13.5 km al sur y suroeste del cráter del volcán Misti. La ubicación de estos afloramientos indica que una posible erupción del volcán Misti en la actualidad podría afectar principalmente a: 445 478 personas (según la [Tabla 8](#) del capítulo 4) que viven a ~13 km de su cumbre, la represa Aguada Blanca, las centrales hidroeléctricas de Charcani, río Chili y río Andamayo como se observa en la [Figura 1](#).

Además, en la actualidad existe la primera versión de mapas de peligros por caídas piroclásticas del volcán Misti elaborados por el OVI-INGEMMET (Mariño et al., 2007), que podrían ser mejorados a partir de un estudio detallado de cada uno de los depósitos generados por el volcán Misti. Considerando que de por lo menos 12 depósitos ligados a erupciones plinianas solo se han estudiado 3, el estudio de los depósitos del “Sandwich” sumaría a 4 la base de datos para la elaboración de un mapa de peligros por caída piroclástica más confiable.

Figura 1

Mapa del límite urbano y rural de la ciudad de Arequipa y el volcán Misti



Nota: Se observa el avance de la población hacia cercanías del cráter del Misti del año 2011 al 2020, los cuales serían afectados en caso se diera un erupción del volcán Misti.

1.2. Formulación del Problema

Existe una serie de productos volcánicos primarios emitidos por el Misti “flujos de lava”, “corrientes de densidad piroclástica” (CDP) y “caídas de tefra”, además de posibles productos post eruptivos “lahares” (mezcla de agua y productos volcánicos que generan un desplazamiento de masas), sin eruptivos y no eruptivos “avalancha de escombros”. Las caída de tefra o caídas piroclásticas tienen el mayor radio de alcance (cientos de kilómetros) pero su amenaza es menor a la de los otros productos, de forma contraria las CDP tienen menor alcance (algunas decenas de kilómetros) pero una amenaza mayor.

Considerando que en los últimos ~30 ka, la actividad volcánica del Misti ha estado caracterizada por erupciones explosivas recurrentes, es presumible que una futura erupción tenga características similares; lo cual, podría afectar de manera considerable a la población e infraestructura desarrollada en zonas aledañas al

volcán. Por tal motivo, la falta de estudios detallados de las erupciones recientes puede repercutir en una adecuada identificación de los escenarios eruptivos necesarios para la gestión del riesgo volcánico.

En base a estas consideraciones nos planteamos:

Problema general

¿Cuáles serían las zonas de peligro por caída de tefra en la ciudad de Arequipa y sus alrededores, si se dieran erupciones similares a las que depositaron el “Sandwich”, en la actualidad?

Problemas específicos

- ¿El “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” son unidades de un único depósito denominado “Sandwich” o en realidad son depósitos ligados a dos erupciones independientes del volcán Misti?
- ¿Cuál fue la dinámica eruptiva de la erupción ligada al depósito de caída piroclástica “Sandwich”?
- ¿Cuál es la edad del depósito “Sandwich” tefro-estratigráficamente?

1.3. Justificación

Justificación Práctica

Debido a su cercanía a la ciudad de Arequipa, el volcán Misti es el volcán activo (considerado “activo” debido a que tuvo actividad eruptiva durante el Holoceno) más peligroso de los 10 volcanes activos del Perú entre ellos, Sabancaya (Samaniego et al., 2016), Ubinas (Rivera et al., 2014), Misti (Thouret et al., 2001, Mariño et al., 2016), Coropuna, Ticsani (Mariño et al., 2018), Tutupaca (Mariño et al., 2019), Yucumane (Rivera et al., 2018), Huaynaputina, Purupuruni y Casiri (Bromley et al., 2019).

Teniendo en cuenta la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C, probablemente mató por lo menos 1500 personas y destruyó más de 10 poblados menores (Thouret et al., 2002) como se observa en la [Figura 2](#), y eventos eruptivos recientes de los volcanes Sabancaya y Ubinas representan un peligro latente para las comunidades asentadas en sus alrededores.

El estudio del depósito de caída piroclástica conocida como “Sandwich” servirá principalmente para determinar zonas de peligro que serán plasmados en un “Mapa de Peligros por Caída de Tefra”, el cual será una herramienta para la evaluación del riesgo volcánico en la ciudad de Arequipa.

Figura 2

Depósitos volcánicos sobreyaciendo el poblado de Calicanto



Nota: “Calicata de 3.5 m de profundidad en una cárcava mostrando todos los Se observan muros destrozados, el suelo infrayacente al tope de un material de aluvión torrencial y lahárico”, foto y descripción tomado de Cueva et al. (2018).

Justificación Teórica

Con base en los antecedentes, fundamentos teóricos y mapas existentes se realiza el análisis del depósito de caída piroclástica “Sandwich” perteneciente al volcán Misti. El depósito del “Sandwich” corresponden a una erupción explosiva del Misti, este volcán en la actualidad es considerado “activo” y tiene el potencial de causar daños a la población y al medio ambiente de sus alrededores.

Los datos obtenidos con este estudio podrían ser útiles a otras investigaciones relacionadas al vulcanismo en la ciudad de Arequipa.

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

Analizar los depósitos de caída piroclástica “Sandwich” para evaluar el peligro volcánico que representarían erupciones similares del volcán Misti en la ciudad de Arequipa y sus alrededores.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar los afloramientos de los depósitos de caída piroclástica “Sandwich” existentes en la provincia de Arequipa, caracterizando su tefro-estratigrafía, sedimentología, geoquímica y petrografía.

- Calcular los parámetros eruptivos de las erupciones ligadas a los depósitos del “Sandwich” y generar modelos de dispersión de tefras.
- Determinar la edad relativa de los depósitos del “Sandwich” mediante correlaciones tefro-estratigráficas.

1.5. Antecedentes

1.5.1. Estudios Geológicos Previos

Los estudios geológicos previos relacionados a erupciones con depósitos de caída de tefra en el volcán Misti asociados a los depósitos “Sandwich” más relevantes para esta tesis son:

Thouret, J.C.; Finizola, A.; Fornari, M.; Legeley-Padovani, A.; Suni, J. & Frechen, M. (2001), en su artículo “Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Perú” publicado en la Sociedad Geológica de América. Menciona dos erupciones históricas del Misti las cuales son la erupción del 2050 B.P. y la del siglo XV, los depósitos ligados a estos han servido de depósitos guías en campo para encontrar los depósitos de caída del “Sandwich”. Si bien en este estudio no se reconoce a los depósitos del “Sandwich” se puede ver que estos pertenecen al edificio Misti 4 – grupo 4-1, uno de los 4 edificios en los que dividen al Misti.

Cacya, L. (2006), en su tesis de ingeniero “Volcán Misti: Sedimentología, geoquímica y correlación tefro-estratigráfica del depósito de caída de pómez “Autopista” – 14000 años”, describe brevemente el depósito de caída “Sandwich” y lo representa dentro una columna tefro-estratigráfica elaborada del lado suroeste del volcán Misti, ubicando a este depósito a dos caídas por encima del depósito “Autopista”. El depósito estudiado por Cacya es una guía estratigráfica muy importante para el estudio de esta tesis y de otros depósitos del Misti. Según las columnas tefro-estratigráficas de Cacya, suponiendo que las erupciones subplinianas y/o plinianas para el Misti ocurrieron cada 2000 años el depósito “Sandwich” tendría una edad de 8 000 años A.P. en base a correlaciones con columnas tefro-estratigráficas de Thouret et al. (2001).

Rivera, M. (2009), en su informe técnico “Estudio de productos emitidos por el volcán Misti durante los últimos 10,000 años” publicado por INGEMMET. En este informe en la columna estratigráfica de la carretera Arequipa - Escuela de Policías (10 km al noroeste del cráter del Misti), se describe un depósito de lapilli pómez por encima de la caída “Autopista”, la cual serían los depósitos del “Sandwich”.

Harpel, C.J.; De Silva, S.L. & Salas, G. (2011), en su artículo “The 2 ka eruption of Misti volcano, southern Perú – the most recent plinian eruption of Arequipa’s iconic volcano” publicado en la Sociedad Geológica de América. En este estudio se describe la caída de pómez y ceniza del “2 ka”, en la cual Harpel et al. han

encontrado una textura “mingling” en las tefras (bandas de color blanquecino en escorias marrones). Mencionado anteriormente en otros estudios como de Legros (1998) y Tepley et al. (2007, 2008), esta textura es producto de la contaminación del magma por un nuevo pulso. El “mingling” está presente en los depósitos de caída del “Sandwich”.

Mariño, J.; Rivera, M.; Thouret, J.-C. & Macedo, L. (2016), en el Boletín N° 60 “Geología y Mapa de Peligros del Volcán Misti” publicado por INGEMMET, mencionan al depósito de caída “Sándwich” como uno de los tres depósitos más voluminosos e importantes del edificio Misti 4 y hacen una descripción del depósito.

Harpel, C.J.; Cuno, J.J.; Cueva, K., Japura, S.; Cabrera, M.; Soncco, Y. & Rivera, M. (2018), en el Foro Internacional: “Los Volcanes y su Impacto”. con su tema: “Tefroestratigrafía preliminar de erupciones explosivas del volcán Misti (Arequipa, Perú) desde la “Autopista” y sus implicaciones para los peligros volcánicos, menciona que entre los depósitos de la “Autopista” y “Sandwich” se han documentado al menos 9 depósitos de caídas de tefras y cubriendo a dichos depósitos encontramos cenizas del volcán Huaynaputina de la erupción del año 1600 d.C.

Cuno, J. (2019), en su tesis: “Estudio de la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace 33.7 mil años A.P., que emplazó el depósito “Sacarosa” en la ciudad de Arequipa”, hace la tefro-estratigrafía del volcán Misti, en donde menciona a los depósitos del “Autopista” (20-14 ka), “Sandwich”, “La Rosada” (Harpel et al., 2018) y “Blanco”, incluyéndolos dentro del edificio o etapa Misti 3.

1.5.2. Actividad Volcánica del Misti

El volcán Misti se ha formado a lo largo de probablemente 112 mil años atrás, sus primeros eventos eruptivos han sido de tipo efusivos, posteriormente ha habido una mezcla de eventos efusivos y explosivos, para finalmente hasta donde se conoce actualmente desde la erupción ligada a los depósitos del “Fibroso” (Mariño et al., 2016) sobre la cual yacen los depósitos del “Sacaroso” datado por Cuno (2019) en 33.7 mil años, podemos decir que desde entonces el Misti ha tenido una serie de eventos eruptivos explosivos únicamente.

En la [Tabla 1](#), se ha realizado un resumen de todos los eventos eruptivos de escala considerable (IEV 2-5) conocidos hasta la actualidad. Reconocer estos eventos es posible a la presencia en campo de sus depósitos, principalmente de caída piroclásticas. Sin embargo, es necesario mencionar que se han dejado de mencionar muchos de ellos debido a que no se han encontrado evidencias suficientes para asociarlos al Misti, de estos la mayoría corresponden a erupciones pequeñas (menores a IEV 2).

Tabla 1

Depósitos de caída piroclástica del Misti de los últimos 33.7 ka

DEPÓSITOS DE CAÍDA PIROCLÁSTICA DEL MISTI	DATACIÓN (ka)	IEV	ESTUDIO MÁS RECIENTE	ESTUDIO A DETALLE
Ceniza "Pachacútec"	~0.6	2	Thouret et al., 2001	NO
"2 ka"	2	5	Harpel et al., 2011	SI
"Rosado"			Mariño et al., 2016	NO
"Sandwich"				
"Espuma Iridiscente"			Harpel et al., 2018	NO
"Espuma Gris"			Harpel et al., 2018	NO
"Autopista"		4	Cacya, 2006	SI
"Zebra"			Harpel et al., 2018	NO
"Blanco"			Mariño et al., 2016	NO
"Fibroso II"			Mariño et al., 2016	NO
"Sacarosa"	33.7	5	Cuno, 2019	SI
"Fibroso I"			Mariño et al., 2016	NO

A partir del 2015 se han realizado informes anuales de monitoreo multiparámetro del Misti, por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, en base a los métodos: (1) Sísmico (refleja la dinámica interna del volcán), (2) Visual – Térmico (características de emisiones y fenómenos asociados a la temperatura del volcán), (3) Geoquímico (composición de aguas y gases) y (4) Geodésico (deformación física del volcán). En la [Tabla 2](#) se tiene un resumen de los informes 2015, 2018 y 2021.

Tabla 2

Resumen de reportes del monitoreo volcánico del Misti (2015 al 2021)

Año	Monitoreo Sísmico	Monitoreo Geodésico	Monitoreo Visual	Monitoreo Térmico
2015	La principal actividad registrada estuvo dominada por los sismos tipo VT, seguidos de eventos de LP y esporádica actividad tremórica. La energía sismo-volcánica total es de 1.91 MJ. Esta sismicidad corresponde a un volcán activo, los valores de la energía liberada demuestran que	No se ha observado deformación del edificio del volcán Misti asociado a la actividad interna del volcán.	Las emisiones fumarólicas están constituidas principalmente por vapor de agua, alcanzaron alturas máximas de 500 m sobre el cráter. La dirección predominante de estas emisiones fue hacia el sur (Fig. 2.1.3.1.).	

	dicha actividad, es muy baja.			
2018	La principal actividad registrada durante el 2018, estuvo dominado por los sismos tipo VT, seguidos de eventos LP y esporádica actividad tremórica y eventos tipo "tornillo". La energía sismo-volcánica total es de 1.67 MJ. Esta sismicidad corresponde un volcán activo, los valores de la energía liberada demuestran que dicha actividad, es muy baja.	El monitoreo permanente de los cambios en la morfología del volcán mediante equipos GNSS, requiere complementarse con un cierto número de equipos que permitan realizar un análisis y diagnóstico del estado del volcán.	Las emisiones fumarólicas del volcán Misti, constituidas principalmente por vapor de agua, alcanzaron alturas máximas de 500 m sobre el cráter. La dirección predominante de estas emisiones fue hacia el sur.	El monitoreo continuo de la temperatura de las fumarolas no ha revelado variaciones significativas que nos indiquen un incremento en la actividad volcánica.
2021 (hasta el 2 de mayo)	En promedio: 9 sismos volcano – tectónicos (VT) por día, asociados al fracturamiento de rocas y/o sismos asociados al movimiento de fluidos (LP) y 1 sismo tipo tornillo por semestre.	Las estaciones GNSS que miden cambios volcánicos, NO observaron deformaciones relevantes.	Emisiones de vapor de agua que alcanzaron en promedio ~300 metros.	Ninguna anomalía térmica.

Nota: Datos resumidos de informes dados por el OVI-INGEMMET.

1.6. Bases Teóricas

Como bases teóricas, se menciona principalmente a las relacionadas con la evaluación de peligros, cálculo de parámetros eruptivos e índice de explosividad volcánica.

1.6.1. Peligro Volcánico

Para que un fenómeno natural específico se convierta en un peligro natural es necesario representar una amenaza a una comunidad, a las personas y sus medios de vida. Si se produce un fenómeno extremo en un área no poblada (por ejemplo, la Antártida) y no afecta a los medios de vida humanos, solo se considera como un fenómeno natural, pero si el mismo fenómeno ocurre dentro de un área poblada y plantea una amenaza, se considera un peligro ([Constantinescu, 2012](#)).

Métodos para la Evaluación del Peligro Volcánico. El volcán Misti (Arequipa) es uno de los volcanes activos más peligrosos del mundo junto a

Eyjafjallajökull (Islandia), Monte Vesubio (Italia), Popocatépetl (México), Sakurajima (Japón), etc. Cada uno con ciudades de una población cercana o superior al millón de habitantes.

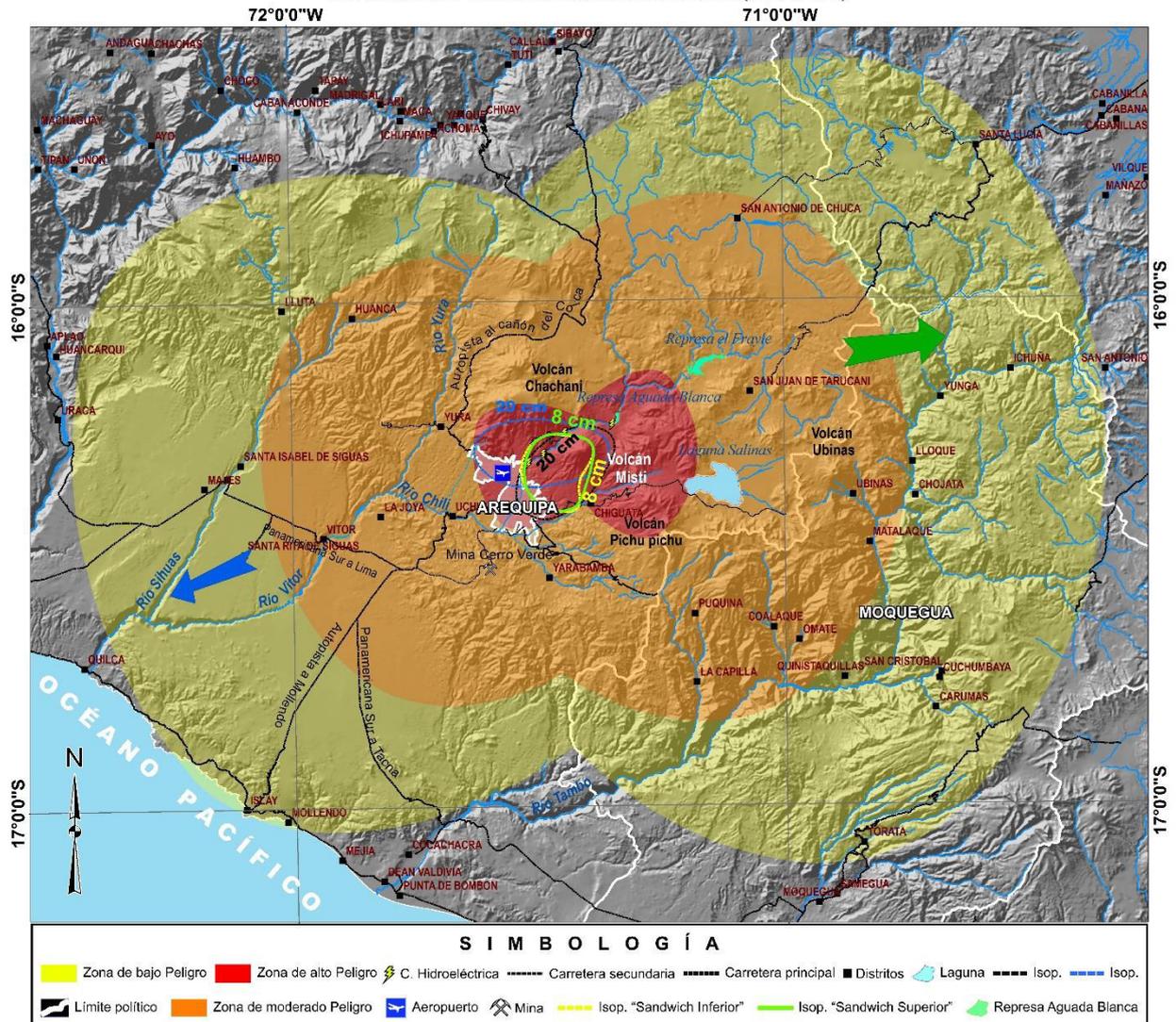
Para este tipo de ciudades densamente pobladas, se han desarrollado metodologías de evaluación de peligros como: Mapas determinísticos, situaciones de erupción basadas en mapas, métodos matemáticos (incluye la modelización informática) y métodos combinados.

Mapa de Peligros Volcánicos del Volcán Misti. El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, elaboro el mapa de peligros volcánicos múltiples (lluvia de cenizas, corrientes de densidad piroclástica y flujo de lahares) en base a estudios geológicos y vulcanológicos previos, así como de herramientas de modelamiento para flujos de lahares. Además, elaboro un mapa generalizado de peligros por caída de tefra para erupciones de un IEV de 2 a 6 ([Figura 3](#)), a este mapa se le han agregado las curvas de isópacas más distales de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”, datos que contribuyen a su mejoramiento y actualización.

Figura 3

Mapa de Peligros por Caídas de Tefra para erupciones de IEV 3 a 6

MAPA DE PELIGROS POR CAÍDAS DE TEFRA PARA UNA ERUPCIÓN DE MAGNITUD MODERADA A GRANDE (IEV 3 a 6)



Nota: El Mapa muestra además de las zonas de peligro, las curvas de isópacas de hasta 8 cm para los depósitos del "Sandwich". Las flechas azul y verde indican la dirección del viento preferente. Mapa modificado de [Mariño et al., 2011](#).

1.6.2. Parámetros Eruptivos

Los parámetros eruptivos principales de un depósito de caída se muestran en la [Tabla 3](#). Para determinar estos parámetros se utilizaron los siguientes datos de campo: espesor de la caída, máximo de pómez (distancia del diámetro mayor de 5 a 10 pómez más grandes en la caída) y máximo de líticos (distancia del diámetro mayor de 5 a 10 líticos más grandes en la caída).

Tabla 3

Parámetros eruptivos, descripción y métodos de cálculo más usados

PARÁMETROS ERUPTIVOS	ABREVIATURA		MÉTODOS DE CÁLCULO		FORMULA	DESCRIPCIÓN BREVE
	Español	Inglés	Autor	Nombre del modelo		
Volumen depositado (Volume bulk)	V-DEPOS	V-BULK	Propuesta por Pyle (1989) y extendida por Fierstein & Nathenson (1992)	Ley del adelgazamiento exponencial o Modelo exponencial	$V = 2 \times \frac{T_0}{k^2}$ <p>V= volumen bulk del depósito T₀: Máximo espesor extrapolado k: es la pendiente del segmento exponencial mejor trazado en la gráfica lnT vs la raíz cuadrada del área de la isópaca</p>	<p>Estos son los métodos más usados para el cálculo de volumen de tefra depositado. El cálculo depende del espesor de la caída y el área de la isópaca.</p> <p>Usa una escala combinada log espesor vs Área^{1/2}, el cual evita de cierta forma la inexactitud al extrapolar e interpolar, asumen que las isópacas son de forma elipsoidal</p>
			Bonadona & Houghton (2005)	Ley de potencial o ley de poder	$T(x) = TplA^{-0.5 \times m}$ <p>Tpl y m son el coeficiente y el exponente de la curva de ley de potencial</p> $v = \frac{2Tpl}{2 - m} [C^{(2-m)} - B^{(2-m)}]$ $B = \left(\frac{To}{Tpl}\right)^{\frac{1}{-m}}$ <p>To: Máximo espesor extrapolado (tomado del método de adelgazamiento exponencial) Límites proximales (B) sensible para valores de m<2, C: se elige el límite a favor del viento (downwind limit) de la propagación significativa de nubes volcánicas como lo muestran las imágenes satelitales (Prata y Grant, 2001), en caso sea un depósito antiguo se estima un valor empírico.</p>	<p>Describen una relación de ley de potencial, la cual describiría mejor la distribución de las porciones distales no asignadas del depósito de caída de tefra y arrojaría una estimación más representativa del volumen.</p> <p>Dado que no se puede integrar T(x) entre 0 e infinito, se debe escoger límites proximales (B) y distales (C) de integración. Mientras que establecer un límite proximal se expresa como B y puede ser sensible para valores de m<2. Los valores para Tpl, m, B y C se obtendrán de la gráfica área^{1/2}(Km) vs espesor (m) de la ley de Potencial.</p>

			Bonadona & Costa (2012)	Basado en la integración de la función de Weibull	$T = \theta \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{n-2} \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^n\right]$ <p>λ es la escala de longitud de caída característica del adelgazamiento del depósito (en km), θ es una escala de espesor (en cm; teniendo en cuenta que $\theta = e \times T(\lambda)$ donde $e \approx 2.718$ denota la constante de Euler-Napier) y n es un parámetro de forma (adimensional) x: raíz cuadrada del área de la isópaca</p>	Muestra un mejor acuerdo con los datos observados, conciliando el debate sobre el uso del método de ley exponencial versus ley de poder. El adelgazamiento del depósito se puede describir con al menos tres puntos distribuidos en toda la distribución pudiendo reproducir bien el adelgazamiento progresivo de los depósitos de tefra sin depender de la elección de segmentos arbitrarios o de extremos aleatorios de integración.
			Daggitt et al. (2014)	Software AshCalc para los tres anteriores	Recomienda para el método de Weibull, que inicialmente se proporcionen límites sueltos para n y λ (por ejemplo, $0 \leq \lambda \leq 1000$, $0 \leq n \leq 10$). Cuando se encuentra un ajuste razonable para los datos, los límites pueden ajustarse aún más. por ejemplo, si se encontró que $\lambda = 2.63$ y $k = 0.849$ proporcionó un ajuste razonable, los límites luego podría apretarse a $1 \leq \lambda \leq 5$, $0 \leq k \leq 2$	Nuevo software, AshCalc, para la comparación de los tres modelos más utilizados para determinar el volumen completo de los depósitos de caída de tefra volcánica: el modelo exponencial, el modelo de ley de poder y el modelo de Weibull. La herramienta AshCalc implementan dos mejoras en términos de rendimiento computacional en la estimación de los parámetros para el modelo de Weibull.
Volumen de densidad de roca equivalente o Volumen del magma	V-DRE	V-ERD			$V_M = \frac{\rho_C}{\rho_M} x V_D$ <p>V_M: Volumen del magma V_D: Volumen del depósito ρ_C: Densidad promedio del depósito, tomado en forma general con un valor de 1000 kg/m³ ρ_M: Densidad del magma</p>	Los volúmenes de tefra (volumen bulk) medidos deben corregirse para los espacios vacíos (vesículas, espacios vacíos entre piezas individuales de tefra para obtener una estimación del volumen original de magma erupcionado.
Altura de la columna eruptiva	H-ERUP	H-ERUP	Carey & Sparks (1986)		Relaciona el “croswind range” (distancia perpendicular desde el eje de la isópleta hasta el punto extremo máximo de la isópleta) versus el “maximum downwind range” (distancia desde el cráter hasta el punto extremo máximo alcanzado según el eje de la isópleta) de isópletas de pómez y líticos (principalmente el de líticos). Para usar el método es necesario correlacionar los datos con	La altura de la columna eruptiva depende de la dirección y velocidad del viento. Para su cálculo es necesario elaborar mapas de isópletas del máximo diámetro de líticos encontrados.

					alguno de los 4 diagramas propuesto por Carey and Sparks (1986).	
			Bias et al. (2015)		Código en MatLab basado en la compilación de mapas de isópetas. Simplifica el uso de los diagramas de Carey and Sparks (1986) en una interfaz sencilla de MatLab.	Compara los diagramas de Carey y Sparks (1986) utilizando métodos polinomiales y los interpola para rangos continuos de tamaños y densidades de clastos.
Velocidad del viento			Carey & Sparks (1986)		Resultado secundario de los gráficos de Carey and Sparks (1986).	La dirección y velocidad del viento son el agente principal de dispersión de la columna eruptiva. Los resultados son generalmente formas depositadas elipsoidales con el eje de viento coincidiendo con el eje de dispersión.
Tasa de descarga de masa o Tasa de masa eruptiva	TDM	MER o MDR	Wilson & Walker (1987)		$Hmax = k \times (MER)^{0.25}$ Hmax: máxima altura de la columna sobre el cráter k: constante empírica típicamente establecida en 0.236 para magmas silíceo y valores entre 0.244-0.295 para magmas andesítico o basálticos.	La tasa de descarga de masa representa la relación entre la cantidad de masa (generalmente en kg) arrojada del cráter y la frecuencia de caída (ocurrida durante una unidad de tiempo).
			Sparks et al. (1997)		Este método usa un diagrama propuesto por Sparks et al. (1997) en donde se plotea los valores de la altura máxima y la tasa de descarga de volumen.	Involucra una constante relacionada a la estratificación de la atmósfera.
			Mastin et al. (2010)		$MER = \left(\frac{Hmax}{k}\right)^{\frac{1}{0.241}} \times 2500$ Hmax: máxima altura de la columna sobre el cráter MER: tasa descarga de masa en kg/s k: 2.0 establecida por Mastin et al. (2010) Nota: el cálculo de MER en kg/s involucra multiplicar por la densidad de 2500 kg/m ³ como se observa.	Muestra mejoras en los parámetros eruptivos en base a modelos de transporte y dispersión de cenizas aplicado a la mayoría de las erupciones conocidas, que cuentan un ajuste entre la altura de la columna y la tasa del flujo volumétrico,
	TDV	VDR	Sparks et al. (1997)		$Ht = 1.67Q^{0.259}$ Ht: máxima altura de la columna Q: tasa descarga de volumen en m ³ /s	Este parámetro es complementario con el MER.

Tasa de descarga de volumen					1.67: constante relacionada a la estratificación de la atmosfera																															
			Mastin et al. (2010)		$Hmax = k \times VDR^{0.241}$ Hmax: máxima altura de la columna sobre el cráter VDR: tasa descarga de volumen en m ³ /s k: 2.0 establecida por Mastin et al. (2010)																															
Duración de la erupción	DE	ED	Walker (1980)		$Ed = \frac{Mt}{MDR}$ Ed: duración de la erupción (s) Mt= masa total de productos emitidos (kg) MDR = tasa de descarga de masa (MDR o MER)	Es el tiempo de emisión de los productos de caída. Por tanto, dependerá de la masa del magma y de su tasa de descarga (MER).																														
Estilo eruptivo	E-ERUP	E-ERUP	Mastin et al. (2009)		Gráfico: Log tasa de descarga de masa (kg/s) vs Altura de la columna eruptiva (km)	En base a las diferentes estimaciones de volumen bulk, tasa de descarga, granulometría, etc. Se puede establecer de forma empírica un estilo de erupción que caracterizan la actividad volcánica, mediante los esquemas propuestos por los distintos autores.																														
			Bonadonna & Costa, (2013)		Gráfico: Altura de la columna eruptiva (km) vs Tasa de descarga de masa (kg/s)																															
			Cioni et al. (2008)		Tabla que relaciona el V (m ³), Magnitud, Intensidad, Altura de la columna sobre el nivel del mar, bt y bc de Pyle																															
Índice de explosividad Volcánico	IEV	VEI	Newhall and Self (1982)		<table border="1"> <tr> <td>IEV</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>7</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>V (m³)</td> <td>10⁴</td> <td>10⁶</td> <td>10⁷</td> <td>10⁸</td> <td>10⁹</td> <td>10¹⁰</td> <td>10¹¹</td> <td>10¹²</td> <td>10¹³</td> </tr> <tr> <td>H-ERUP (km)</td> <td><0,1</td> <td>0,1-1</td> <td>1-5</td> <td>3-15</td> <td>10-25</td> <td>>25</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	IEV	0	1	2	3	4	5	6	7	8	V (m ³)	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³	H-ERUP (km)	<0,1	0,1-1	1-5	3-15	10-25	>25				Escala entera del 0 al 8 dependiente del volumen erupcionado de tefra (m ³) y la altura de la columna eruptiva sobre el cráter (km). Asume un vínculo entre la magnitud y la intensidad, de modo que un solo número describe el tamaño de una erupción.
IEV	0	1	2	3	4	5	6	7	8																											
V (m ³)	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³																											
H-ERUP (km)	<0,1	0,1-1	1-5	3-15	10-25	>25																														
Intensidad	I	I	Pyle (2000)		$I = \log_{10}(MER) + 3$ I: Intensidad MER: tasa de erupción masiva en kg/s	Al deshacer el vínculo asumido entre la masa erupcionada y la tasa de erupción, es posible describir y comparar las erupciones tanto explosivas como efusivas a través de índices logaritmos de magnitud e intensidad.																														
Magnitud	M	M	Pyle (2000)		$M = \log_{10}(Mt) - 7$ M: magnitud Mt: masa total del depósito erupcionada (kg)																															

1.6.3. Clasificación de los Depósitos de Caída Piroclástica y sus Fragmentos.

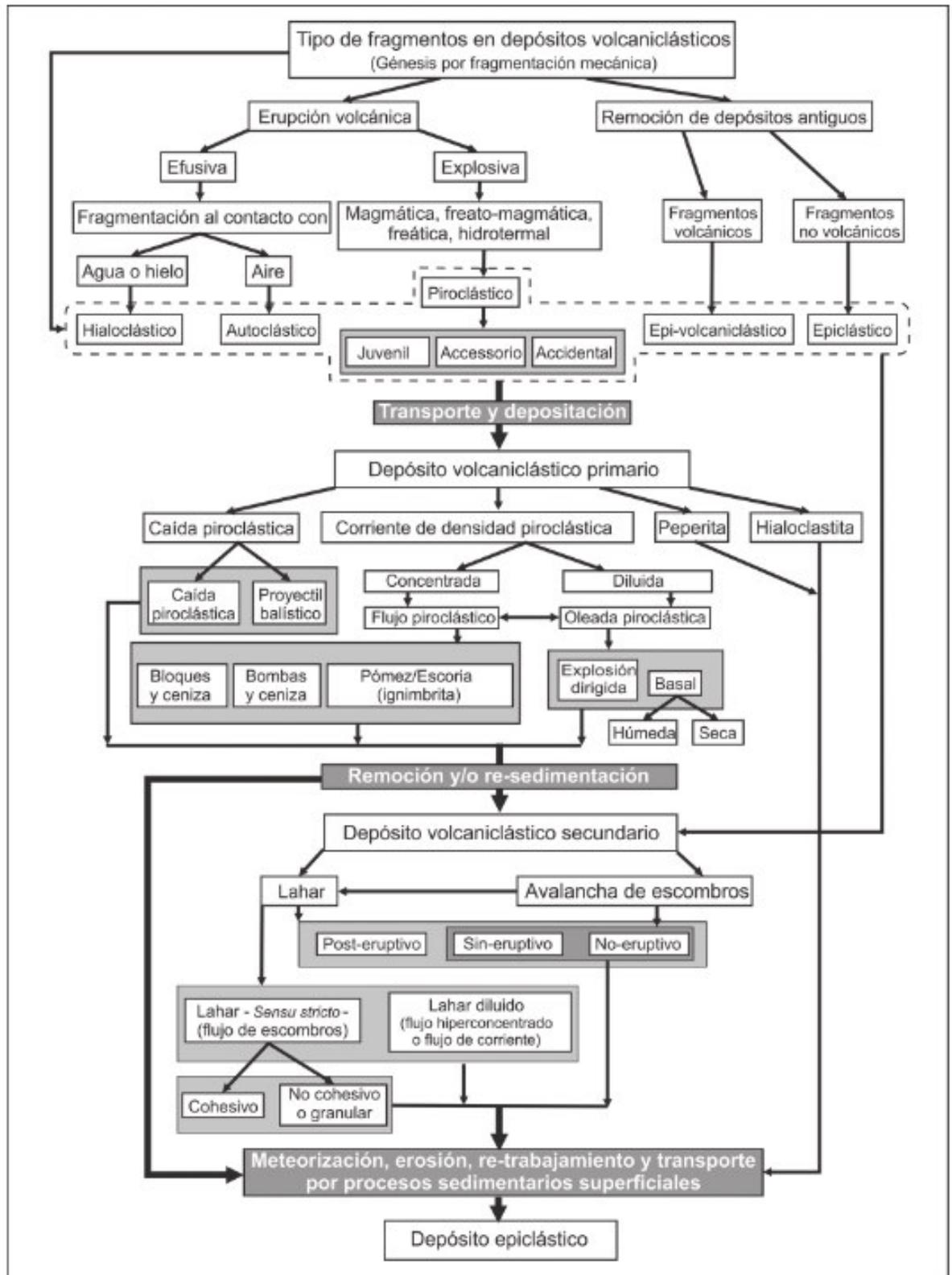
Los depósitos volcanoclásticos según el origen de fragmentación ([Figura 4.](#)) se componen principalmente de fragmentos piroclásticos juveniles (fragmentos formados directamente de la fragmentación del magma emitido en una erupción), accesorios (aquellos volcánicos co-magmáticos preexistentes, involucrados desde el conducto, el edificio volcánico o los depósitos asociados a este, durante una erupción), los cuales son difíciles de diferenciar con respecto a los juveniles; y accidentales (provenientes de rocas no co-magmáticos e involucrados en una erupción) según Murcia et al. ([2013](#)).

Ahora los depósitos de caída piroclástica (también llamados depósitos de caída de tefras, depósitos de caída de pómez y/o escoria) son depósitos volcanoclásticos primarios, debido a que sus facies indican una acumulación y que sus fragmentos predominantes son piroclásticos ([Murcia et al., 2013](#)).

En los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” tenemos fragmentos piroclásticos juveniles (pómez, escoria, ceniza y mingling), fragmentos accesorios (líticos) y fragmentos accidentales (raramente encontrados como líticos oxidados).

Figura 4

“Diagrama de clasificación que ilustra los tipos de fragmentos que forman un depósito volcanoclástico, y los tipos de depósitos volcanoclásticos primarios y secundarios”



Nota: Tomado de Murcia et al. (2013).

1.6.4. Estilo de Fragmentación

Una erupción explosiva según su origen suele ser magmática o freatomagmática. La primera se origina debido a la fragmentación del magma por la expansión de gases originalmente disueltos en él, la segunda por interacción del magma con agua externa. Se ha hecho una tabla resumen ([Tabla 5.](#)) en base a los criterios de Houghton y Wilson ([1989](#)), [Cas y Wright \(1987\)](#), [Barberi et al. \(1989\)](#) y [Lorenz \(1987\)](#).

La morfología y vesicularidad de los juveniles; la abundancia, tipo y morfología de fragmentos líticos son propiedades principales para distinguir el estilo de fragmentación a partir de un depósito piroclástico de caída ([Tabla 4.](#)), sin embargo, ninguno de estos criterios es absoluto para su diagnóstico ([Houghton y Wilson, 1989](#)).

Cabe mencionar que la composición es independiente de la vesicularidad y estilo de fragmentación ([Lorenz, 1987](#)).

Tabla 4

Determinación del estilo de fragmentación según la vesicularidad, morfología de los juveniles y proporción de líticos cogenéticos

TIPO DE ERUPCION		VESICULARIDAD	VISCOSIDAD	TASA DE ERUPCION	MORFOLOGIA DE JUVENILES	LITICOS COGENETICOS
Magma ́ icas secas		70% - 80%	independiente		rugosa e irregular	baja proporción
		<25%	altas	alta		
		30%-50%	disminuci3n de volatiles / magma puede desacoplarse			
Freatomagm ́ icas h ú medas	etapa temprana	reducci3n del \acute ndice en gran medida (<40%) con rangos hasta 80%			angulosa de bloque	alta proporción
	etapa tard ́ a	efecto menor en el \acute ndice y amplia el rangos de manera limitada				

Nota: Según los datos compilados de Houghton y Wilson ([1989](#)), Cas y Wright ([1987](#)); Barberi et al. ([1989](#)) y Lorenz ([1987](#)).

1.7. Glosario

¿Por qué “Sandwich inferior” y “Sandwich Superior”?

Los nombres “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior, parten de la idea de que ambos son unidades de un solo dep3sito nombrado desde los estudios de Cacya (2006) como “Sandwich”. El nombre “Sandwich” en ese estudio fue dado a un dep3sito de cáida pirocĺstica del volćn Misti, el cual teńa la caracteŕstica peculiar de tener un nivel intermedio de color oscuro al observarla en los afloramientos.

Continuar la denominación “Sandwich”, una denominación informal, en este estudio se ha dado porque estudios actuales nacionales e internacionales de especialistas en este tipo de depósitos volcánicos siguen usando denominaciones similares debido a que ayudan en campo a su fácil reconocimiento y correlación con otros depósitos de erupciones volcánicas.

Algunos depósitos de caída piroclástica nombrados de forma similar son: “Fibroso” (Mariño et al., 2016) debido a que las tefras tenían una textura fibrosa muy resaltante, “Sacarosa” (Cuno, 2019) debido a que la capa tenía una granulometría fina principalmente de cristales de plagioclasa, “Blanco” (Mariño et al., 2016) debido a que el color de la capa resaltaba un tono blanco, “La Zebra” (Harpel et al., 2018) debido a que la capa tiene varios niveles oscuros de concentración de líticos, etc.

1.8. Formulación de la Hipótesis

En base a la conjetura de que las unidades “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” son en realidad depósitos independientes planteamos las siguientes hipótesis.

1.8.1. Hipótesis General

El análisis de los depósitos de caída piroclástica “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” ayudará a establecer zonas de peligro en un “Mapa de Peligro Volcánico por Caída de Tefra”, dando a conocer el posible alcance areal que tendrían erupciones plinianas del volcán Misti, los cuales podrían afectar a la ciudad de Arequipa y sus alrededores.

1.8.2. Hipótesis Específicas

- Los estudios petrográficos, sedimentológicos, geoquímicos y estratigráficos caracterizarán el “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”, determinando diferencias entre ambos para considerarlos depósitos independientes y no unidades de un único depósito.
- El cálculo de los parámetros eruptivos de las erupciones ligadas al “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” servirán para generar modelos de dispersión de tefras en condiciones climáticas actuales.
- Las correlaciones tefro-estratigráficas realizadas, en base al levantamiento de columnas tefro-estratigráficas de cada afloramiento, determinarán la edad relativa de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”.

1.9. Identificación y Clasificación de las Variables

Identificación de Variables

Las variables identificadas en este estudio se observan en la [Tabla 5](#), las cuales se han dividido en dos grupos:

Variables Independientes: Análisis de los depósitos de caída piroclástica “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

Variables Dependientes: Prevenir y mitigar los peligros por caída piroclástica en la ciudad de Arequipa

Operacionalización de Variables

La operacionalización de variables del “análisis de los depósitos” dará como resultados variables de la “evaluación de peligros”.

Tabla 5

Variables y unidades de medida asociados a depósitos de tefra

CATEGORÍA	UNIDAD DE MEDIDA
VARIABLES INDEPENDIENTES	
Edad absoluta	años
Granulometría	porcentaje en peso (%), Phi
Espesor	metros (m), centímetros (cm)
Diámetro	metros (m), centímetros (cm)
Área	kilómetros cuadrados (km ²)
Densidad	gramos por centímetro cúbico (g/cc ³), kilogramos por metro cubio (kg/m ³)
Altitud	metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)
Geoquímica	porcentaje en peso (%), SiO ₂ , K ₂ O, Na ₂ O, FeO y MgO
Componentes	proporción en porcentaje con respecto al total
VARIABLES DEPENDIENTES	
Masa	Kilogramos (kg)
Volumen del depósito de caída de tefra	metros cúbicos (m ³), kilómetros cúbicos (km ³)
Tasa de descarga de volumen	metros cúbicos por segundo (m ³ /s)
Tasa de descarga de masa o tasa de masa eruptiva (MER)	kilogramos por segundo (kg/s)
Altura de la columna eruptiva	kilómetros (km), pies (ft, ‘)
Velocidad del viento	metros por segundo (m/s)
Dirección del viento	Puntos cardinales, puntos laterales, puntos colaterales.
Tiempo de erupción	horas (hr/hrs)
Intensidad	adimensional
Magnitud	adimensional
Índice de Explosividad Volcánico (IEV)	adimensional
Carga de colapso (Q _{mean})	kilopascal (kPa)

1.10. Tipo y Diseño de Investigación

El tipo de investigación es descriptiva y analítica con el fin de describir las características observadas y medibles (Tabla 6.) para luego analizar las variables.

Tabla 6

Características observadas y medibles del estudio

	CARACTERÍSTICAS OBSERVADAS	CARACTERÍSTICAS MEDIBLES

CAMPO	Sedimentología, petrología y mineralogía de tefra y líticos dentro de la capa del depósito de caída de interés. (detallada de la caída de interés y resumida de otros depósitos)	Espesor de los depósitos en los afloramientos (cortes de quebrada o carretera) y capas intermedias
	Identificación y descripción de los depósitos (caídas, lahares, CDP, ceniza, otros depósitos) que superponen o subyacen el depósito de interés, teniendo como depósitos guía las caídas “2 ka”, “Rosada”, “Autopista”, “Fibroso” y “Sacarosa” principalmente.	Tamaño del eje mayor de los 5 máximos pómez y 5 máximos líticos de la caída de interés.
	Descripción de las capas ubicadas entre depósitos (depósitos de caída retrabajada, paleosuelo)	
GABINETE		Tamaño de grano, análisis granulométrico por el método del cribado (tamizado) en muestra completa del depósito de caída de interés.
		Proporción de cristales, análisis petro-minerográfico en secciones delgadas de fragmentos de tefra de las caídas de interés.
		Composición geoquímica, mediante análisis de roca total en laboratorio del INGEMMET.

El diseño de la investigación, según el propósito del estudio, es observacional y según la cronología es prospectiva transversal.

Los resultados de los datos analizados diferencian y caracterizan cada depósito, completan parte de la geología y describen la dinámica eruptiva del volcán Misti. Además, se evaluó los peligros por caída de tefra de igual magnitud e intensidad a las erupciones ligadas a los depósitos “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”, el cual afectaría principalmente a la ciudad de Arequipa.

1.11. Población y Muestra

La población corresponde a los depósitos de caída de lapilli de tefra del volcán Misti. Las muestras son las caídas piroclásticas “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”, los cuales conforman el edificio volcánico Misti 4. Individualmente cada depósito contiene pómez y/o escoria, líticos y cenizas. Los depósitos asociados se emplazan en un radio de ~15 km en los alrededores del volcán Misti en cortes de carretera y quebradas.

1.12. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La recolección de datos tiene etapas en las cuales se emplean diferentes técnicas e instrumentos de acorde a cada uno de ellas como se ve en la [Tabla 7](#).

Tabla 7

Técnicas, instrumentos y materiales de recolección de datos para el estudio de tefras

Gabinete	Campo	Gabinete	
-----------------	--------------	-----------------	--

Técnicas	Revisión de antecedentes, bases teóricas, boletines, libros, mapas, imágenes DEM, etc.	Reconocimiento de depósitos guía: "Autopista", "Rosado" y "2 ka" (radio hacia el SW del cráter del volcán Misti de ~15 km) en zonas potenciales (cortes de carretera y quebradas).	Preparación y envío de muestras para sección delgada, geoquímica y datación (si hubiese).	<p>Cumplimiento de objetivos del estudio.</p> <p>Redacción, presentación, publicación y sustentación de la tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo.</p>
Materiales e Instrumentos	Google Earth Pro, ArcGIS 10.6.1, GEOCATMIN, bibliotecas virtuales.	Mapa de Ubicación, mapa geológico, mapa estructural, mapa geomorfológico, pala, rascador, lupa (20x), GPS, cámara, libreta, flexómetro, bolsas, rotulador, cinta, papel.	Microscopio de luz polarizada, microscopio binocular, diagramas geoquímicos de clasificación, tamices o "sieves", balanza electrónica, diagramas estadísticos y granulométricos, ArcGIS 10.6.1, ASH3D, AshCalc.	
Técnicas	Elaboración de mapas de pre-campo, mapa de ubicación y acceso.	Identificación y descripción detallada de los depósitos del "Sandwich Inferior" y "Sandwich Superior" (datos importantes: espesor, MP, ML, características mineralógicas, proporción de pómez-escoria-líticos).	Elaboración de mapas de isópacas e isópletas, columnas tefro-estratigráficas, correlación tefro-estratigráfica, análisis granulométrico, análisis geoquímico, análisis petrominerográfico, determinación de parámetros eruptivos, modelamiento eruptivo y elaboración de mapa de peligros por caída de tefras.	
		Toma de puntos GPS de cada afloramiento, bosquejo de columnas estratigráficas, toma de muestras (bulk, pómez, escoria, leña o carbón) y fotos.	Compilación de datos para la interpretación y discusión de las erupciones del "Sandwich Inferior" y "Sandwich Superior".	
<p>Nota: Selección de 5 máximos pómez y/o escoria (MP) y 5 máximos líticos (ML) de las capas de los depósitos del "Sandwich" en un largo de aproximadamente de 1 metro, de los cuales se mide los 3 ejes mayores perpendiculares de cada uno y se apunta en la libreta.</p>				

Algunas consideraciones son: muestras para geoquímica (en caso no haya alteración ni estén retrabajadas) solo de pómez y/o escoria (no líticos) de un peso de 100 gr como mínimo, muestras para análisis granulométrico (tomadas de la parte del depósito que no esté retrabajada, no subredondeadas) de un peso de 2 kg en promedio del depósito completo (tomar la muestra de todo el espesor), para datación radiométrica por ¹⁴C se toma un carbón o trozo de leña bien preservado en el depósito o suelo debajo del depósito de interés. Cada muestra se toma siguiendo un procedimiento y previniendo la alteración por medios externos, se codifica claramente y se embala.

Los microscopios utilizados fueron: binocular de luz polariza LABOMED – LX400P y su cámara para ordenador LABOMED-ivu5000. Los métodos geoquímicos usados fueron: Inductively Coupled Plasma Optical Emisión Spectrometry (ICP-OES) e Ionic Polymer Metal Composites (IPMCs) en laboratorios del INGEMMET. Todos

los procedimientos de gabinete se realizaron en las instalaciones y laboratorios del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (Arequipa).

2. Generalidades

2.1. Ubicación y Acceso

Ubicación

Los depósitos de estudio “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” pertenecen al volcán Misti, estos se ubican en un área semielíptica triangular con un eje mayor (~19 km) en dirección NE a SW, el cráter del volcán se ubica cerca al extremo NE del área elíptica como se observa en la [Figura 6](#). Los afloramientos de los depósitos de caída piroclástica “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” se ubican en cortes de carretera, nacientes y partes intermedias de las quebradas: El Peral, Pastores, San Lázaro, Huarangueros, Huarangal, Barranco y Agua Salada.

El volcán Misti es parte de la Zona Volcánica Central (ZVC) del arco andino y está situada a unos 55 km de la corteza cerca del límite norte de la Zona Volcánica Central ([Barazangi and Isacks, 1976](#); [De Silva and Francis, 1991](#); [Stern, 2004](#)) como se observa en la [Figura 5](#). Su edificio volcánico se emplazó en el borde oeste de la Cordillera Occidental de los Andes, limitando por el sureste con el estratovolcán extinto Pichu, por el noroeste con el complejo volcánico Chachani, hacia el norte y este con la altiplanicie Puna y por el suroeste con la cuenca sedimentaria de Arequipa, donde se halla la ciudad del mismo nombre. El área de estudio se estimó en 700 km² y su centro eruptivo es el volcán Misti.

El cráter del volcán Misti (242900 E, 8196400 S, 5,820 msnm) dista ~17 km del centro de la ciudad de Arequipa. Nuevos asentamientos humanos situados al noreste y norte de la ciudad, en los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Paucarpata, Mariano Melgar y Chiguata se hallan a menos de 12 km del centro de emisión. La diferencia altimétrica entre los distritos de la provincia de Arequipa y la cima del volcán es de ~3.4 km aproximadamente.

Acceso

Los afloramientos de depósitos del “Sandwich” son de fácil acceso principalmente por vías de mantenimiento de torres de alta tensión, caminos de herradura, carreteras sin asfaltar usadas para realizar actividades turísticas al Misti, carretera 34A (Yanahuara - Aguada Blanca) y carretera 34C (Yanahuara – Chiguata). El recorrido en ruta es alrededor de 5 km a 15 km, todas estas rutas ocupan el sector SW del volcán Misti como se observa en la [Figura 6](#).

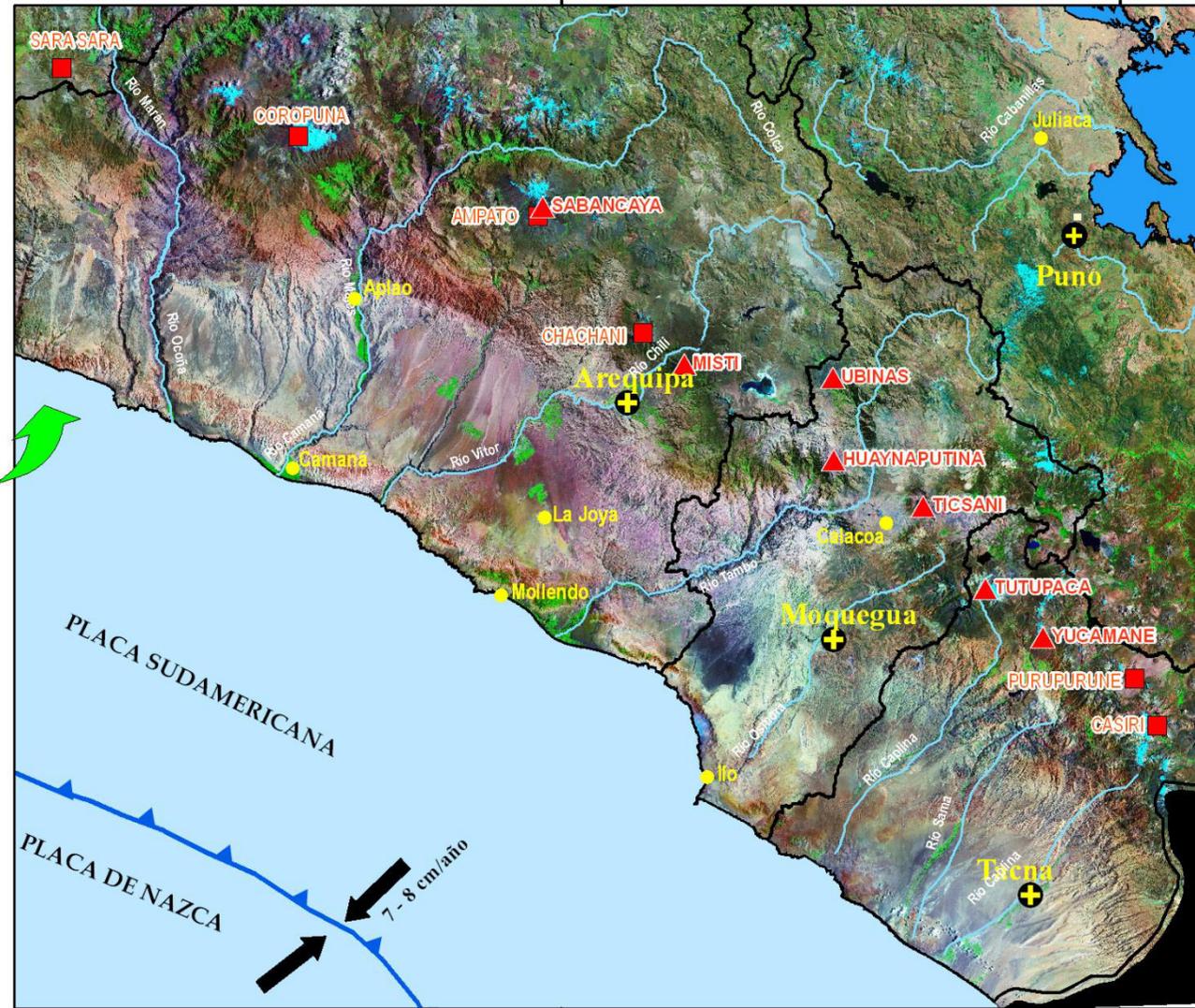
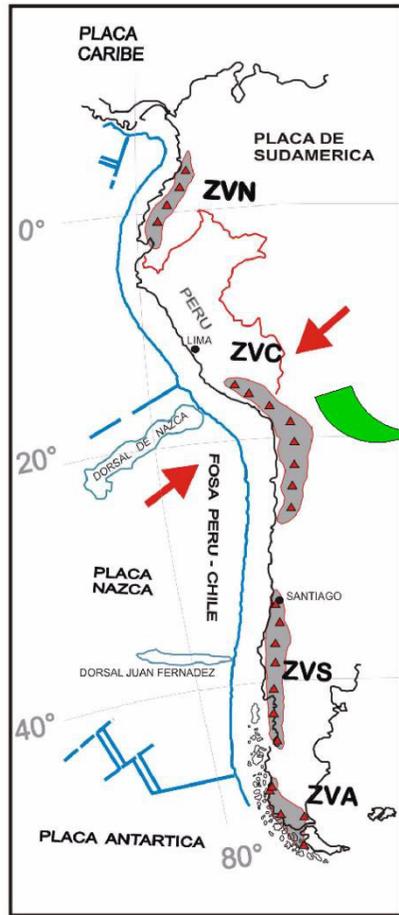


Figura 5
 Mapa de ubicación del volcán Misti y la Zona Volcánica de los Andes Centrales

■ Volcanes potencialmente activos
▲ Volcanes activos

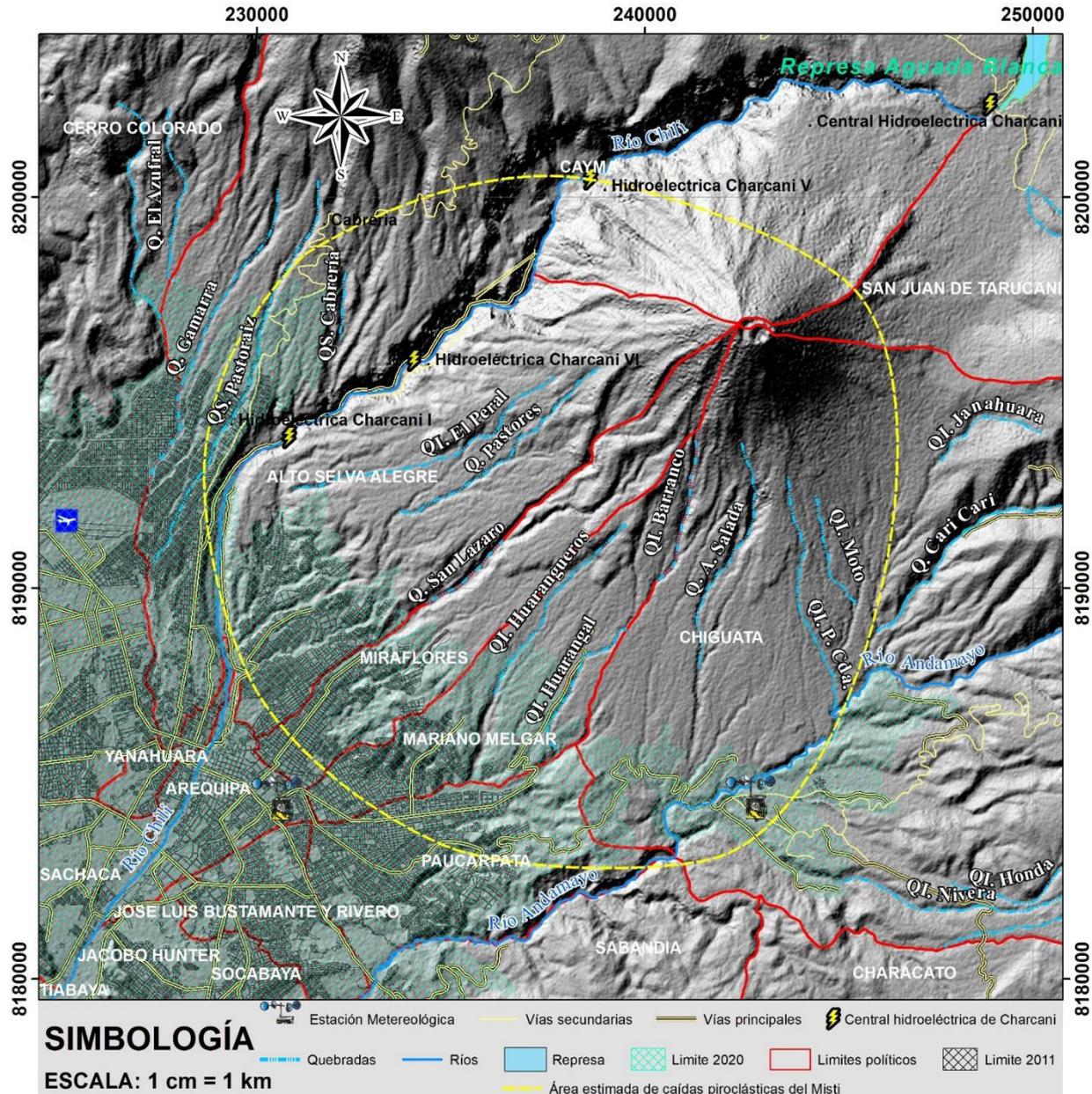


Figura 6

Mapa del área de estudio para los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

Nota: Muestra las principales quebradas que nacen del volcán Misti, vías principales y secundarias de acceso, área poblada, principales infraestructuras y en línea entrecortadas amarilla el área estimada de la mayor parte de caídas piroclásticas del volcán Misti; sobre una imagen DEM (resolución mínima de 12.5 metros) obtenida de la página de la NASA, <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/terrain-corrected-rtc/>.

2.2. Población

La población estimada que abarca nuestra área de estudio se ha definido en base a los distritos en donde se han encontrado los depósitos del “Sandwich Inferior” (SI) y “Sandwich Superior” (SS) como se ve en la [Tabla 8](#), por tal el alcance de la erupción con potencial peligro se ha determinado en un rango de ~6 a ~16 km (isópaca de 8 y 30 cm) para el “Sandwich Superior” y de ~5 a 15 km (isópaca de 8 y 60 cm) para el “Sandwich Inferior”, desde el cráter del volcán Misti. Estas áreas en donde se encuentran los depósitos del “Sandwich” son similares a la base de estudios de erupciones del Misti que depositaron los depósitos de caída de tefra: “Autopista” ([Cacya, 2006](#)), “2 Ka” ([Harpel, 2011](#)) y “Sacarosa” ([Cuno, 2019](#)).

La población de estos distritos ([Tabla 8](#)) está estimada de acuerdo al análisis del área elíptica de los mapas de isópacas e isópletas ([Fig. 7.1.2.1.](#) y [7.1.5.1.](#); capítulo 7) de los depósitos del SI y SS, así como de estudios de caída de tefra anteriores.

Tabla 8

Datos de población y distritos que hubieran sido afectados si erupciones similares a las que depositaron el “Sandwich”, hubieran ocurrido en la actualidad

DISTRITOS PRINCIPALMENTE AFECTADOS	TOTAL (personas)	POBLACIÓN	
		URBANA	RURAL
Distrito Alto Selva Alegre	85 870	85 870	
Distrito Cayma	91 935	91 922	13
Distrito Chiguata	2 498	1 907	591
Distrito Mariano Melgar	59 918	59 918	
Distrito Miraflores	60 589	60 589	
Distrito Paucarpata	105 077	105 077	
TOTAL	405 887	405 283	604

Nota: Sus depósitos encontrados en las inmediaciones tienen alrededor de ~8 cm de espesor. Datos extraídos del censo del 2017 (INEI, <https://www1.inei.gob.pe/>), análisis según los mapas de isópacas y ubicación.

Es necesario tener en cuenta que la población real afectada por una erupción similar a la que origino los depósitos del “Sandwich” vendría a ser la totalidad y no la proporción que se ha estimado en esta tesis de los 6 distritos mencionados en la [Tabla 8](#); y más aún otros distritos, provincias, regiones e incluso países como se ve en el Capítulo VIII.

El crecimiento de esta población a través de los años se ve reflejado en el [Anexo 1](#), el cual muestra claramente que seguirá creciendo y asentándose cada vez más próximos al Misti, llegando a estar así en una zona de alto peligro, que en caso de una erupción generaría consecuencias desastrosas.

2.3. Clima

El clima posee una diversidad de parámetros como: temperatura (máxima diaria, mínima diaria, media mensual), humedad relativa, presión, etc.; sin embargo, para el estudio de depósitos de caída de tefra solo se toman en cuenta: dirección del viento, velocidad del viento y precipitaciones. Los dos primeros son los involucrados en el transporte y dispersión de los depósitos, y en el caso de las precipitaciones al mezclarse con los gases de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno pueden causar lluvias ácidas.

Los datos usados provienen de registros de estaciones meteorológicas del SENAMHI, estos deben tener por lo menos 10 años de base de datos (si es posible) para obtener un análisis estadístico confiable. Para el área de estudio de los depósitos “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” se tienen 3 estaciones meteorológicas próximas al Misti que reflejan variaciones climáticas de acuerdo al área de estudio, la ciudad de Arequipa y las partes altas del volcán Misti, por lo cual en el [Anexo IV](#) se tiene un resumen de los datos climatológicos históricos para los tres mencionados. De las tres estaciones, la estación Chiguata es la más importante por encontrarse más próxima al cráter del Misti y por reflejar el clima que va a influenciar en la dispersión de la columna eruptiva en caso de una erupción del Misti, por tal a continuación y en la [Tabla 9](#) se tiene un resumen de los datos históricos de procesados del SENAMHI.

Clima para el Área de Estudio y/o sus Alrededores

Estación “Chiguata” (latitud: 16°24’23.21” S, longitud: 71°24’33.8” O y altitud: 2902 msnm), es la segunda estación más cercana al centro de la ciudad de Arequipa y a las quebradas y abanicos volcanoclásticos al SW del Misti, registra datos que reflejan el clima común que vamos a encontrar en la zona de estudio. Según un consolidado del año 2008 al 2017 ([Anexo IV](#)), la dirección del viento predominante es al SW (2017 – 2018; [Anexo IV](#) y [Tabla 9](#)) casi todo el año (NW en los meses de setiembre 2018, octubre 2018 y diciembre 2017 - 2018) en los años recientes, y al W en los años 2013 al 2016. Las velocidades de viento mínimas son 3.13 m/s y máximas 11.90 3.13 m/s con un promedio de 6.27 m/s (según los registros del 2014 – 2018), estas velocidades se han ido incrementando en los años 2017 – 2018. Del 2019 al 2021 solo se tienen registros de precipitación publicados por el SENAMHI en su página web.

Tabla 9

Resumen de datos mensuales y anuales (2018 - 2021) de la estación meteorológica Chiguata (precipitación, dirección de viento y velocidad de viento)

ESTACIÓN CHIGUATA

2018		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)	7	18.30	19.10	10.70	1.40	0.00	0.20	0.70	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
	19	31.80	49.80	32.70	0.50	0.00	0.00	2.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D. DEL VIENTO 13H		SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	NW	NW	SW	NW
V. DEL VIENTO 13H (m/s)		8.06	7.71	7.48	7.38	7.74	7.20	6.69	7.29	7.60	8.00	7.53	8.65
2019		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)		152.2	146.7	25.9	0	0	0	0	0	0	0.7	0	11.8
2020		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)		139.5	174.8	119	0	0	0	0	0	0	0.2	0	50
2021		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)		35.4	19.4	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.

GLOSARIO: S.D.: sin datos; NW: nor oeste; SW: sur oeste; W: oeste; D.: dirección; V.: velocidad; P: precipitación; H: horas; 7: a las 7 horas; 19: a las 19 horas; C: error desconocido.

Nota: Se observa que la dirección predominante es al SW. Base de datos extraído del SENAMHI (<https://web2.senamhi.gob.pe/?p=data-historica>).

3. Geología, Estratigrafía, Tectónica y Tefroestratigrafía

3.1. Geomorfología

La geomorfología del volcán Misti y sus alrededores ha sido actualizada de las ya provistas como en los estudios de Mariño et al. (2016), en base a imágenes satelitales y trabajos de campo de este estudio. De esto se tiene 14 unidades geomorfológicas principales como se observa en la [Figura 10](#), las cuales se han descrito en la [Tabla 10](#) a continuación.

Tabla 10

Descripción de las unidades geomorfológicas relacionadas a depósitos piroclásticos de los volcanes Misti, Chachani y Pichu Pichu

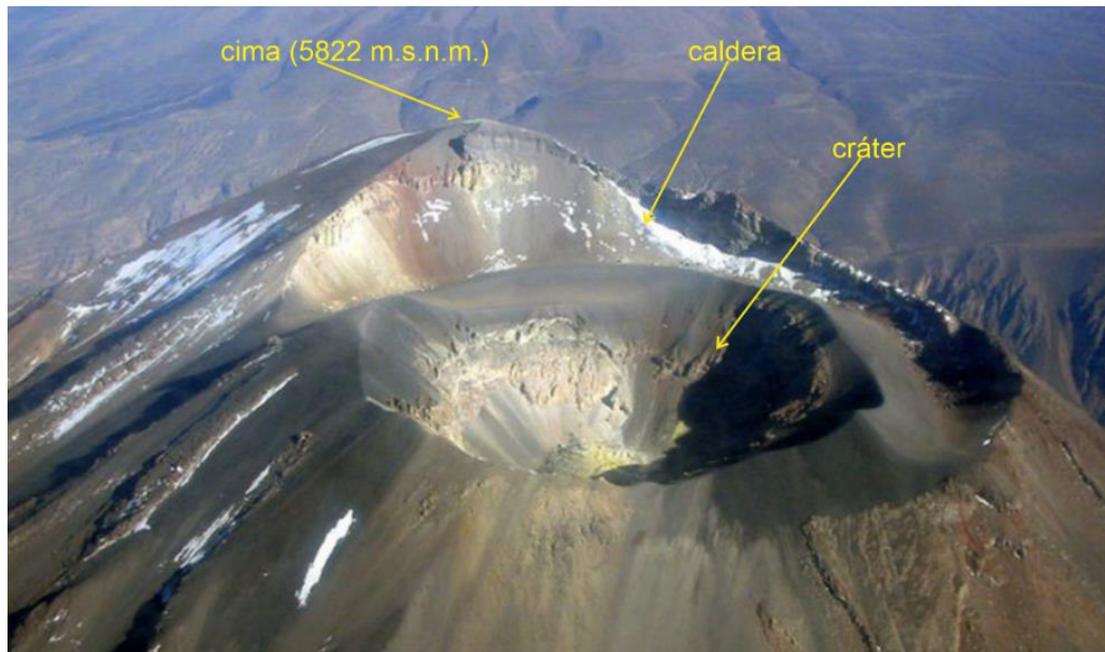
Unidad Geomorfológica	Abreviatura	Origen	Dimensiones	Pendientes
Cañón del Río Chili	Cañ	Erosión del río Chili labrada en una secuencia volcanoclástica procedente de los volcanes Misti, Chachani y rocas sedimentarias marinas del Grupo Yura.	El cañón inicia cerca de la represa Aguada Blanca (a 3700 msnm) y se ubica entre los volcanes Misti y Chachani. Posee una profundidad que va de 150 a 400 m en sus tramos iniciales y finales, y más de 2600 m en su parte media. En las zonas más estrechas el cañón tiene menos de 30 m de ancho (según Mariño et al.; 2016).	Las márgenes del cañón presentan pendientes muy empinadas que van de 35° a 75°
Llanura de inundación	Llan_in	Formada por terrazas originadas por el emplazamiento de lahares ocurridos en el Holoceno y durante las épocas históricas, en su gran mayoría.	En la parte inicial (cercanías de Charcani II), es un valle angosto de 500 m de ancho y 150 m de profundidad. La parte media (Figura 8), abarca el borde oeste del distrito de Arequipa, donde se tiene un valle un poco más amplio de ~25 m de profundidad. En la parte baja (borde E de los distritos de Sachaca y Tiabaya) es angosta (~250 m de ancho) y más profunda.	En la parte inicial hasta 20°, parte intermedia y final ~10°.
Abanico aluvial	Aba_al	Formado por acumulación de materiales volcanoclásticos principalmente, como consecuencia de la pérdida de encajamiento de los canales del sistema aluvial.	El abanico aluvial se extiende por casi toda la parte urbana de la ciudad de Arequipa en la actualidad (Figura 8). El borde norte inicia por el Aeropuerto Rodríguez Ballón, Zamacola (finalizando la quebrada Pastoraíz), Chilina, quebrada Pastores, quebrada San Lázaro y quebrada Huarangal.	La pendiente es moderada de 20° en promedio.
Laderas y colinas	Lad_col_av	Formado del desprendimiento de avalanchas de escombros del complejo volcánico del Pichu Pichu las cuales han cubierto parcialmente sus laderas y las colinas a sus alrededores.	Bordea al complejo volcánico del Pichu Pichu, al pie de sus coladas de lava y su ladera volcánica. Las colinas muestran formas de Hummocks (morfología de montículos, presentes en depósitos de avalanchas de escombros) estas están asociadas a la presencia de megabloques. La unidad geomorfológica "laderas y colinas" se presenta de forma conjunta en toda su extensión.	

Laderas	Lad_v	Formado por lavas cubiertas por depósitos volcanoclásticos y sedimentos epiclásticos	La extensión bordea las laderas de los volcanes probablemente del Plioceno o más antiguos situados al este del Misti y al NNW del PichuPichu.	Moderadas a altas (30° a 60°), apariencia de un relieve suave pero empinado (por la erosión).
Altiplanicie	Alt_pl	Meseta intermontana formada por depósitos de caída de tefras del Holoceno (probablemente del Misti) y los depósitos de Chiguata (cuadrángulo de Characato, 33t4).	Se extiende al norte y NE del volcán Misti y Chachani, cerca de la represa Aguada Blanca y la central hidroeléctrica de Charcani. Está a una altura de 3800 a 4300 m.s.n.m., y es atravesada por el río Chili.	Pendientes bajas (~10°)
Zona de montañas	Mont	Formado por los edificios volcánicos pertenecientes al Complejo Volcánico del Chachani.	La zona de montañas se encuentra entre los 3800 a 5800 m.s.n.m. En los edificios volcánicos (El Rodado, La Horqueta, Chachani, Estribo, El Ángel, domo de lava del Volcancillo, Chingana y Nocarane) se distinguen 7 cimas y 2 cráteres divididos por geoformas glaciares como circos y morrenas.	Pendientes moderadas a fuertes (40° a 60°).
Domos	Doms	Formado por domos con superficie ondulada pertenecientes al complejo volcánico Chachani.	Se encuentran al NE del aeropuerto de Arequipa formando cerros de hasta 500 m de altura, de los cuales nacen pequeñas quebradas. Forget (2004) ha identificado 12 domos que poseen entre 100 y 400 m de diámetro, con paredes de hasta 200 m de alto.	Pendientes moderadas a fuertes (30° a 50°),
Coladas de lava	Co_la	Formado principalmente por flujos de lava, cubiertos por depósitos de caída de tefra y sedimentos epiclásticos.	Se extienden en los alrededores del Misti, Chachani y PichuPichu. En las cercanías al aeropuerto de Arequipa se ve superficies abigarradas (lavas más jóvenes del Complejo Volcánico del Chachani). En el lado del Misti se encuentran formando el cono volcánico llegando a tener gran extensión por el lado SW hasta cercanías de Charcani VI y al SSE del Misti por la quebrada San Lázaro (Figura 9).	Moderadas (próximos al cono volcánico) de 20 a 40° y atravesadas por las nacientes de las principales quebradas San Lázaro, Huarangal y Pastores.
Cono volcánico	Con_v	Formado por la estructura del edificio volcánico del Misti. Hacia el sur de su cumbre se infiere una zona de colapso (Fig. 5.1.15.).	Se encuentra desde los 4000 m.s.n.m. hasta los 5800 m.s.n.m. En su parte más alta tiene una cumbre de la cual al lado NOO se ve una cicatriz de colapso (Figura 9). El Misti muestra una morfología simétrica por su lado SO (Figura 9) y casi simétrica por sus otros lados.	Tiene una pendiente fuerte (~60°) y tiende a ser más vertical en la parte más alta.

Morrenas	Mo	Formados por periodos de desglaciación en dos generaciones de morrenas (Mariño et al., 2016) del Complejo Volcánico del Chachani.	Se encuentran de 1 a 2 km de la cima de los estratos volcánicos del Chachani. Las morrenas del Pleistoceno están distribuidas al pie de los lados sur y norte del Chachani y son más voluminosas que las morrenas holocénicas distribuidas al pie del lado sur y SE de los volcanes Nocarane y Chingana (según Mariño et al., 2016).	
Lomas y colinas	Lom_y_col_av	Formada por depósitos de avalanchas de escombros del volcán Misti y el complejo volcánico Pichu Pichu.	Se extiende al sur del Misti y SO del complejo volcánico del Pichu Pichu. Algunas de estas lomas y colinas están siendo pobladas, principalmente al noreste y sur de Paucarpata.	Pendiente moderada y están cortadas por quebradas de ~125 m de profundidad.
Ladera de baja pendiente de acumulación	Lad_bp_ac	Formado por potentes secuencias de depósitos volcanoclásticos, sedimentos piroclásticos y epiclásticos de los volcanes Misti y Chachani.	Se extiende al pie del lado sur del volcán Misti y el Complejo Volcánico Chachani (Figura 8).	Bajas de ~10° de inclinación y está cortada por quebradas que tienen ~75 m de profundidad y hasta ~100 m de ancho.
Cumbre	Cum	Formado por la parte más alta del cono volcánico del Misti (cima a 5822 m.s.n.m.), en la cual se tiene dos cráteres formados por erupciones históricas ("2 ka" y "Siglo XV").	Posee un cráter elongado (Figura 7) en dirección SE-NO dentro del cual (extremo SE) se emplaza un pequeño cono intracratérico cortado por un segundo cráter. En el segundo cráter se emplaza un domo de lava de 100 m de diámetro (según Mariño et al., 2016).	

Figura 7

Vista aérea de la cumbre, la caldera, el cráter y la cima del Misti



Nota: Foto tomada del diario Regional Sin Fronteras (<http://www.diariosinfronteras.pe/2016/01/25/especialistas-de-la-uns-a-inspeccionaran-crater-del-misti/>) el 25-01-16.

Figura 8

Parte intermedia de la llanura de inundación, atravesado por el río Chili



Nota: Se ve la ladera de baja pendiente de acumulación (ld_bp_ac) y el abánico aluvial sobre el cual yace la ciudad de Arequipa. Foto tomada desde el mirador Carmen Alto.

Figura 9

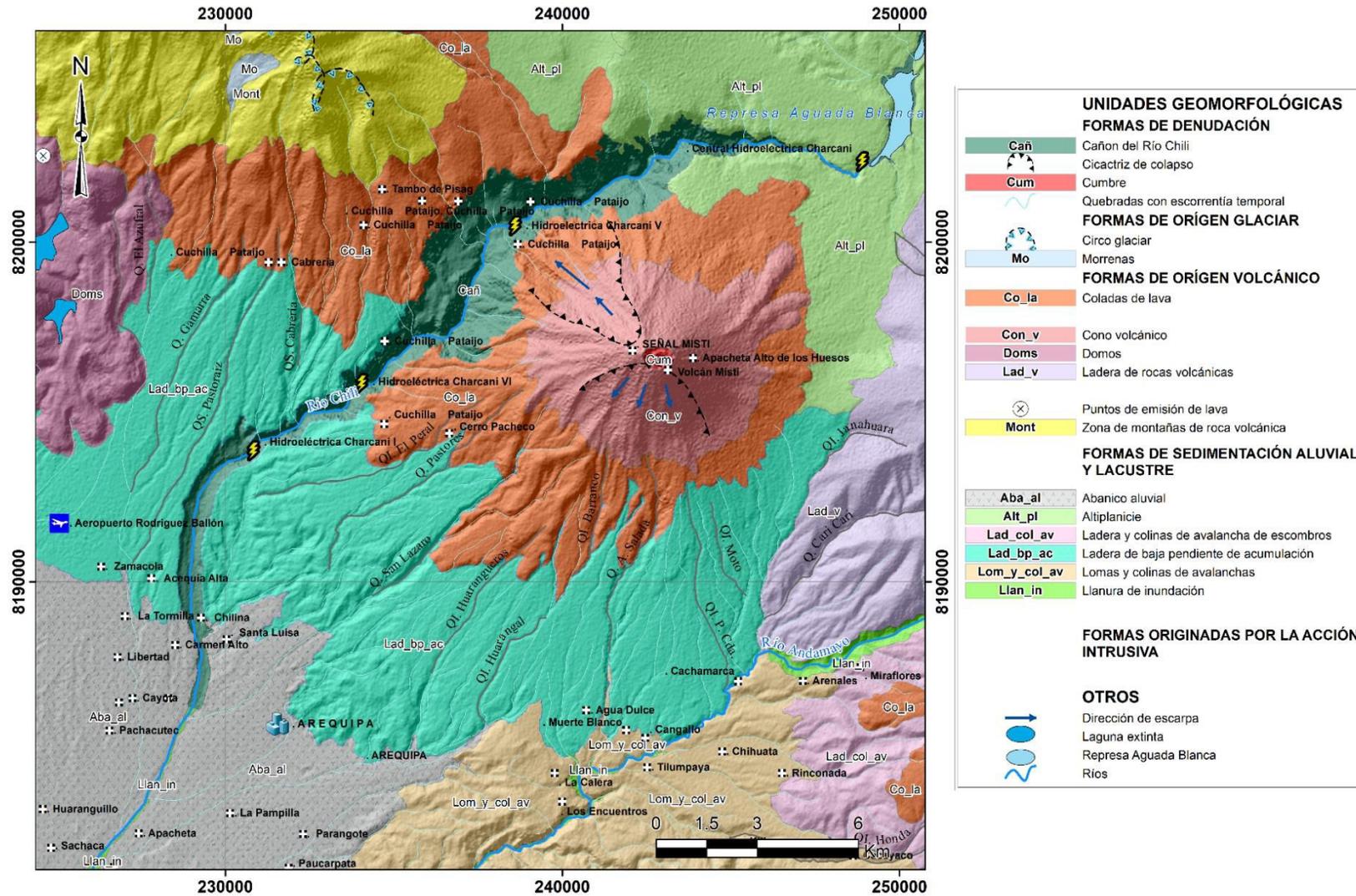
Tres fotos de coladas de lava de los volcanes Misti y Chachani



Nota: a. y b. Flujos de lava del Misti cubiertos por depósitos de tefra y suelo actual.
 c. Edificios del Misti 1, 2, 3 y 4. Foto tomada a 8.5 km al oeste del Misti.

Figura 10

Mapa geomorfológico que involucra los volcanes Misti, Complejo Volcánico Chachani y Complejo Volcánico PichuPichu



Nota: Se han identificado 14 unidades geomorfológicas principales y 4 secundarias a través de imágenes satelitales del Google Earth Pro y el mapa geomorfológico del Boletín 60 INGEMMET (Mariño et al., 2016).

3.2. Estratigrafía

La estratigráfica que involucra el área de estudio se resume a continuación. Además, en la [Tabla 11](#) se tienen las principales características de los grupos, formaciones y unidades mencionadas en los resúmenes. Finalmente, se tiene fotos con algunos afloramientos característicos ([Figura 11](#), [Figura 12](#) y [Figura 13](#)), columnas estratigráficas en base a la recopilación de los estudios de Mariño et al. (2016), los trabajos de campo de este estudio ([Figura 14](#) y [Figura 15](#)) y el mapa geológico de Mariño et al. (2016) en la [Figura 16](#).

3.2.1. Estratigrafía Regional

El área de estudio se enmarca dentro de la región sur del Perú, en donde las rocas más antiguas lo conforman rocas metamórficas del Proterozoico (Gneis de Charcani), rocas sedimentarias de origen marino del Jurásico Inferior (Formación Chocolate), Jurásico Medio (Formación Socosani), Jurásico Superior y Cretáceo Inferior (Grupo Yura), rocas intrusivas del Cretáceo Superior (Batolito de La Caldera) y Paleoceno (Batolito de la Costa), ignimbritas y flujos de lava del Neógeno (Grupo Barroso) y depósitos de avalanchas de escombros del Pleistoceno (volcán Pichu Pichu).

3.2.2. Estratigrafía Local (Pre Misti)

Corresponde a los depósitos sobre los cuales se ha formado el estrato volcán Misti, conformado principalmente por depósitos volcánicos de ignimbritas (flujos piroclásticos). En resumen, el área de Arequipa alberga depósitos que registran tres ignimbritas de gran volumen y tobas (tufos) de pequeño volumen (cuaternarios) que se intercalan con flujos de lava y depósitos volcánicos producto de erupciones de los estratovolcanes en el área.

Los tres impulsos ignimbríticos principales produjeron las Ignimbritas: Río Chili (IRC) ca. 13.07–13.39 Ma, La Joya (ILJ) ca. 4.78–4.89 Ma, y Aeropuerto de Arequipa (IAA) ca. 1.65 Ma. Los Tufos Yura (TY) y los depósitos del Capillune fueron producidos por los primeros volcanes del Cuaternario o por grandes fuentes de ventilación en la zona norte del complejo volcánico de Chachani ([Paquereau, 2006](#)).

3.2.3. Tefro-estratigrafía del Volcán Misti

El Misti es un volcán compuesto típico de 4 edificios superpuestos en una morfología cóncava hacia arriba y un gran abanico volcanoclástico ([Davidson y de Silva, 2000](#)).

En resumen, los edificios están compuestos por flujos de lava entremezclados y escombros piroclásticos construidos sobre una plataforma de flujos de lava gruesos ([Jenks, 1945](#); [Thouret et al., 2001](#)). El abanico volcanoclástico está hecho de flujos

piroclásticos entremezclados, caídas de tefra y lahar sobre depósitos de lava y de avalancha de escombros ([Mariño et al., 2016](#)).

La división más usada del Misti ([Thouret et al., 2001](#)) lo divide en: un **estratovolcán** erosionado denominado “Misti 1”, parcialmente superpuesto por **edificios de estratoconos** prístinos denominados “Misti 2”, “Misti 3” y “Misti 4”. Estos edificios han sido construidos sobre el sedimento volcanoclástico pre-Misti que superpone con una inconformidad a las ignimbritas riódacíticas no soldadas, incorrectamente denominadas “sillars” ([Barker, 1996](#)).

En la [Tabla 11](#) se tiene un resumen de la estratigrafía regional, local y la tefroestratigrafía del volcán Misti.

Figura 11

Secuencia estratigráfica pre Misti cerca de Charcani V (base Gneis Charcani)



Nota: La base lo conforma el gneis de Charcani, roca granítica de color crema. Foto tomada por R. Aguilar.

Figura 12

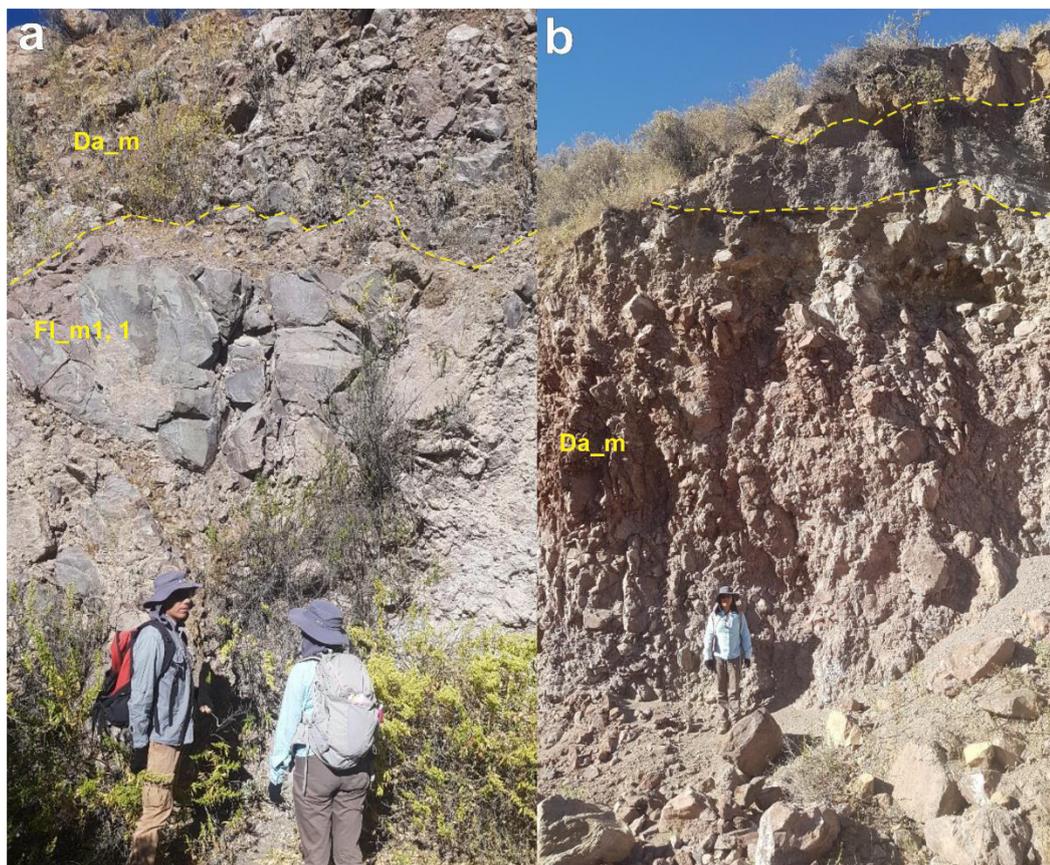
Tres fotos de: Afloramiento, extracción y muestra de mano de la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa (IAA) en la cantera Añashuayco



Nota: a. Se observa las dos unidades de la ignimbrita del aeropuerto.

Figura 13

Dos fotos de los flujos de lava (FI_m1,1) del volcán Misti



Nota: a. Flujos de lava en bloques (FI_m1,1) bajo depósitos de avalancha de escombros (Da-m) del Misti. b. Depósitos de avalancha de escombros del Misti cubierto por dos depósitos aluviales. Fotos tomadas a 11.5 km al SO del Misti por el distrito de Alto Selva Alegre.

Tabla 11

Resumen de la estratigrafía regional, local y del volcán Misti asociada al estudio de depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”.

ESTRATIGRAFÍA		EDAD	CARACTERÍSTICAS	AFLORAMIENTOS	CORRELACIÓN
REGIONAL	Gneis de Charcani	679 ± 12 Ma (K/Ar por Stewart et al., 1974; 25 km al SW del Misti en Tiabaya) y 1012 - 991 Ma (Torres et al., 2008).	Gneis granítico de color gris oscuro con tonalidades cremas y verde claro, de grano medio a grueso. Presenta estructuras de bandeamiento, de bandas claras rosadas y bandas oscuras verdosas (Kosaka, 2000).	Cañón del Chili (~10 km al SW del cráter del Misti), muy cerca a la hidroeléctrica de Charcani (Figura 11).	Subyace a la Formación Torán (Devónico) en el valle de Majes, en el cuadrángulo de Characato se encuentra bajo el volcánico Sencca cerca de la hidroeléctrica de Charcani y próximo a Mollebaya.
	Formación Chocolate	Jurásico Inferior, 185-200 Ma	Secuencia de rocas volcánica-sedimentaria compuesta por derrames de andesita, basalto, traquitas, tufos y aglomerados con algunas intercalaciones de lutitas, cuarcitas, calizas y calcáreos. Tiene espesores de 900 a 1500 m (Westermann & Riccardi, 1985; Palacios et al., 1995). Cerca de su tope tiene niveles de calizas (casualmente con ammonites sinemurianos).	Norte del valle Tambo y a lo largo de toda la cuenca Arequipa. Al Oeste del Cerro Nicholson sobreyaciendo los gneis de Charcani (Jenks, 1948).	La Formación Chocolate subyace con una discontinuidad a carbonatos de edad Liásico Superior (Vicente, 1981). Aflora al N y NE de Cerro Verde (30 km al SW del Misti), infrayaciendo en discordancia erosional a la Formación Socosani.
	Formación Socosani	Jurásico Medio – Inferior, 150-170 Ma. Toarciano Superior hasta el Bajoniano medio (Benavides. 1962).	Constituida principalmente por sedimentos calcáreos de calizas grises azulinas, lutitas con intercalaciones de areniscas y sedimentos volcanoclásticos hacia su base.	En Socosani (estratotipo). Entre las carreteras de variante de Uchumayo y Panamericana Sur (Jenks, 1948). En el cauce del río Chili (2800 m.s.n.m.).	Sobreyace a la Formación Chocolate (Cerro Nicholson a 10 km al NW de Cerro Verde) y soporta al Grupo Yura con discordancia erosional en ambos casos (Vargas, 1970).

LOCAL	PRE-MISTI	Grupo Yura	Secuencia sedimentaria de areniscas, lutitas, cuarcitas y niveles de calizas, dividido en cinco miembros: Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani (Benavides, 1962). El grosor total del grupo Yura ha sido estimado, en el sector noroccidental de la represa El Frayle, en 2,900 m.	Principalmente aflora al SW de Yura Viejo (~33 km al oeste del volcán Misti).	Al sur de los tajos Cerro Verde y Santa Rosa en contacto con el Gneis Charcani y con algunos intrusivos del Terciario; hacia el Norte de Cerro Verde en contacto con el Chocolate, Gneis Charcani y la granodiorita Yarabamba (Mango Ticona, 2017).	
		Grupo Tacaza.	Dataciones radiométricas de 30.21 ±0.73 a 20.0 ±1.0 Ma. (Lagunillas – Puno) según Wasteneys (1990). En sectores de Orcopampa – Arequipa, Noble (1972) reporta edades entre 19.5 y 18.9 Ma (método K/Ar).	Constituido por paquetes aglomerados o brechas de tobas que tienen una matriz de ceniza fina poco consolidada, con intercalaciones de lavas andesíticas, que alternan con areniscas tobáceas según Palacios (1994). Vargas (1970) la divide en tres unidades: Inferior sedimentaria, Media tufácea (más gruesa y de mayor distribución) y Superior lávica. Alcanza una potencia aproximada de 3600 m (Acosta et al., 2011).	Mina Tacaza (aflo. Tipo). Ocupa un área extensa del cuadrángulo de Arequipa entre el río Yura y el borde oriental de la formación Huanca, Se extiende considerablemente hacia el este al ámbito de la Cordillera Oriental llegando al lago Titicaca y Cusco (Vargas, 1970).	Yace sobre la Formación Huanca y formaciones mesozoicas e infrayace al volcánico Sencca (en ambos casos en discordancia angular) (Vargas, 1970). En el valle del río Chili tiene lavas y depósitos de aglomerados sobreyaciendo cuarcitas del Grupo Yura (Rivera et al., 2010). Se extiende hacia al Oeste en áreas aisladas cubriendo las formaciones mesozoicas y algunas partes del Complejo Basal (Newell, 1949).
		Ignimbrita Río Chili (IRC)	Dataciones de 13.39 ± 0.1 y 13.12 ± 0.05 Ma (40Ar–39Ar; Paquereau, 2006).	Se compone de toba de lapilli masivo (Figura 11) rico en cristales, pómez y fragmentos de vidrio (<65%), cristales libres (<30%) y fragmentos accesorios (<5%). Tiene una extensión desconocida y un espesor que varía de 50 a 200 m. La IRC se encuentra sin soldar, endurecido a parcialmente soldado; con pómez deformadas y desvitrificación generalizado (Paquereau, 2006).	En los altos muros del cañón del Río Chili (Charcani IV y Aguada Blanca).	Profundiza hacia el SE más allá de la orilla norte del valle de Río Chili en el área bajo la llanura del anillo Cuaternario del volcán Misti.

<p>Grupo Barroso</p>	<p>10 a 3 Ma (Roperch et al., 2006) secuencias más antiguas. 3.3 a 0.3 Ma (Tosdal et al., 1981; OLADE, 1980) secuencias jóvenes.</p>	<p>Conformado por rocas volcánicas pertenecientes a aparatos volcánicos. Se divide en tres unidades, que de abajo hacia arriba son: Volcánico Chila, Volcánico Barroso y Volcánico Purupurine (Mendivil, 1965).</p>	<p>En las cercanías de la provincia de Arequipa constituyendo el volcán Misti y las agrestes montañas del Complejo Volcánico del Chachani.</p>	<p>El grupo Barroso yace (discordante) sobre la formación Capillune, cubre al Grupo Maure (discordante), está parcialmente cubierto por depósitos morrénicos, fluvio-glaciáricos, volcánicos recientes y depósitos cuaternarios (Guevara, 1969; Galdós & Ticona, 2000).</p>
<p>Ignimbrita La Joya (ILJ)</p>	<p>4.88 ± 0.22 Ma (40Ar–39Ar, Río Chili - Aguada Blanca; Paquereau, 2006). 4.87 ± 0.02 Ma (40Ar–39Ar, parte superior del batolito de Arequipa ; Paquereau, 2006).</p>	<p>Pertenece al Grupo Barroso Inferior. La Ignimbrita La Joya (ILJ, Fig. 5.2.2.2.), se compone de toba de lapilli columnar articulado, pómez y fragmentos de vidrio (<65%), cristales libres (<20%) y fragmentos accidentales-accesorios (<5%). Tiene un espesor que varía de 5 a 80 m. La ILJ se encuentra sin soldar, no endurecido a parcialmente soldado; con fiammes (líneas de diferentes minerales que cruzan la roca) y características esferulíticas (cuerpos pequeños y redondeados) (Paquereau, 2006).</p>	<p>Al pie del cañón del río Chili (Figura 11), en el área del Altiplano. Hasta 50 km al norte en el valle del Río Sumbay. En el flanco SO del batolito de Arequipa cerca de La Joya (5 m de espesor). Al NE de la depresión de Arequipa</p>	<p>Cubierto por depósitos volcanoclásticos y flujos de lava de Plio-Cuaternario del Chachani. Está expuesto al SO de la depresión de Arequipa a lo largo de la parte superior del valle del río Vitor (Paquereau, 2006) superponiendo los depósitos de la Formación Moquegua Superior. Aguas arriba a lo largo del Río Chili sobre la IRC (presa Aguada Blanca)</p>

		Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (IAA)	Unidad Rosada (1.65 ± 0.04 Ma, Paquereau, 2006)	Tiene dos unidades distinguibles por su color: Unidad Blanca (IAA-UB) cubierta por la Unidad Rosada (IAA-UR) (Figura 12). La IAA-UR, se componen de toba de lapilli masivo, pómez y fragmentos de vidrio, cristales libres y fragmentos accidentales-accesorios, sin soldar, más o menos endurecida, endurecida a incipientemente endurecida, sin recristalización según Paquereau (2006). Constituye el relleno más alto de la depresión de Arequipa entre los valles de Río Yura y Río Chili. La IAA, cuya extensión es menor que la del ILJ, llena la depresión de Arequipa. La unidad rosada probablemente está más extendida que la unidad blanca pero su grosor es menor (pocos metros hasta 50 m).	La IAA-UB aflora en valles estrechos que drenan la depresión de norte a sur, llena la Quebrada El Cuico (Figura 12) y no se observa en el cañón de Río Chili. La IAA-UR forma la mayor parte de la superficie plana de la depresión de Arequipa. Salida del cañón del Río Chili (Paquereau, 2006).	La IAA tiene un espesor de 5 a 100 m, representa al NW, SW y SE del Misti el vulcanismo del Grupo Barroso Superior y es contemporánea a la Formación Sencca. La falta de una discordancia estratigráfica y la ausencia de sedimentos o un suelo enterrado entre las dos unidades de la IAA sugieren un corto intervalo de tiempo entre el emplazamiento de las unidades blancas y rosadas (Paquereau, 2006).
		Los Tufos Yura (TY)	1.02 ± 0.09 Ma (carretera a Juliaca 17 km al norte de Yura; Paquereau, 2006).	Formado por una serie de depósitos grises no soldados de corrientes de densidad piroclástica (flujo piroclástico de pómez) intercaladas con depósitos piroclásticos. Tienen un grosor promedio de 10 m.	Cerca de la ciudad de Yura. Llena una depresión entre el Cerro Nocarani al este y las escarpas del Jurásico "Grupo Yura" al oeste.	Sobreyace a la IAA-UR, algunos depósitos del Complejo Volcánico del Chachani y las escarpas del Jurásico "Grupo Yura".
		Depósitos de la Formación Capillune		Formado por una intercalación de depósitos volcanoclásticos, sedimentos lacustres, depósitos volcanoclásticos de caídas y corrientes de densidad piroclástico no soldados (10 m a 30 m de espesor).	Afloran al NE del Complejo Volcánico del Chachani y al NW del Misti, en las cercanías de la represa Aguada Blanca.	
		Depósitos del complejo volcánico Chachani	~833 ka (flujo de lava cerca de la Hidroeléctrica Charcani I; Thouret et al., 2001)	Conformado por: flujos de lava (unidad FI-ch1) sedimentos volcanoclásticos, compuesto de bloques escoriaáceos envueltos en una matriz limo-arenosa con fragmentos líticos (unidad SV-ch), lahares (unidad LH-ch) y depósitos aluviales del holoceno (unidad AL).	FI-ch1, por Charcani I. SV-ch, al margen derecho del río Chili. LH-ch, en el flanco sur del Chachani. AL,	En el mapa geológico (Fig. 5.2.3.8a) se muestra como la unidad FI-ch1 formando parte del substrato del Misti (Mariño et al., 2016).

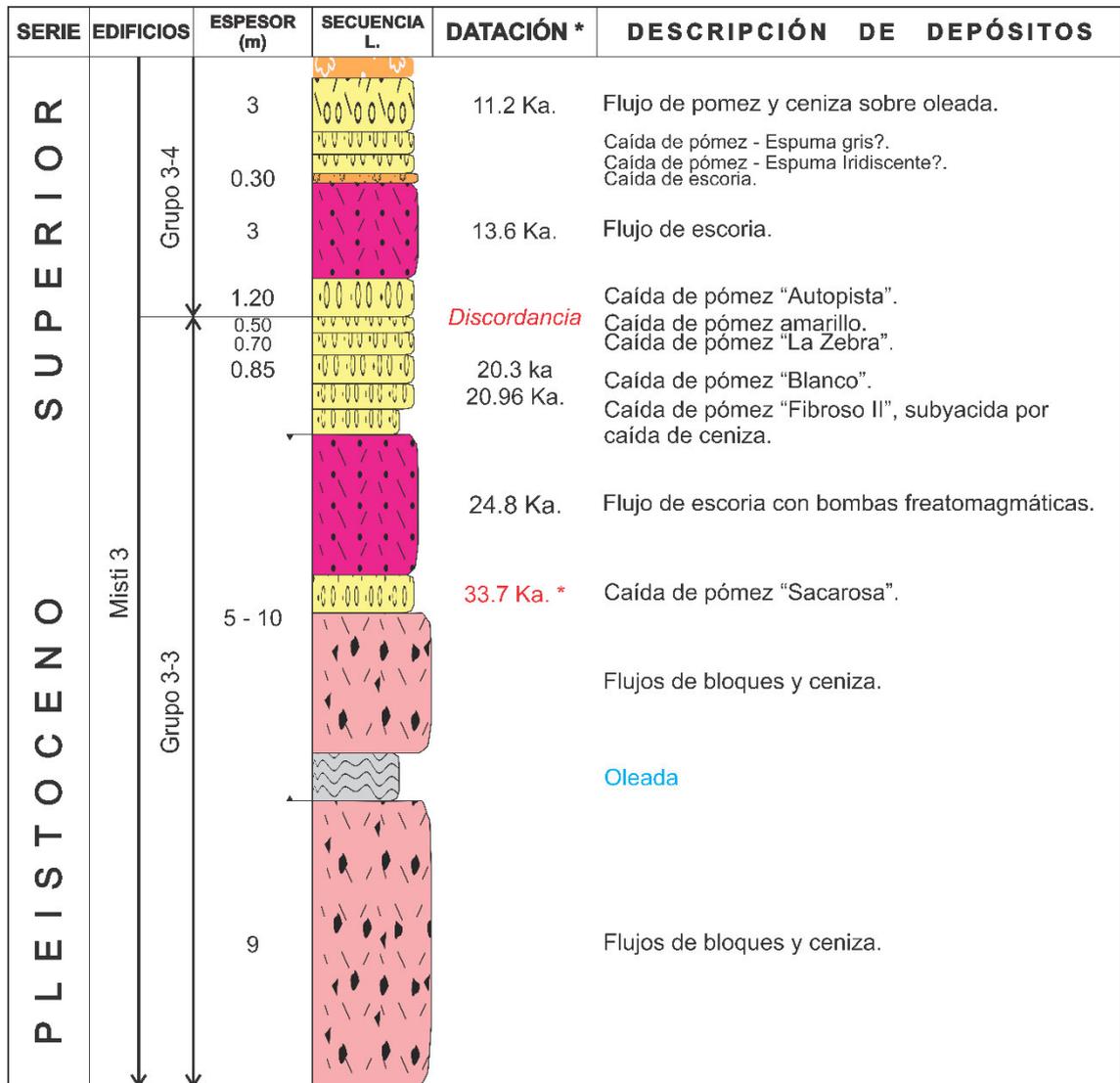
					distribuidos en casi toda el área.	
Tefro-Estratigrafía del volcán Misti	Edificio Estratovolcán Misti 1	~ 112 ka (flujo de lavas, Mariño et al., 2016).	Formado principalmente por las unidades Fl-m1, Fl-m2 (secuencias de flujos de lava en bloques, CDP y volcanoclásticos) y Fl-m3, Fl-m4 (flujos de lavas en bloques con anfíbol y piroxenos), con intercalaciones de depósitos volcanoclásticos y flujos piroclásticos de escoria. Además, depósitos de avalanchas de escombros del Misti (DA-m) y depósitos de Avalanchas de Escombros del PichuPichu (DA-pi) en su parte superior. Las lavas son andesíticas y dacíticas. Según Mariño et al. (2016).	Fl-m2 cerca de Miraflores subyaciendo a Da-m (Figura 13). Fl-m1 en Cañón del río Chili (lado NO del volcán Misti). Fl-m3, Fl-m4 al SO del Misti. DA-m al lado oeste de la quebrada San Lázaro y al SO de Villa Ecológica	DA-pi puede considerar mayor a la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa.	
	Edificio Estratocono Misti 2	112 ka (Ar ⁴⁰ -Ar ³⁹ , cercanías de la Planta Hidroeléctrica de Charcani) y 40 ka (14C, quebrada Huarangal, Agua Salada y garita en río Chili). Por Mariño et al., 2016. 98 ± 3 y 70 ± 3 ka (Grupo 2-1, cerro Brazo del Misti; Thouret et al., 2001).	Formado por tres grupos: Grupo 2-1 (secuencia de flujos de lava en bloques gris, Fl-m5; intercalados con flujos de escoria, de pómez, bloques-ceniza y flujos de lava, Fl-m6; de 112 a 90 ka). Grupo 2-2 (depósitos de lava andesítica y dacítica en bloques de escasa matriz LM-m, fig. 5.2.3.8.b, emplazados entre 70 ka y 49 ka. Grupo 2-3 (extensos y voluminosos depósitos de flujos piroclásticos FPP-m2 antes "ignimbritas no soldadas" asociados posiblemente a la formación de una caldera entre 50 y 40 ka según Thouret-et-al.-2001; divididas en dos grupos: Subgrupo 2-3A de flujos de escoria de 48.6 ka, flujos de pómez de 47.3 ka y flujos de ceniza de 43.9 ka; y 2-3B de flujos de 40.2 ka y 39.6 ka).	Grupo 2-1, Fl-m6 en cerro Brazo del Misti. Grupo 2-2 en el fondo de las quebradas Huarangal, Pastores y Honda (Thouret et al., 2001). Subgrupo 2-3A en quebrada Agua Salada. Subgrupo 2-3B cerca al Santuario de Chapi y la quebrada Huarangal.	Grupo 2-2 superpuesto por tres depósitos de caída de lapilli de escoria del Chachani (Thouret et al., 2001). Correlación geoquímica: Los depósitos de este edificio poseen composición andesítica (58.3 a 62.7 % SiO ₂) y dacítica (63 % SiO ₂); según Mariño et al. (2016).	

	<p>Edificio Estratocono Misti 3</p>	<p>36.1 – 20.3 ka (dataciones de termoluminiscencia “TL” en la quebrada Huarangal y camino de tierra de Huarangero) y 33.9 – 11.3 ka (Dataciones de ¹⁴C en la parte baja de la quebrada Honda Grande y por El Porvenir - Alto Misti) según Thouret et al. (2001). "Fibroso I" de 33.8 ka según Thouret et al. (2001). "Sacaroso" de 33.7 ka según Cuno (2019). Sobreyaciendo al Autopista (quebrada Pastores), se tiene un depósito de flujos de escoria el cual ha sido datado en 13.64 ± 3 ka (Thouret et al., 2001).</p>	<p>Formado por tres grupos: Grupo 3-1 (FPP-m3) de depósitos de flujos de lava, flujos de pómez-ceniza y depósitos de caída de tefra (Thouret et al., 2001) como el "Fibroso I" (pómez de color blanco perlado, aspecto "sedoso" con vesículas alargadas lo cual le da una textura fibrosa característica, considerado una de las caídas más antiguas del Misti). Grupo 3-2 de secuencias voluminosas de depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza (desde 1.5 m hasta 22 m de espesor), algunos intercalados con depósitos de caída de tefra. Grupo 3-3 de depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza (producto del colapso de domos), oleadas piroclásticas, flujos de escoria y flujos de pómez y ceniza, todos intercalados con al menos con 6 niveles de depósitos de caída de tefras producto de erupciones subplinianas a plinianas (unidades litoestratigráficas, FPP-m4 y FPB-m (Mariño et al., 2016). En este grupo se tienen los depósitos de caída de tefra del: "Sacaroso" (matriz de fenocristales libres de plagioclasa, biotita, anfíbol y vidrio volcánico; las pómez y los líticos son escasos según Cuno-2019) , "Fibroso II" (depósito de color blanquecino a amarillo rojizo rico en líticos con pómez blancas de textura fibrosa) y "Blanco" (color blanco, rico en líticos con pómez que contienen plagioclasa, piroxenos y anfíbol). Grupo 3-4 y Formación de la Caldera de la Cumbre de flujos piroclásticos de escoria, depósitos de caídas de tefra, flujos de pómez y ceniza y oleadas piroclásticas (FPB-cp, CP-m1, FPP-m5). Thouret et al. (2001) y Mariño et al., (2016) mencionan para este edificio que ha sido truncado por una caldera a 5400 m.s.n.s.m..</p>	<p>Grupo 3-1 entre 8 a 10 km al SO del Misti y por el norte de Chiguata (Mariño et al., 2016). Grupo 3-2 a 10 km al SO (quebrada Pastores), 12 km al sur (quebrada Huarangal), 8.5 km (quebrada Honda Grande) del Misti. Grupo 3-3 hacia el sur y SE del Misti en la quebrada Honda Grande, en la Q. San Lázaro (Urb. Porvenir y Malecón Amazonas) y Agua Salada (FPP-m4). Fibroso II a ~10 km al oeste del cráter del Misti. "Blanco" entre 12 y 15 km del Misti por Villa Ecológica.</p>	<p>Grupo 3-3 en la Q. San Lázaro y Agua Salada se tiene un depósito característico de flujo piroclástico de pómez y ceniza (color rosado salmón) matriz soportada (FPP-m4), sobre estas se han identificado por lo menos 3 depósitos correspondientes a erupciones plinianas a subplinianas (Mariño et al., 2016), los cuales son: Caída de Lapilli Pómez "Sacaroso". Grupo 3-4 a 13 km del cráter (parte alta de Mariano Melga y Paucarpata), aparentemente encima del "Autopista" y otros depósitos del grupo 3-4, aflora un depósito de flujo piroclástico de pómez (30%) y ceniza (matriz 70%) de color blanco-rojizo, no consolidado, emplazado entre 11 y 10 ka (Mariño et al., 2016). Correlación geoquímica: Los depósitos de este edificio poseen composición andesítica (57.4 a 62.4 % SiO₂), dacítica (63.4 a 66.3 % SiO₂) y riolítica (72.3 a 73.6 % SiO₂) según Mariño et al. (2016).</p>
--	--	--	---	--	--

			En este grupo se tienen los depósitos guía de tefra: "Autopista" (depósito blanquecino de lapilli pómez estudiado a detalle por Cacya-2006, quien lo divide en tres niveles: inferior claro 40%, medio oscuro 10% y superior claro 50%).	
	Edificio estratocono Misti 4	Depósitos de flujo de ceniza de 8140 años (quebrada Honda), depósito de flujo de ceniza con 6390 años (quebrada Carabaya), depósitos de oleada con 5200 años (valle del río Chili), depósitos de oleada con 4750 años (El Porvenir-Alto Misti),	Edificio construido sobre la discontinuidad estructural que trunca el Misti 3 (~5400 m.s.n.m.), lo conforman depósitos mayores a 11 mil años como corrientes de densidad piroclástica intercalados con depósitos de caída de tefra y depósitos de ceniza. Este edificio solo tiene el Grupo 4-1 en el cual se ubican por lo menos 8 depósitos de caída de tefra cada una asociada a una erupción subpliniana a pliniana del Misti como los depósitos " Sandwich Inferior ", " Sandwich Superior ", "Rosado", caída de ceniza de 3800 años (río Chili), depósitos (caída, lahar, flujo piroclástico y oleada piroclástica) del "2 ka" (FPPPL-m; Harpel et al., 2011); estos están representados en el mapa geológico por la unidad CP-m2. El depósito conocido más reciente de este grupo (unidad CC-m3) es la ceniza oscura del siglo XV (Mariño et al., 2016). Otros depósitos pertenecientes a este grupo son: lahares epiclásticos y volcanoclásticos (unidad LEV-m), domo histórico (unidad DH-m) y depósitos de flujo de escombros (unidad Lh-m).	El cráter de mayor diámetro del Misti está asociado a la erupción del "2 ka" y el cráter dentro de este a la erupción del "Siglo XV". Correlación geoquímica: Los depósitos poseen composición andesítica a dacítica según Mariño et al. (2016).

Figura 14

Columna estratigráfica del edificio Misti 3 (grupos 3-3 y 3-4)



Columna estratigráfica generalizada y modificada del volcán Misti (compilado de Thouret et al., 2001; Legros, 2001; Cacya et al., 2007; Mariño et al., 2008; Cereceda & Mariño, 2008; Mariño et al., 2016). *(Thouret et al., 2001)

Nota: Se observa los depósitos de caída Autopista y Zebra, depósitos que se consideran actualmente depósitos guía del Misti.

Figura 15

Columna estratigráfica del edificio Misti 4

SERIE	EDIFICIOS	ESPESOR (m)	SECUENCIA L	DATACIÓN *	DESCRIPCIÓN DE DEPÓSITOS
HOLOCENO Y TIEMPO HISTÓRICO	Misti 4 Grupo 4-1	0.06		1440 - 1470 D.C.	Caída de ceniza, con pómez finos. "Siglo XV"
		2 - 3		2 ka	Lahar "2 ka".
		30 - 6		2 ka	Flujo de pómez y ceniza "2 ka".
		0.5 - 0.2		2 ka	Caída de pomez, escoria y ceniza "2 ka".
					Caída sin nombrar 3.
		0.30			Caída bandeado - Caída sin nombrar 2.
					Caída de escoria "Rosado".
		0.80		4.75 ka	Caída de ceniza subyacida por depósitos de pómez ricos en líticos. Oleada
		0.70			Caída de pómez amarillo - Caida sin nombre 1.
		0.08 - 0.20			Caída de pómez "Sandwich Superior".
0.10 - 0.45			Caída de pómez "Sandwich Inferior".		
PLEISTOCENO SUPERIOR					

Columna estratigráfica generalizada y modificada del volcán Misti (compilado de Thouret et al., 2001; Legros, 2001; Cacya et al., 2007; Mariño et al., 2008; Cereceda & Mariño, 2008; Mariño et al., 2016). (*Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011)

Nota: Se observa que los depósitos del "Sandwich Inferior" y "Sandwich Superior" se suponen pertenecen a inicios del Misti 4.

Figura 16^a
 Mapa geológico del Misti modificado

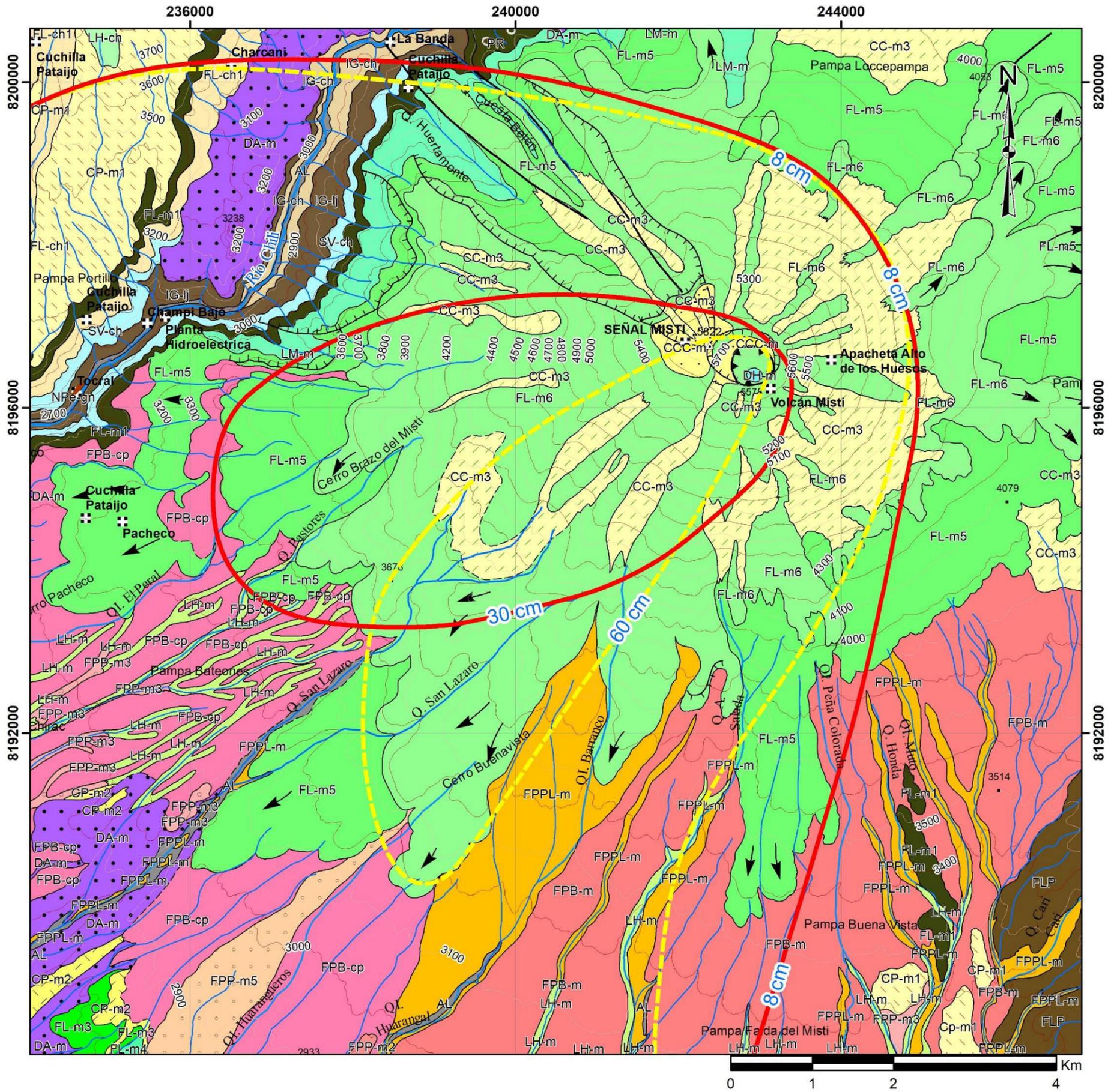


Figura 16
 Leyenda del mapa geológico (Figura 16)

L E Y E N D A

ERA	PERIODO	ÉPOCA	EDIFICIO	GRUPO	UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS	OTROS DEPÓSITOS
C E N O Z O I C O	N E Ó G E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	CC-m3	Depósitos de caída piroclástica de ceniza oscura del siglo XV
					LH-m	Depósitos de Lahar históricos del volcán Misti
C E N O Z O I C O	P L E I S T O C E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	DH-m	Domo histórico "Siglo XV"
					FPPL-m	Depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza cubierto por lahar (2 Ka).
C E N O Z O I C O	P L E I S T O C E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	CCC-m	Cono de ceniza de la cumbre formado en los últimos 11 mil años.
					CP-m2	Secuencia de caídas piroclásticas holocénicas.
C E N O Z O I C O	P L E I S T O C E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	CP-m1	Secuencia de caídas piroclásticas de 32 a 2 ka.
					FPP-m5	Depósito de flujo piroclástico de pómez y cenizas (13.6 a 11.3 ka), cubierto por caídas piroclásticas recientes 14 a 11 ka.
C E N O Z O I C O	P L E I S T O C E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	FPB-cp	Secuencia de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, cubiertos por caídas piroclásticas (33 a 2 ka).
					FPB-m	Secuencia de flujo piroclástico de bloques y cenizas y escoria y cenizas de hace 13.6 a 11.3 ka.
C E N O Z O I C O	P L E I S T O C E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	FPP-m3	Secuencia de flujos piroclásticos de pómez y ceniza, escoria y ceniza.
					FPP-m2	Secuencia de flujos piroclásticos de pómez y ceniza, escoria y ceniza.
C E N O Z O I C O	P L E I S T O C E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	LM-m	Bloques de domo (lava) andesítica y dacítica con escasa matriz, prismáticamente unidos en caliente.
					FL-m6	Secuencia de depósitos de flujos piroclásticos y flujo de lava (90 a 70 Ka, Thouret et al., 2001)
C E N O Z O I C O	P L E I S T O C E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	FL-m5	Flujos de lava (112 - 90 Ka)
					FL-m4	Flujo de lava en bloques con anfíbol y piroxeno.
C E N O Z O I C O	P L E I S T O C E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	FL-m3	Flujo de lava en bloques con anfíbol y piroxeno.
					DA-m	Depósito de avalancha de escombros del volcán Misti
C E N O Z O I C O	P L E I S T O C E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	FL-m2	Secuencia de flujos de lava en bloques, depósitos piroclásticos y volcanoclásticos
					FL-m1	Flujo de lava del volcán Chachani de hace 833 ka
C E N O Z O I C O	P L E I S T O C E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	PR	Protrusión riolítica
					IG-I	Ignimbrita "La Joya" de hace 4.88 Ma
C E N O Z O I C O	P L E I S T O C E N O	H O L O C E N O	V O L C Á N M I S T I	E S T R A T O T C O N O	FLP	Secuencia de flujos de lava y piroclastos del Plioceno
					IG-ch	Ignimbrita "Rio chili de hace 13,39 ± 0.1 Ma"
NEOPROTEROZOICO					NPe-gn	Gneis de Charcani. Edad 679 Ma (Stewart, 1974)

S I M B O L O G Í A	
	Señal geodésica de primer orden
	Pueblo
	Cota (m.s.n.m.)
	Río
	Cráter de hace 2 Ka del volcán Misti
	Flujo de lava
	Escarpa
	Protrusión
	Falla
	Falla Inferida
	Cráter histórico del volcán Misti

3.3. Geología Estructural y Tectónica

3.3.1. Contexto Tectónico Regional

El “Cinturón de Fuego del Pacífico”, alberga al “Cinturón Volcánico de los Andes” (provincia volcánica del Cinturón de Fuego del Pacífico) el cual no es continuo y está segmentado en cuatro grandes “arcos volcánicos” (alineamientos de volcanes) continentales separados por espacios sin actividad volcánica reciente, los cuales forman las cuatro zonas o arcos volcánicos continentales que han tenido actividad en los últimos 10 000 años (Zona Volcánica del Norte o ZVN, Zona Volcánica Central o ZVC, Zona Volcánica Sur o ZVS y la Zona Volcánica Austral o ZVA). Estas son el resultado de la subducción de las placas de Nazca y Antártica bajo la placa Sudamericana. Así tenemos que en donde el ángulo es relativamente inclinado (10 - 25°) se forman arcos. El actual arco del frente volcánico activo, se encuentra a ~230 km al noreste de la fosa marina y a 115 ± 5 km sobre el plano Benioff - Wadati ([England et al., 2004](#)), en él se observan los principales volcanes pertenecientes a la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC) y conos de escoria monogenéticos (volcán monogenético que erupcionó una sola vez) asociados a flujos de lava menores a 5000 años ([Delacour et al., 2007](#); [De Silva y Francis, 1991](#)).

Regiones donde el ángulo de subducción es bajo ($< 10^\circ$) tendrán un vulcanismo ausente. En los Andes centrales el ángulo de subducción es marcadamente variable; así en el norte y centro del Perú la subducción es subhorizontal (alrededor de 10°), mientras que en la zona sur del Perú y norte de Chile es significativamente mayor (de 25° a 30°); por tal en Arequipa, Moquegua y Tacna encontramos volcanes activos, pero en regiones como Ica y al norte hasta Tumbes no hay vulcanismo activo.

El arco volcánico actual de los Andes centrales (ZVC) tiene alrededor de 1000 km de largo y entre 60 y 80 km de ancho, 600 km corresponden a la parte peruana. Esta cadena volcánica está constituida de estratovolcanes tales como el Sara Sara, Misti, Ubinas, Tutupaca y Yucamane; complejos volcánicos como el Sabancaya - Ampato, Coropuna, Chachani y Casiri; complejos de domos, como el Ticsani y Purupuruni; y finalmente, campos de volcanes monogenéticos como el de Huambo-Andahua-Orcopampa ([Mariño et al., 2016](#)).

En el Triásico-Jurásico (251.9 – ~145 Ma; [Cohen et al., 2013](#)) comienza el proceso de subducción entre la placa de Nazca y Sudamericana, pero la formación de la cadena volcánica sudamericana se inicia en el Mioceno inferior a medio (23.03 - 13.08 Ma; [Cohen et al., 2013](#)) ([Isacks, 1988](#)). Del Oligoceno al Plio-Pleistoceno (33.9 – 0.0117 Ma; [Cohen et al., 2013](#)) se produce un incremento de la actividad volcánica, que estaría relacionada al aumento de la velocidad de convergencia de

las placas, seguido por una disminución de vulcanismo en tiempo histórico ([Sévrier y Soler, 1991](#)).

La actividad tectónica magmática está asociado al engrosamiento o adelgazamiento de la corteza y a la formación de arcos volcánicos, es así que las voluminosas ignimbritas datadas a lo largo de estos periodos son evidencia y materia de investigación.

Estudios como el de Mamani et al. ([2010](#)) han relacionado variaciones geoquímicas de la subducción andina central del período Neógeno (23.03 – 2.58 Ma; [Cohen et al., 2013](#)), con el registro geológico de levantamiento y engrosamiento de la corteza. Concluye que el engrosamiento y el levantamiento de la corteza importante se iniciaron en el Oligoceno medio (30 Ma) y que aumentó hasta hoy. Este engrosamiento se ha manifestado a través del tiempo en arcos volcánicos que han ido migrando de acuerdo al comportamiento magmático en zonas de subducción, pero con una tendencia lineal, tales arcos son: El Arco del Chocolate (-310-91 Ma), el Arco de Toquepala (91-45 Ma), el Arco de Andahuaylas-Anta (45-30 Ma), el Arco y trasarco del Tacaza (30-24 Ma), el Arco de Huaylillas (24-10 Ma), Arco Inferior del Barroso (10-3 Ma) y el Arco Superior del Barroso (3-1 Ma).

Por otro lado, Thouret et al. ([2016](#)) considera un campo volcánico grande de ignimbritas del Neógeno donde los episodios de formación abarcan 25 Ma. La estratigrafía volcánica que propone tiene las siguientes características: (1) Ignimbritas de mayor volumen (8 ignimbritas cada 2.4 Ma), fueron emplazados por estallidos puntuados entre 25 y 9 Ma durante el levantamiento de la Cordillera Occidental. (2) Numerosas ignimbritas más pequeñas (cada 0.85 Ma) se colocaron después de 9 Ma, ya que la tasa de producción de ignimbritas disminuyó tres veces (3) El crecimiento de dos arcos volcánicos ha agregado el doble de volumen (53 km^3 , cada 1 Ma) al campo volcánico del Río Ocoña – Cotahuasi - Marán que las ignimbritas después de 2.27 Ma. Sin embargo, la salida estimada de magma de arco lineal ha disminuido dos veces ($0.15 - 0.08 \text{ km}^3 \text{ km}^{-1} \text{ Ma}^{-1}$) desde el Cuaternario Temprano hasta el Pleistoceno-Holoceno.

3.3.2. Contexto Tectónico Local

El vulcanismo explosivo en el sur del Perú y norte de Chile del Mioceno (23.03 – 5.33 Ma; [Cohen et al., 2013](#)) dio origen a los potentes depósitos de ignimbritas riolíticas a riodacíticas que son observadas en áreas próximas al volcán Misti (ignimbrita “Rio Chili” de 13.19 Ma e ignimbrita “La Joya” de 4.89 Ma; [Paquereau et al., 2006](#)).

Según Thouret ([2016](#)) las ignimbritas no soldadas de “La Joya” (4.9 a 3.6 Ma) correspondería a periodos de incisión de valles entre 9 y 4 Ma y las ignimbritas no

soldadas asociadas a calderas ubicadas debajo de los centros volcánicos Chachani, Coropuna y Ampato, como la Ignimbrita Aeropuerto (1.63 Ma) corresponden a un periodo de incisión de valles después de 2.2 Ma.

El Misti está situada a unos 55 km de corteza cerca del límite norte de la Zona Volcánica Central (ZVC), donde el ángulo de subducción cae hacia el norte. El hecho de que se produzca una bajada resulta en el cese del volcanismo activo ~250 km al noroeste de Misti ([Barazangi e Isacks, 1976](#); [De Silva y Francis, 1991](#); [Stern, 2004](#)).

Al pie del flanco suroeste del volcán Misti se localiza una depresión tectónica, la cual se encuentra en una dirección WNW-ESE, que se ha interpretado como una cuenca tectónica de separación asociada a una falla regional NW-SE con una componente normal ([Mering et al., 1996](#); [Thouret et al., 2001](#)), sobre ella se encuentran las ignimbritas “Rio Chili” – “La Joya” – “Aeropuerto” y está asentada la ciudad de Arequipa ([Mariño et al., 2016](#)).

3.3.3. Geología Estructural

En el área de estudio de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” y sus alrededores Mariño et al., ([2016](#)) considera tres sistemas de fallas las cuales son:

- a) **Sistema de fallas NO-SE.** Sistema más difundido en el sur del Perú (según Mering et al., [1996](#)). Las fallas que lo componen en su mayoría son normales con un pequeño componente sinistral distribuido principalmente al este, entre Arequipa y el volcán Pichu Pichu, y al noreste del Misti - Chachani cerca de la represa El Fraile ([Mariño et al., 2016](#)).

La ciudad de Arequipa se encuentra en una depresión tectónica de aproximadamente 30 km de largo por 15 km de ancho controlada por la falla “Falla Ayo-Lluta-Arequipa” ([Mariño et al., 2016](#)).

Benavente et al. ([2017](#)) menciona tres fallas activas ([Figura 17](#)), las cuales se pueden incluir en el sistema de fallas NO-SE ([Mering et al., 1996](#); [Mariño et al., 2016](#)). “**Falla Aguada Blanca**” (falla activa normal sinistral), falla de tipo normal con dirección NO-SE y buzamiento hacia el sur, el cual cruza el sector pampa Llapallapa y pampa Matacaballo (NO del Misti y Chachani) afectando depósitos aluviales y depósitos lacustres. “**Falla Ayo-Lluta-Arequipa**” (posible activa inversa), con dirección NO-SE desde el Coropuna hasta el Pichu Pichu, tiene evidencias de actividad tectónica reciente en el flanco suroeste de los volcanes Chachani, Misti y Pichu Pichu. “**Falla Chili**” (falla activa normal), con dirección N 130° afectando al volcán Misti y relacionada a la cicatriz de colapso del flanco noreste (estructura tectónica) según Thouret et al. ([2001](#)). “*El Instituto*

Geofísico del Perú registra sismos tectónicos en este sector sugiriendo actividad de esta falla” (Benavente et al., 2017).

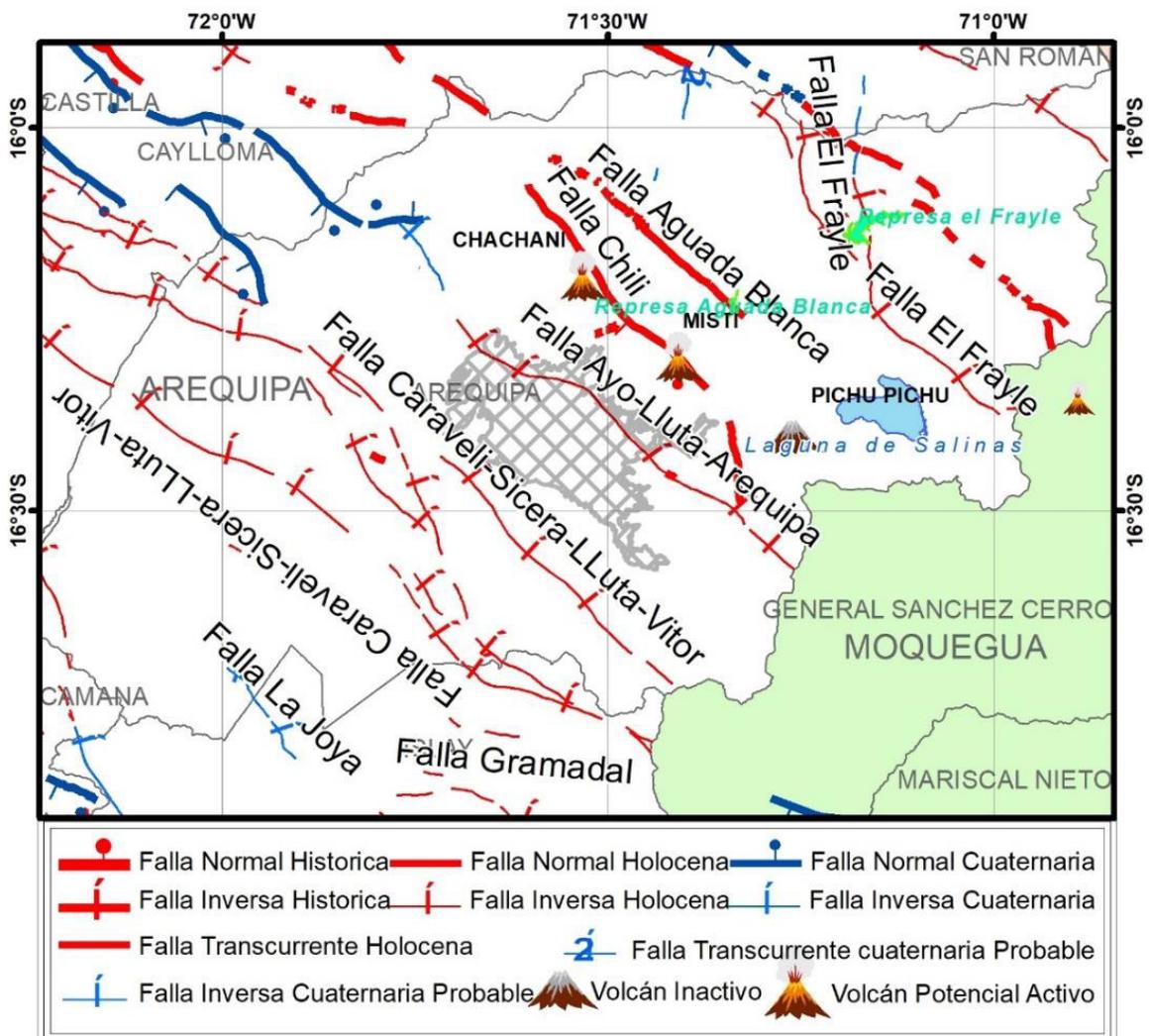
- b) **Sistema NE-SO.** Este sistema de fallas tiene un componente tensional y posiblemente controle el volcanismo Plio-Cuaternario del sur del Perú (Mering et al., 1996).

Distribuido cerca al río Andamayo y al noreste del volcán Misti (Figura 18). Este sistema controla gran parte de la red de drenaje del río Andamayo y la quebrada San Lázaro (Mariño et al., 2016).

- c) **Sistema NNE-SSO.** Distribuidos al sur de los volcanes Misti y Chachani (Figura 18). Entre las estructuras que se destacan tenemos una falla muy joven que atraviesa los domos del volcán Chachani, cerca al aeropuerto de Arequipa, y los lineamientos en el río Yura (sur de Yura) y en la Qda. Agua Salada, entre otros (Mariño et al., 2016).

Figura 17

Mapa neotectónico que involucra el área de estudio



Nota: Mapa con datos extraídos del aplicativo GEOCATMIN. Se observa tres fallas regionales activas cercanas al Misti de la cual la Falla Chili muy probablemente ha ocasionado un colapso en el flanco noroeste del Misti (INGEMMET, versión 2018).

3.3.4. Estructuras Volcánicas

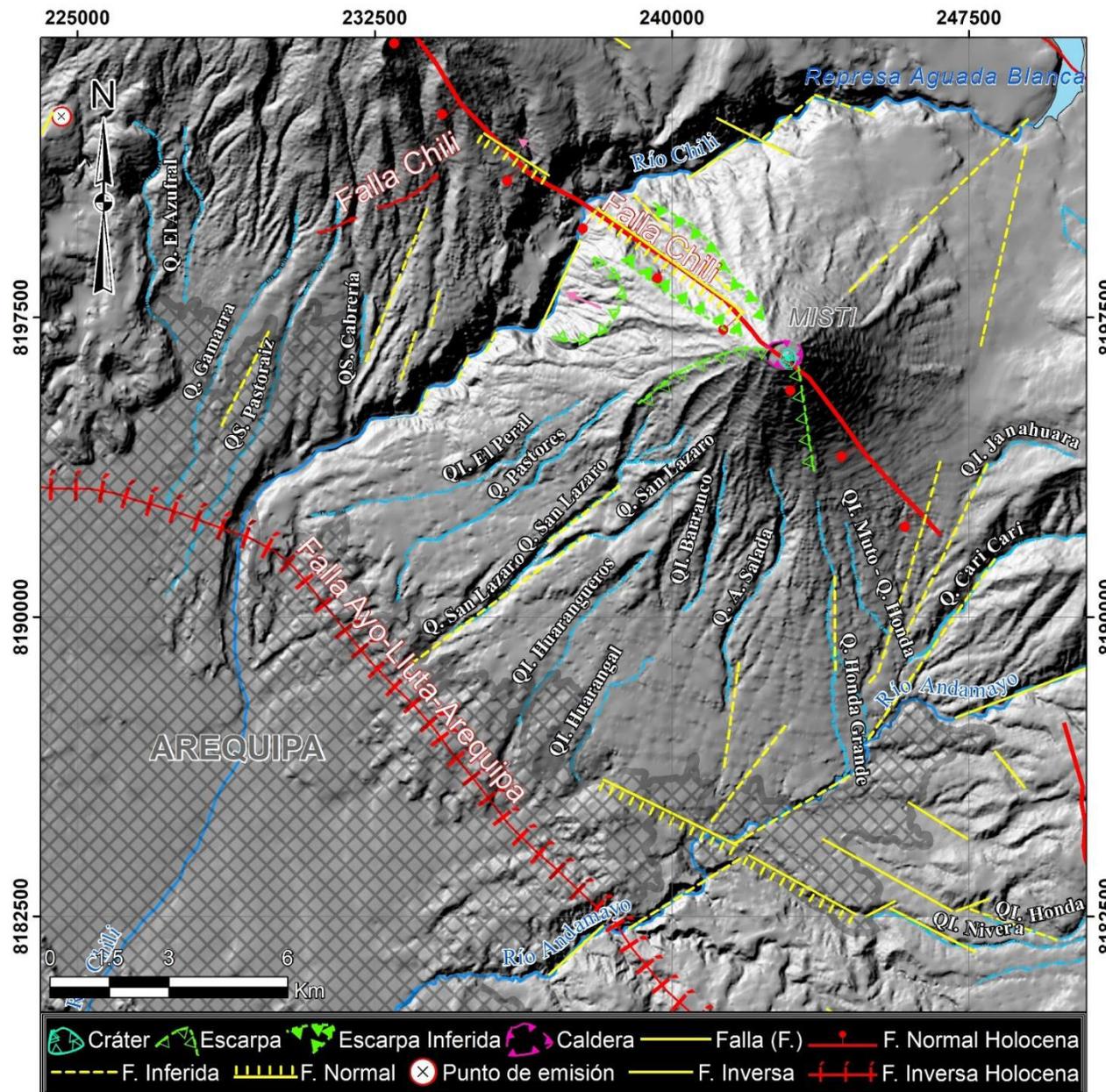
Cicatriz de Colapso. Estas estructuras poseen forma de herradura. En el flanco NO Misti, se encuentra una escarpa parecida a una cicatriz de colapso y en la zona inferior del flanco, también se observa una cicatriz en forma de herradura (>2 km de diámetro), abierta hacia el río Chili ([Mariño et al., 2016](#)).

Cráteres y Calderas. En la cima del volcán Misti se han identificado dos cráteres anidados, los cuales se consideran que forman una caldera. Uno mayor de 935 y 690 m de diámetro en dirección SE-NO y un cono intracrático en su extremo sureste cortado por un segundo cráter de diámetro de 530 m ([Mariño et al., 2016](#)).

Domos y Domos-coladas. Hay presencia de domos y domos-coladas en el complejo volcánico Chachani, cerca al aeropuerto de Arequipa y un domo de 100 m de diámetro en el cráter menor del Misti ([Mariño et al., 2016](#)). En la [Figura 18](#) se tiene un punto de emisión.

Figura 18

Mapa con las principales estructuras y sistemas de fallas cercanas al volcán Misti



Nota: En rojo se observa las dos fallas regionales activas, en amarillo estructuras locales compiladas de Thouret et al. (2001) y Mariño et al. (2016).

4. Procesamiento y Análisis de los Depósitos “Sandwich Inferior” y “Superior”

4.1. Descripción Estratigráfica

En el campo se ha identificado dos depósitos de caída de lapilli de escoria (>60%) y pómez (>5%) los cuales han sido descritos anteriormente como un solo depósito al cual llamaron “Sandwich”, ahora denominado “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”, los cuales se encuentran divididos por una capa generalmente de material retrabajado de pómez subredondeadas dentro de una matriz limosa o paleosuelo (la cual antes mencionaban como “capa intermedia de ceniza oscura”). Cabe mencionar que en algunos afloramientos no se observan ambos depósitos juntos.

Según Mariño et al. ([2016](#)) la caída “Sandwich” fue producida por una sola erupción, sin embargo, en casi todos los depósitos se ha identificado una capa intermedia (material retrabajado o paleosuelo) la cual evidencia dos erupciones independientes del volcán Misti que habrían generado dos depósitos de caída muy cercanas en tiempo geológico. Por lo tanto, en este capítulo se describirán a detalle los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”.

Es necesario mencionar que en la descripción estratigráfica se realizan estimaciones (en porcentaje) en campo de: vesículas, cristales, pómez, escoria y líticos; cuyos valores pueden diferir de aquellas hechas en laboratorio por métodos como el conteo granulométrico o “método de puntos” por microscopio petrográfico en secciones delgadas. Ambos valores son válidos y de ellos se hace consensos para tener los valores finales que caractericen cada depósito.

4.1.1. “Sandwich Inferior”

Este depósito de caída se caracteriza por estar bien conservada con respecto a la unidad superior (“Sandwich Superior”). Está constituido por escorias (60%), pómez (15%) y líticos (25%). Tiene un buen sorteo sin gradación. Los espesores encontrados varían de 64 cm (zona proximal) a 8 cm (zona distal).

Las escorias son de color marrón, engloban cristales de clinopiroxeno (3%) y presentan vesículas (~20%) subredondeadas, algunas escorias (~5%) muestran bandas blancas, que sugieren procesos de mingling. Estas se localizan en toda la capa, pero con cierta abundancia en la parte intermedia y superior de ella.

Las pómez son de color blanco con textura microvesicular (~15%), contienen cristales aciculares de piroxeno <1%. Estas pómez se concentran en mayor abundancia en la parte inferior de la capa (siendo a pesar de esto escasas, pero también presentes en la parte intermedia y superior), esta característica es más

visible en aquellos afloramientos más cercanos al cráter del Misti, mientras que en los afloramientos distales esta característica algunas veces no es evidente.

El tamaño máximo del eje mayor de escoria y/o pómez encontrada tiene un máximo de 8.2 cm y un mínimo de 3 cm.

Los líticos presentes son grises oscuros (20%) angulares a subangulares y pardos grisáceos (5%) sub angulares.

4.1.2. Capa Intermedia entre el “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

La capa intermedia en la mayoría de los casos se localiza entre los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”. En estos casos mantienen en los afloramientos ciertas características descritas en el siguiente párrafo, pero en algunos casos solo se ha identificado el “Sandwich Superior” o “Sandwich inferior”, en los cuales no es posible diferenciar.

Esta capa generalmente es material retrabajado de la caída del “Sandwich Inferior”, por tal, está compuesta por una matriz fina limosa, que engloba: pómez, escorias (subredondeados a redondeas) y líticos (sub angulares) milimétricos escasos. El porcentaje de pómez, escoria y líticos con respecto a la matriz fina limosa es de 1% a 3%. Esta capa en raras ocasiones es paleosuelo de material fino limoso.

El espesor de la capa es variable y aleatorio, siendo en promedio de 3 a 6 cm, pero llegando raramente a medir hasta 15 cm. Se tiene afloramientos en la zona proximal con espesores de hasta 6 cm y en la zona distal de hasta 10 cm, la razón de ello sería la erosión y la geomorfología del terreno.

4.1.3. “Sandwich Superior”

El depósito de caída del “Sandwich Superior” se caracteriza encontrarse menos preservada, incompleta, retrabajada y en algunos casos alterada (patina rojizas y blancas); sin embargo, se observa que tiene un buen sorteo sin gradación. La parte superior de la capa suele presentar pómez retrabajados (subredondeados a redondeados). Está constituido por escorias (65%), pómez (5%) y líticos (30%). Los espesores encontrados varían desde 31 cm (zona proximal) a 8 cm (zona distal).

Las escorias contienen un 30 % de vesículas subredondeadas a irregulares, con cristales de anfíboles y piroxenos (1 a 3%). Similar al “Sandwich Inferior” algunas escorias (~7%) muestran bandas blancas, que sugieren procesos de mingling distribuidas en toda la capa.

Las pómez son de color blanco grisáceo, presentan una textura microvesicular (~20% de vesículas), con cristales de piroxeno (<1%). En el depósito se observa que las pómez tienen cierta abundancia en la parte inferior de la capa, pero a comparación del “Sandwich Inferior” es más escasa, en afloramientos proximales esta característica es más evidente y en los distales raramente lo es.

El tamaño máximo del eje mayor de escoria y/o pómez encontrada tiene un máximo de 9.8 cm y un mínimo de 4 cm.

Los líticos presentes son grises oscuros (20%), grises claros (9%) y rojizos (1%) sub angulares.

El depósito de caída “Sandwich Superior” casi siempre sobreyace inmediatamente la capa intermedia que lo separa del “Sandwich Inferior”, en el resto de ocasiones en los afloramientos encontrados sobreyace depósitos como el “Rosado” y “Autopista” con capas intermedias de paleosuelo o material retrabajado.

4.2. Correlación Cronostratigráfica de Depósitos Cenozoicos del Misti

Los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” son dos de los diez depósitos emplazados desde el Pleistoceno Superior (según [Harpel et al., 2018](#)). Sin embargo, al hacer un recuento desde los estudios de Mariño et al. ([2016](#)), los depósitos del “Sandwich” pertenecerían a dos de 12 depósitos de caída, comenzando por los depósitos del “Fibroso I” 33.8 ka ([Thouret et al., 2001](#)) hasta los depósitos del “2 ka” 2 ka ([Harpel et al., 2011](#)), sin contar los depósitos del siglo XV “Ceniza Pachacútec” (vulcaniano). Cada uno de estos 12 depósitos corresponde a una erupción subpliniana o pliniana, los cuales fueron emplazados mayormente al sur y suroeste del volcán Misti.

Dentro de estos 12 depósitos se tienen otros depósitos volcanoclásticos (caídas, CDP, lahares, avalancha de escombros, etc.) las cuales podemos dividir en dos grupos. El primer grupo de depósitos están mal preservados, retrabajados; generalmente son caídas de pocos centímetros las cuales están presentes en pocos afloramientos (o aún no se han encontrado) y por tal hacer un estudio a detalle de ellos no es posible. El segundo grupo de depósitos están preservados pero debido a su poca presencia y falta de estudio a detalle aún no han sido nombrados y correlacionados dentro de los depósitos del Misti. En general estos depósitos en las columnas estratigráficas realizadas en esta tesis se agruparon con la denominación de “depósitos sin identificar” y se muestran literalmente como: “Flujo de pómez, ceniza y oleadas”, “Flujos de bloques y ceniza”, “Caída de pómez”, “Secuencia de flujos de bloques y ceniza dacíticas y andesíticas”, “Flujos de pómez y ceniza”, “Flujos de bloques y cenizas”, “Caída de lapilli pómez”, “Flujos de escoria con bombas freatomagmáticas”, “Caída de pómez amarillo”, “Flujo de escoria”, “Caída de escoria”, “Caída de pómez – Espuma gris?”, “Caída de pómez – Espuma iridiscente”, “Flujo de pómez y ceniza sobre oleada” ([Figura 14](#)) “Caída de pómez amarillo – Caída sin nombre 1”, “Caída de ceniza”, “Caída de ceniza subyacida por depósitos de pómez ricos en líticos”, “Caída bandeado – Caída sin nombrar 2”, “Caída sin nombrar 3” ([Figura 15](#)).

Es necesario mencionar que cada una de estas doce caídas corresponde a una erupción pliniana o subpliniana, erupción que pudo haber dejado “otros depósitos” como corrientes de densidad piroclástica (CDP) o lahares o avalancha de escombros; como en el caso de la erupción del “2 ka” que dejó además de depósitos de caída, depósitos de lahares y CDP. Por tal dentro de las columnas mostradas en esta tesis podrían encontrarse estos “otros depósitos” pertenecientes al mismo evento eruptivo que dejó una de las doce caídas ya caracterizadas y nombradas. Entonces estos depósitos: podrían figurar dentro del grupo de “depósitos sin identificar”, aun no haber sido descubiertas o simplemente no existir debido a que la erupción solo ha dejado depósitos de caída.

Finalmente, de los trabajos de campo se define que los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” estratigráficamente corresponden a dos de los doce depósitos de caída con mayor presencia en los afloramientos, caracterizados y nombrados del más antiguo al más reciente en la siguiente secuencia: “Fibroso I”, “Sacarosa” ([Cuno, 2019](#)), “Fibroso II”, “Blanco”, “La Zebra”, “Autopista” ([Cacya, 2006](#)), “Espuma gris”, “Espuma iridiscente” ([Harpel et al., 2018](#)), “Sandwich Inferior”, “Sandwich Superior”, “Rosado” y “2 ka” ([Harpel et al., 2011](#)). Como se muestran en las 19 columnas estratigráficas y 35 fotos de campo asociadas a estas ([Anexo II](#)). Las columnas más representativa de las caídas del Misti es la del afloramiento o punto 95-96 ([Figura 19](#), [Figura 20](#) y [Figura 21](#)) y el afloramiento tipo del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” es el punto 71-73 ([Figura 22](#) y [Figura 23](#)), en las cuales los depósitos más comunes o guías son “Autopista”, “Rosado” y “2 ka”.

Figura 19

Columna estratigráfica de un afloramiento representativo de los depósitos de caída del volcán Misti

Columna estratigráfica en carretera camino hacia Charcani Grande
(9,5 km al oeste del cráter del Misti)

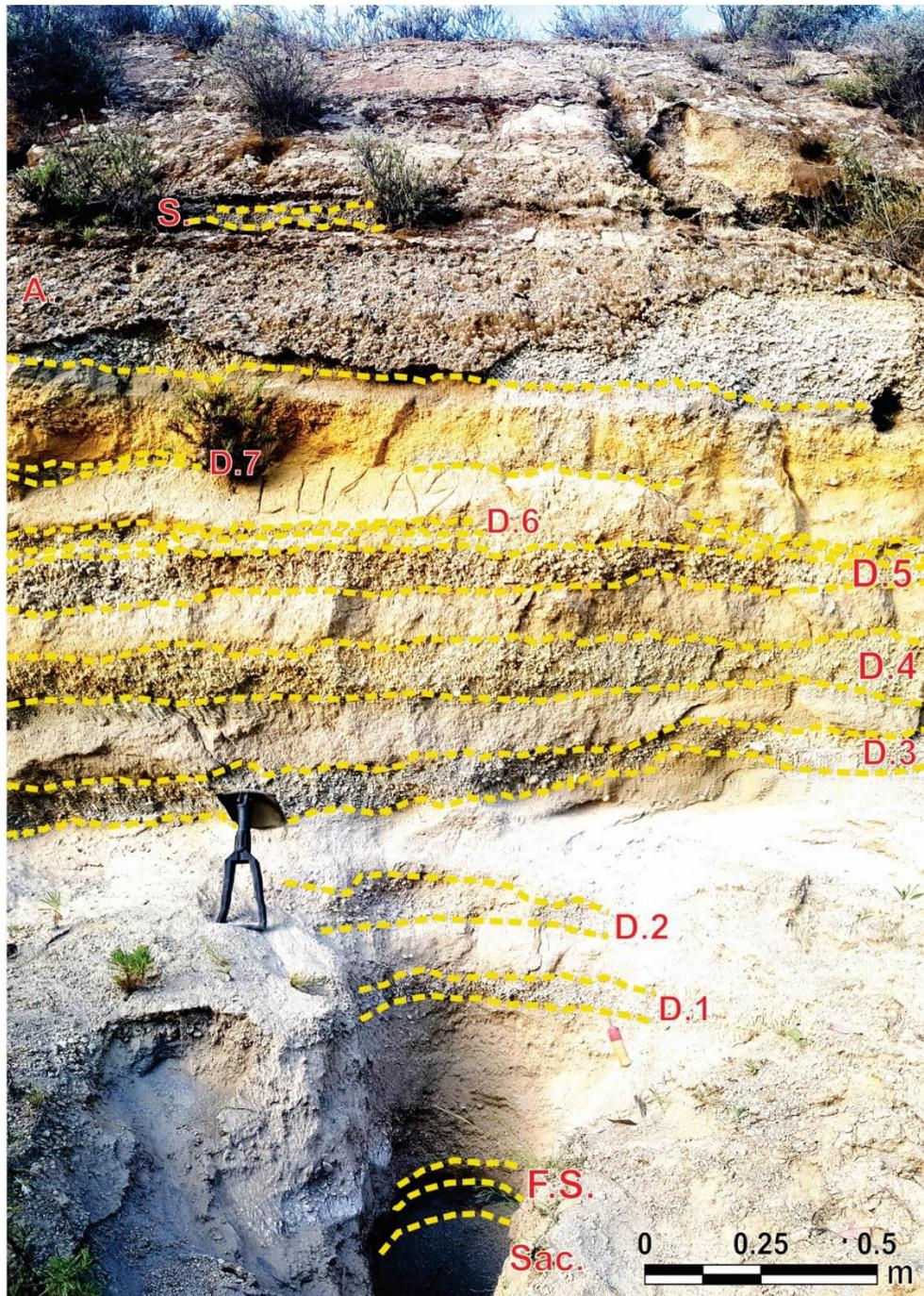
Coordenadas UTM: N 8198279 E 233459 h: 3359 msnm

PTO. 95,96

ESPESOR (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
0.15		Suelo actual.
0.12		Depósito de caída "2 ka". Presenta 5 subniveles diferenciados por la cantidad de líticos, pómez y escorias. Algunas escorias marrón chocolate presentan bandas grises claras la cual evidencia una textura de "mingled". Los fenocristales visibles son anfíboles.
0.30		Depósito de caída no identificado.
0.09		Suelo pardo grisáceo.
0.25		Suelo pardo.
0.30		Depósito de caída "Rosado". Presenta pómez, escoria (60%) y líticos (40%). Algunas escorias presentan textura "mingled". Muchas escorias presentan una tonalidad rosada debido a la oxidación y por la cual la denominación del depósito.
0.15		Suelo con material reabajado.
0.35		Depósito de caída no identificado.
0.08		Suelo con material reabajado.
0.38		(14 cm de espesor) Depósito de caída "Sandwich Superior". Presenta pómez, escoria (72%) y líticos (28 %). Algunas escorias presentan textura "mingled". Los cristales presentes son anfíboles y piroxenos escasos. La parte superior de la capa esta reabajada.
0.04		(10 cm de espesor) Depósito de caída "Sandwich Inferior". Presenta pómez, escoria (78%) y líticos (22 %). Algunas escorias presentan textura "mingled". Las pómez blancas presentan textura microvesicular. Los cristales presentes son anfíboles y clinopiroxenos escasos.
0.15		Depósito de caída "Autopista". Presenta pómez grises predominantes y rosadas (debido a la oxidación) con escasos cristales de anfíboles. La capa del depósito se encuentra sobre una discordancia erosional.
0.56		Suelo gris.
0.08		(8 cm de espesor) Suelo pardo anaranjado con material reabajado.
0.10		(8 cm de espesor) Suelo pardo anaranjado con material reabajado.
0.06		(8 cm de espesor) Suelo pardo anaranjado con material reabajado.
0.15		(8 cm de espesor) Suelo pardo anaranjado con material reabajado.
0.06		(3 cm de espesor) Suelo gris.
0.14		(3 cm de espesor) Suelo gris.
0.13		(3 cm de espesor) Suelo gris.
0.20		Depósito de caída no identificado.
0.21		Suelo pardo.
0.13		Depósito de caída no identificado.
0.25		Suelo pardo claro.
0.14		Depósito de caída de pómez blancas no identificado.
0.18		Suelo.
0.12		Depósito de caída de pómez blancas no identificado.
0.35		Suelo pardo con material reabajado.
0.10		Depósito de caída "Fibroso Superior". Presenta pómez blanquecinas con textura fibrosa y cristales de plagioclasa biotita y anfíbol. Los líticos son abundantes sin gradación.
0.10		(5 cm de espesor) Suelo limoso pardo.
0.14		Ceniza gris oscura con cristales libres.
0.76		Depósito de caída "Sacarosa", la base no es visible por tal el espesor no es el real. Presenta cristales libres de plagioclasa, biotita, anfíbol y líticos escasos; por tal tiene una apariencia asucarada de granos finos.

Figura 20

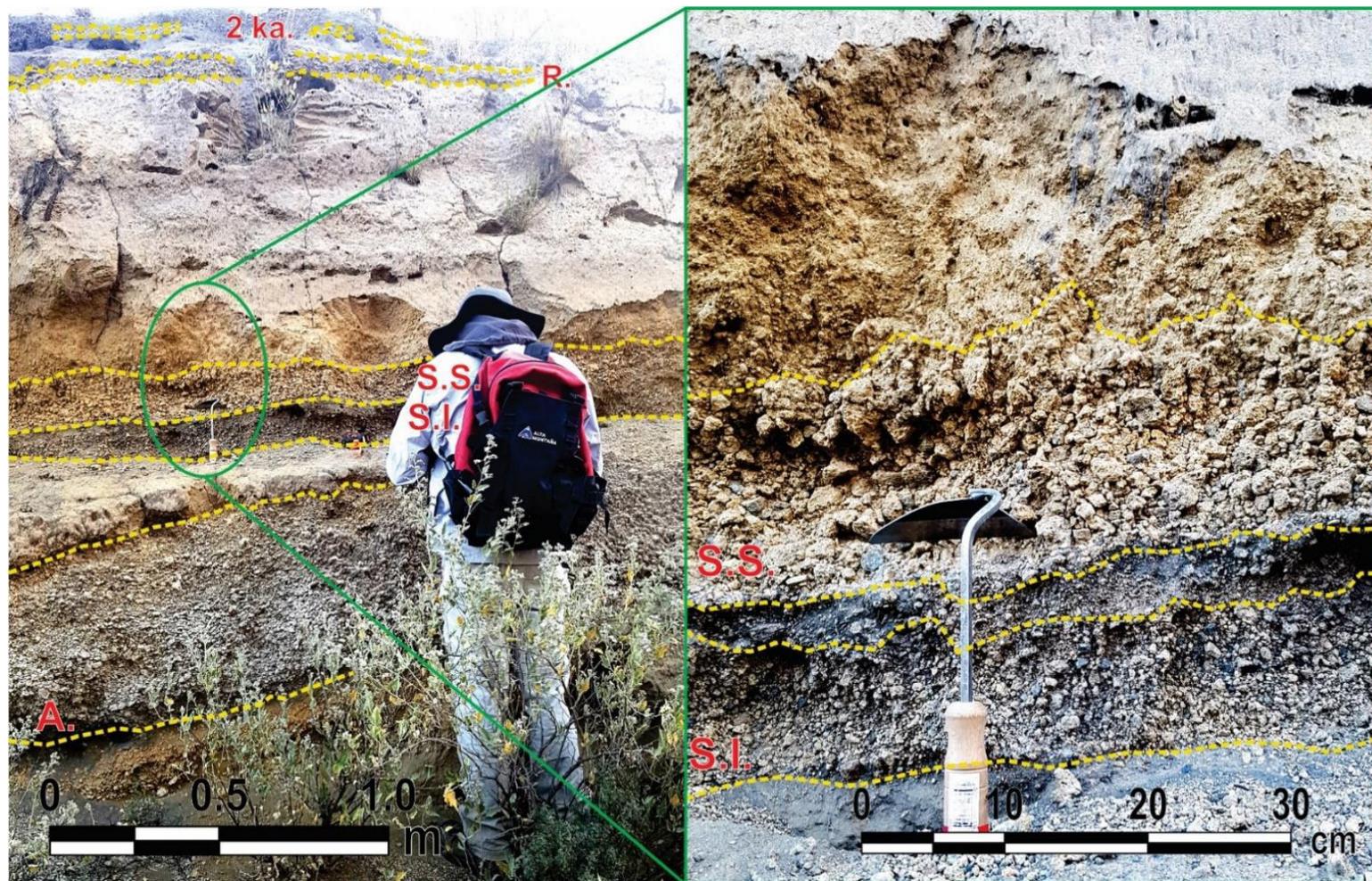
Afloramiento representativo de depósitos de caída de tefra del Misti (>33.7 ka)



Nota: Se observa el “Sacarosa” (Sac.; [Cuno, 2019](#)), seguido del “Fibroso Superior” (F.S.), depósitos aún sin identificar (D.1 hasta D.7), “Autopista” (A.; [Cacya, 2006](#)) y finalmente los depósitos del “Sandwich” (S.). Datos base para la columna del Pto. 95, 96 de la [Figura 19](#).

Figura 21

Afloramiento representativo de caídas del Misti en donde se tienen los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”



Nota: Sección de carretera (~100 m al este de la [Figura 20](#)) donde se muestra depósitos de caída al tope de la columna del pto. 95, 96. a) Se observa “Autopista”, “Sandwich Inferior” (S.I.), “Sandwich Superior” (S.S.), “Rosado” (R.) y “2 ka”. b) Se observa al S.I. bien preservado y la parte superior de la capa del S.S. retrabajado como en la mayoría de los afloramientos.

Figura 22

Columna estratigráfica de un afloramiento tipo de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

Columna estratigráfica cerca a la naciente de la Q. Huarangueros
(5 km al SO del Misti)

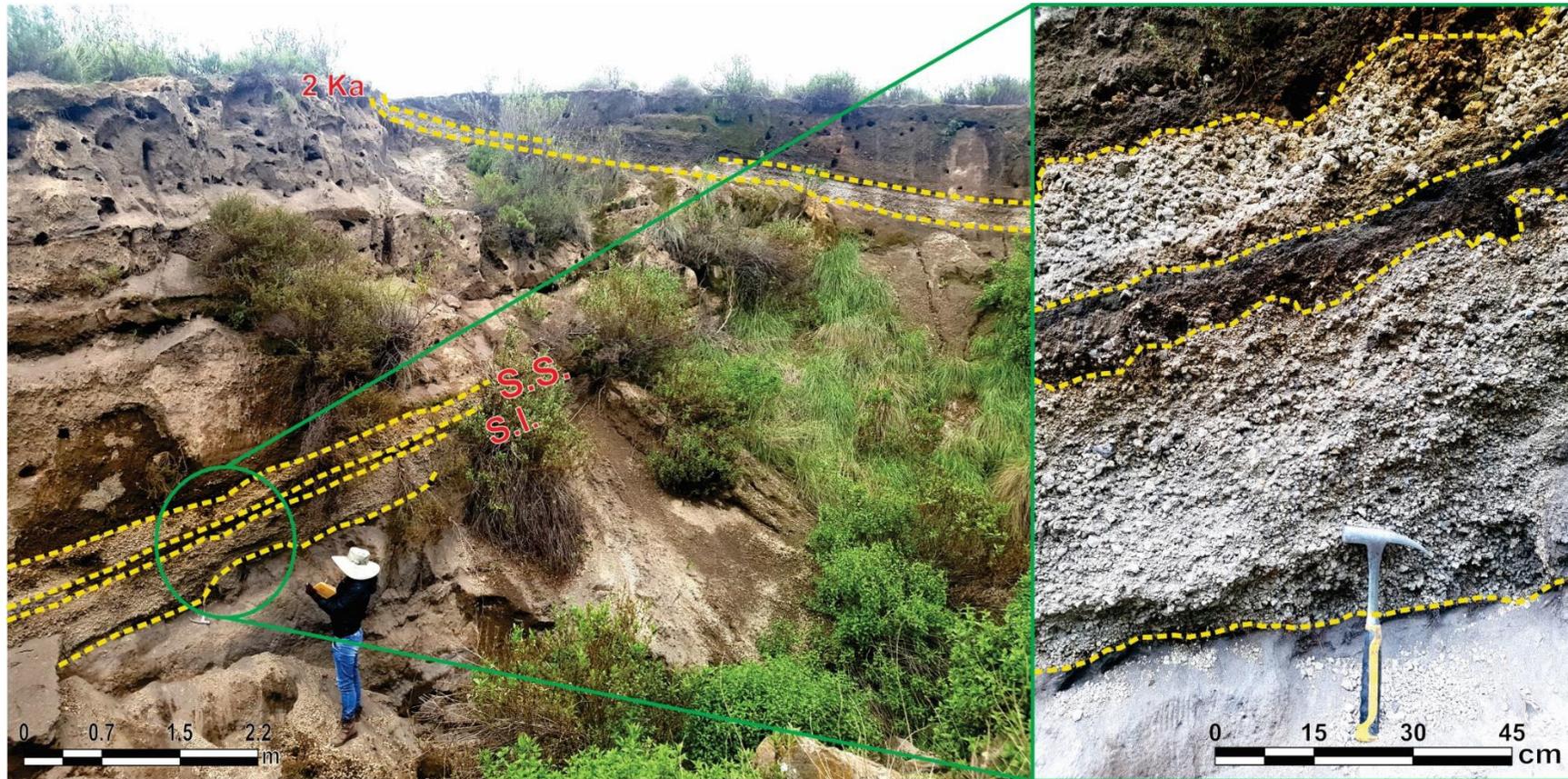
Coordenadas UTM: N 8193172 E 238191 h: 3422 msnm

PTO. 71,73

ESPESOR (m)	LITOLÓGIA	DESCRIPCIÓN
2.00		
0.80		Caída 2 Ka, pómex blancos de hasta 3 cm dividida en 3 láminas en la cual la intermedia contiene líticos grises oscuros. 70% de líticos.
5.00		Discordancia erosional Suelo pardo grisáceo cubierto por plantas y raíces.
0.22		Depósito de caída “Sandwich Superior”, presenta escorias y pómex (75%) y líticos (25%), las escorias (8 % de vesículas, cristales de anfíboles y piroxenos de 1 a 3%) son predominantes (60% con respecto a las pómex), los pómex (10% de vesículas, cristales de anfíboles <1%) son blancos grisáceos tienen una concentración en la parte inferior. Se ha encontrado escasas escorias con presencia de mingling.
0.15		
0.51		Depósito de caída “Sandwich Inferior”, presenta pómex y escorias (65 %) y líticos (35%), las escorias (marrones, vesículas 20 - 15 %, cristales de anfíboles muy escasos) son predominantes en la parte intermedia y superior (80% con respecto a las pómex blancas), las pómex blancas (2 % de vesículas, cristales finos de anfíboles <1%) tienen una concentración en lamina muy fina en la parte inferior. Los líticos son de un solo tipo gris oscuro en la parte intermedia y superior (ligera gradación inversa).
2.12		Suelo de color gris oscuro, presenta clastos grises oscuros y rojizos pequeños predominantes de hasta 3 cm y algunos clastos grandes de hasta 15 cm dentro de una matriz limosa (65%) sin gradación

Figura 23

Afloramiento tipo de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”



Nota: a) Sección en las nacientes de la quebrada San Lázaro, se observan los depósitos del “Sandwich Inferior” (S.I.), “Sandwich Superior” (S.S.) y “2 ka”. b) Se observa al S.I. bien preservado, en el cual se halla una concentración de pómez a la base al igual que en la S.S.. Datos base para la columna del Pto. 71, 73 de la [Figura 22](#).

4.2.1. Distribución de los Depósitos Piroclásticos

En general, para determinar la distribución de depósitos piroclásticos se proponen tres zonas: zona proximal, medial y distal. Estas se basan en la definición de zonas propuesta por Pyle (1989) donde se distingue en base a inflexiones (cambios de pendiente) en el gráfico “ln(espesor) en metros” vs “la raíz cuadrada del área en km” ya que esto nos indica cambios de decrecimiento exponencial, lo que se refleja en el cambio de componentes o materiales de los depósitos. Fierstein y Nathenson (1992) realiza un ajuste en la curva exponencial del diagrama de Pyle (1989), sus resultados corroboran los límites de zonas o segmentos propuestas por Pyle. Estos datos están basados en los mapas de isópacas (Fig. 7.1.2.1. y 7.1.2.2., capítulo 7).

Para los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” se ha encontrado un comportamiento lineal sin puntos de inflexión en ambos gráficos (Pyle, 1989; y Fierstein and Nathenson, 1992), esto nos indica que los depósitos solo corresponden a un segmento inicial o zona proximal, lo cual se contrasta fácilmente con los datos en los mapas de isópacas. Como en el caso del “Sandwich Inferior”, la isópaca mayor de 8 cm alcanza los 14.4 km hacia el SSO de distancia del cráter y en el caso del “Sandwich Superior”, la isópaca mayor de 8 cm alcanza los 15.3 km hacia el SO de distancia del cráter del Misti. Estas distancias físicamente no tienen variaciones significativas en los componentes de los depósitos por tal se corrobora con los resultados de los gráficos de Pyle (1989).

Por tesis como la de Japura (2018) con los depósitos del Huaynaputina vemos que el primer segmento o zona puede abarcar en ese caso hasta los 32 km, para otros depósitos esto variara de acuerdo a la geografía, parámetros físicos, químicos y ambientales que involucran a las erupciones ligadas a esos depósitos.

Generalmente es plausible considerar tres zonas (proximal, medial y distal) como en la tesis de Cuno (2019) para los depósitos de caída de tefras del “Sacarosa”, a pesar que no se corroboren con los gráficos de Pyle (1989) y Fierstein y Nathenson (1992), teniendo como fundamentos la simple agrupación de los afloramientos encontrados respecto a la distancia del cráter.

Para esta tesis en los depósitos del “**Sandwich Inferior**” se consideran dos zonas: una **proximal** (<12.7 km hacia el cráter), con depósitos de 60, 50, 40, 30, 25 y 20 cm de espesor, y una **distal** (>12.7 km hacia el cráter), con depósitos de 20, 10 y 8 cm de espesor, debido al comportamiento bimodal de dispersión de los depósitos según el mapa de isópacas. De forma similar para los depósitos del “**Sandwich Superior**” se consideraron dos zonas, una **proximal** (<9.5 km hacia el cráter), con

depósitos de 30, 25 y 20 cm de espesor, y una **distal** (>9.5 km hacia el cráter), con depósitos de 10 y 8 cm de espesor.

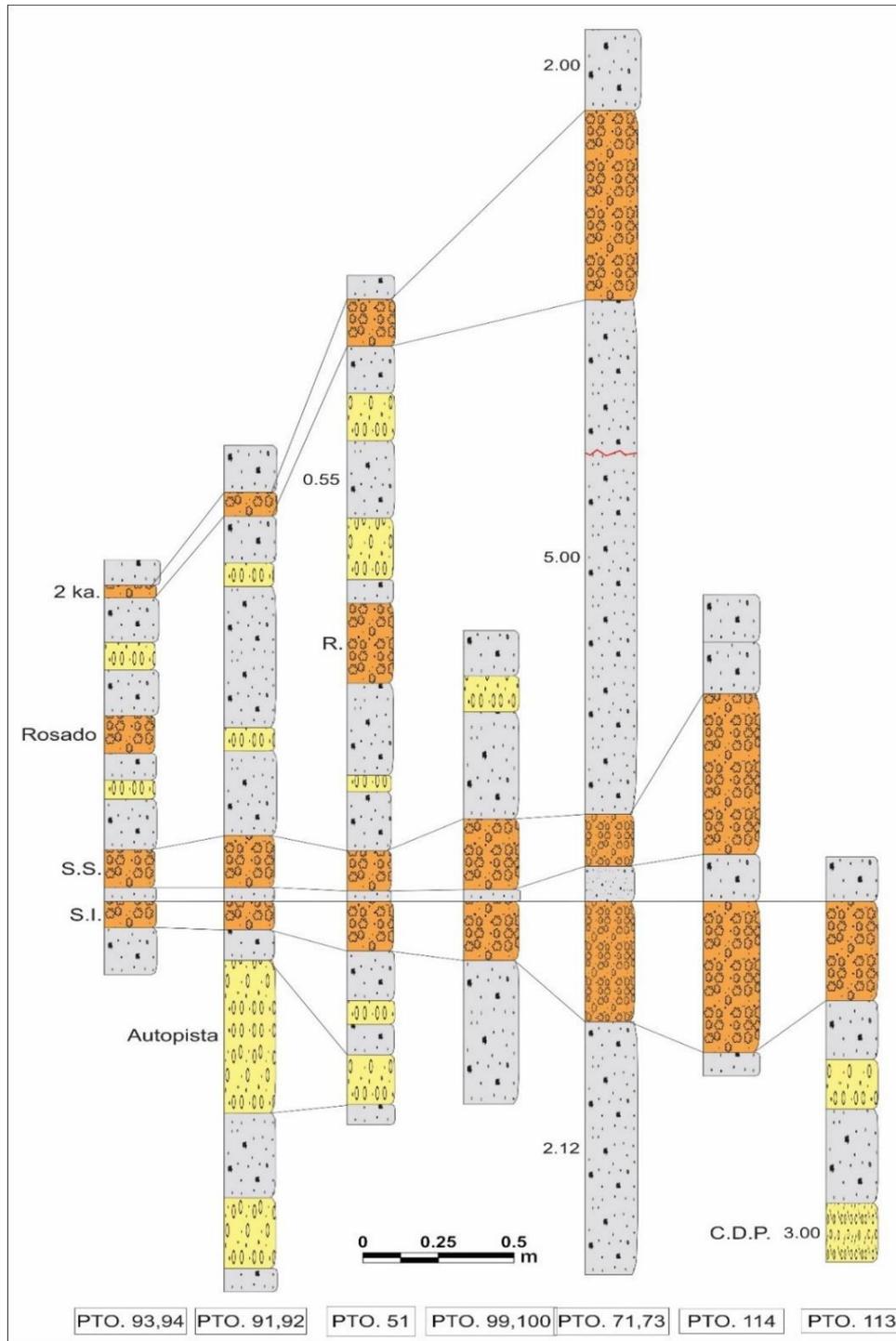
En el trabajo de campo se han realizado 22 columnas estratigráficas ubicadas según el mapa de ubicación de puntos de afloramiento ([Figura 26](#)).

En la **zona proximal**, se tienen los depósitos de caída más característicos del Misti como: “Autopista”, “Sandwich Inferior”, “Sandwich Superior”, “Rosado” (menos común y aún sin estudiar) y los depósitos “2 ka” ([Figura 24](#)), intercalados con depósito de caída de pómez aún sin identificar además de una corriente de densidad piroclástica rosácea (Pto. 113).

En la **zona distal**, se tienen depósitos además de los ya encontrados en la zona proximal, aquellos que son ocasionalmente vistos en algunos afloramientos y que sin contar el “Sacarosa” ([Cuno, 2019](#)) y las cenizas del Huaynaputina (Hy.), aún faltan ser estudiados. Estos son: posible Autopista o similar (P.A.), “Zebra”, “Fibroso Superior”, corrientes de densidad piroclástica pardo rosáceo (C.D.P.), corriente de densidad piroclástica de bloques y ceniza (C.D.P. B.C.) y lahares (L.) como se observa en la [Figura 25](#).

Figura 24

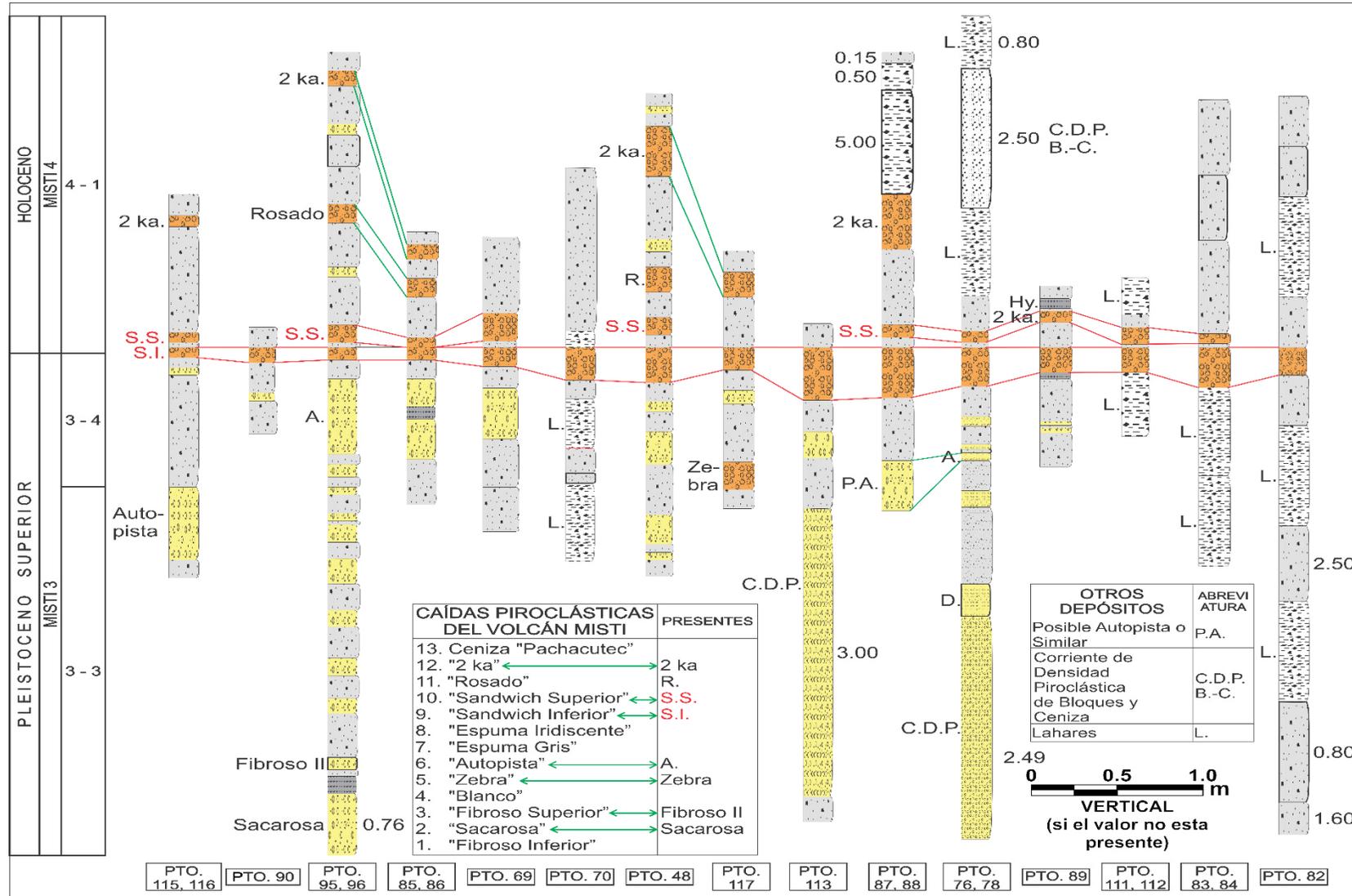
Correlación de columnas estratigráficas de la zona proximal de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” (S.I. y S.S)



Nota: Principales depósitos del volcán Misti, “2 ka.”, “Rosado” (R.), “Autopista” y corrientes de densidad piroclástica (C.D.P.). Los números al costado en algunas capas de los depósitos indican el espesor real.

Figura 25

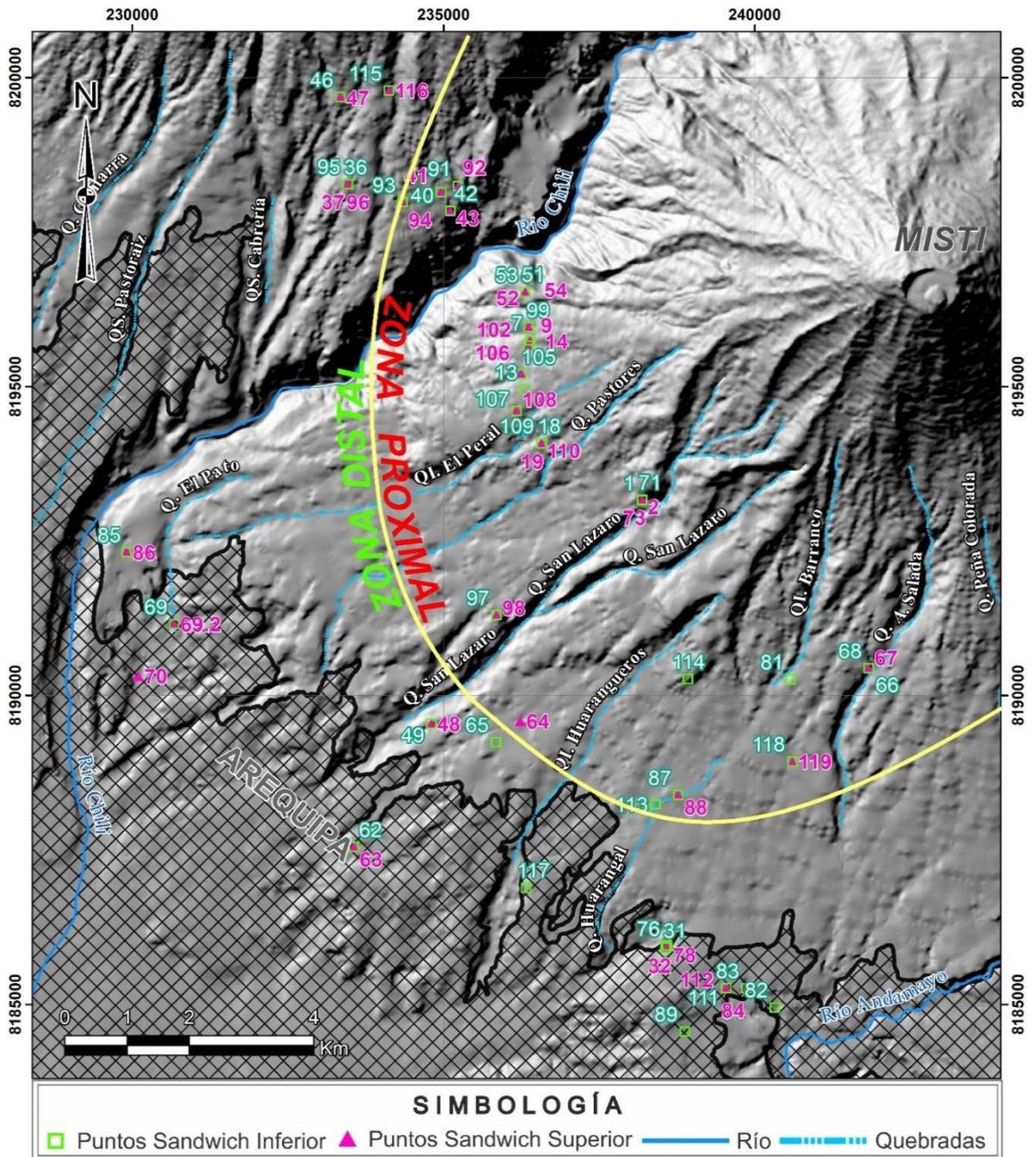
Correlación de columnas estratigráficas de la zona distal de los depósitos del "Sandwich Inferior" y "Sandwich Superior"



Nota: Los números al costado en algunas capas de los depósitos indican el espesor real.

Figura 26

Mapa de ubicación de puntos de afloramiento (38 para el SI y 33 para el SS)



Nota: En algunos puntos se realizaron columnas estratigráficas. Todas las columnas realizadas involucran los depósitos del “Sandwich Inferior” y/o “Sandwich Superior”, además de otras caídas del volcán Misti.

4.3. Análisis Granulométrico de los Depósitos de Caída Piroclástica

El análisis granulométrico se usa como principal fuente de datos para caracterizar la población y examinar las variaciones en el tamaño de grano de los depósitos piroclásticos no consolidados ([Walker, 1971](#)). A partir de las características sedimentológicas del depósito se pueden encontrar relaciones entre la dispersión y su dinámica eruptiva.

El método para la obtención de datos es el cribado, con las variables de porcentaje en peso de la muestra ($W\%$) y la escala phi (para el tamaño de abertura de la malla usada) que representa el tamaño de los fragmentos, se analizan estadísticamente a través de la mediana, media, desviación estándar, asimetría y curtosis.

Los parámetros granulométricos empleados son los de Inman ([1952](#)), Folk and Ward ([1957](#)), Folk ([1965](#)) y Cas & Wright ([1987](#)). La escala phi, fue definida por Krumbein ([1934](#)) como el Logaritmo negativo en base 2 del tamaño de grano en milímetros:

$$\Phi (\phi) = -\log_2 N,$$

donde: N = tamaño de grano en mm ó la apertura de cada malla en mm.

4.3.1. Metodología

El cribado ha sido realizado en las instalaciones del Observatorio Volcanológico del INGEMMET (Arequipa), utilizando 17 mallas o tamices de diámetros: 31.5 (-5 Ø), 22.4 (-4.5 Ø), 16 (-4 Ø), 11.2 (-3.5 Ø), 8 ((-3 Ø), 5.6 (-2.5 Ø), 4 (-2 Ø), 2.8 (-1.5 Ø), 2 (-1 Ø), 1.4 (-0.5 Ø), 1 (0 Ø), 0.710 (0.5 Ø), 0.500 (1 Ø), 0.250 (2 Ø), 0.125 (3 Ø), 0.063 (4 Ø) y <0.063 (5 Ø) mm., una balanza electrónica Ohaus, bolsas de plástico con cierre hermético y bol de 25 cm de diámetro ([Figura 27](#)).

Figura 27

Materiales para realizar el cribado de muestras piroclásticas



Nota: a. Balanza electrónica Ohaus modelo cp4102. b. Tamiz (“Sieve”). c. Bolsas con cierre hermético. d. Bol (recipiente de porcelana cóncava de 25 cm de diámetro).

Los datos obtenidos del cribado son representados gráficamente en histogramas y curvas para visualizar de una manera simple la distribución granulométrica. Las partículas más grandes corresponden a valores negativos de Φ , por lo tanto, las partículas más finas tendrán valores positivos.

Para graficar los histogramas se utilizó el software SFT Kware ([Wohletz et al., 1989](#)) de acuerdo con el método de fragmentación y transporte secuencial (Sequential Fragmentation SFT por su sigla en inglés). Esta teoría es aplicada a depósitos volcánicos y puede brindar desde el punto de vista físico información sobre procesos de fragmentación y transporte, permitiendo obtener una visión más clara del dinamismo y estilos eruptivos a partir de la granulometría ([Wohletz et al., 1989](#)).

4.3.2. Procedimiento

Las muestras fueron pesadas para luego cuartearlas a un peso entre 400 y 600 gr (la muestra cuarteada pesada representa el peso total). Previamente se han ordenado los tamices uno sobre otro de mayor a menor (31.5 mm a 0.063 mm), entonces se coge el bol con la muestra cuarteada y se vierte en el tamiz de mayor diámetro (31.5 mm). Con movimientos de lado a lado sobre los tamices apilados se hacen pasar los fragmentos por las aperturas de las mallas, con cuidado de que los movimientos no fracturen las pómez y/o escorias.

El peso retenido en cada malla (“refus”) en gramos “W(g)” representan un porcentaje del total de la muestra “Wt(%)”, y la apertura del tamiz en “Phi” el tamaño

de cada fracción. Se obtiene así, la relación porcentaje en peso “Wt(%)” versus diámetro de las partículas en “Phi” en la [Tabla 12](#).

El contenido de cada malla se guarda en una bolsa hermética debidamente codificado con el nombre de la muestra, el tamaño de la malla y el peso.

Tabla 12

Datos tomados del cribado de las muestras de los depósitos de caída “Sandwich Inferior” (SI) y “Sandwich Superior” (SS)

Depósito		SI			SS			SS		
Peso completo (g)		260.3			242.6			406.4		
Muestra Tamiz		MIS-18-30			MIS-18-31			MIS-18-08P2		
Díametro de tamiz (mm)	Phi (Ø)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)
31.5	-5	0.00	0.00	0.00	22.94	9.47	9.47	73.28	18.07	18.07
22.4	-4.5	5.96	2.29	2.29	28.60	11.81	21.28	308.44	76.04	94.11
16	-4	15.39	5.92	8.21	24.57	10.14	31.42	12.17	3.00	97.11
11.2	-3.5	20.46	7.87	16.09	36.02	14.87	46.29	5.81	1.43	98.54
8	-3	38.24	14.71	30.80	33.29	13.74	60.03	0.41	0.10	98.64
5.6	-2.5	49.47	19.03	49.83	20.09	8.29	68.32	0.15	0.04	98.68
4	-2	33.65	12.95	62.78	13.38	5.52	73.85	0.08	0.02	98.70
2.8	-1.5	34.00	13.08	75.86	6.84	2.82	76.67	0.18	0.04	98.75
2	-1	23.09	8.88	84.74	4.39	1.81	78.48	0.17	0.04	98.79
1.4	-0.5	16.64	6.40	91.14	3.33	1.37	79.86	0.23	0.06	98.84
1	0	9.35	3.60	94.74	2.27	0.94	80.79	0.32	0.08	98.92
0.71	0.5		0.00	94.74		0.00	80.79		0.00	98.92
0.5	1	10.31	3.97	98.71	5.39	2.22	83.02	0.98	0.24	99.16
0.25	2	2.63	1.01	99.72	7.13	2.94	85.96	0.95	0.23	99.40
0.125	3	0.44	0.17	99.89	10.23	4.22	90.18	0.87	0.21	99.61
0.063	4	0.17	0.07	99.95	11.38	4.70	94.88	0.99	0.24	99.86
<0.063	5	0.12	0.05	100.00	12.40	5.12	100.00	0.58	0.14	100.00
Total		259.92	100.00		242.25	100.00		405.61	100.00	

Nota: Las tablas completas se encuentran en el [Anexo III](#).

4.3.3. Parámetros Estadísticos

Mediana (Md-Ø). Es el tamaño de diámetro de grano (en Phi) que divide la distribución total en dos mitades con pesos iguales (50%), recordando que valores negativos de Phi representan partículas gruesas mayores a 1 mm (0 Phi) y los positivos a partículas finas.

$$Md \ Ø = 50\% \text{ población de tamaño de granos ... según Inman (1952)}$$

$$Md \varnothing = \varnothing 50 \dots \text{Según Folk (1965),}$$

La mediana varía respecto a la distancia del cráter. Esto indica que mientras más alejado se encuentre el depósito, la mediana se acerca a los valores positivos (partículas finas), esto se debe a la dispersión de las partículas a causa de la dirección de viento (sotavento)

Media (Mz). Es el tamaño del diámetro promedio (aritmético) de la distribución de granos. Según Folk (1965) para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$Mz = \frac{(\varnothing 16 + \varnothing 50 + \varnothing 84)}{3}$$

Valores positivos de la media indicaran que el tamaño promedio de granos es de partículas finas, mientras que valores negativos indicaran que son partículas gruesas.

Desviación Estándar Gráfica (σ∅). Representa la dispersión dentro de la distribución, por tal también determinara la selección o sorteo según la variación del tamaño de grano dentro de la población. Folk & Ward (1957), Folk (1965) y Cas & Wright (1987) definen intervalos de desviación estándar para determinar el índice sorteo (Tabla 13). Folk (1965) define la desviación estándar según siguiente fórmula:

$$\sigma \varnothing = \frac{(\varnothing 84 - \varnothing 16)}{4} + \frac{(\varnothing 95 - \varnothing 5.5)}{6.6}$$

Tabla 13

Criterios sedimentológicos más usados en base a la desviación estándar gráfica.

Clasificación (σ∅)	Folk & Ward (1957)	Folk (1965)	Cas & Wright (1987)
< 0,35	Muy bien seleccionado	Muy bien sorteado	Muy bien seleccionado
0,35 - 0,49	Bien seleccionado	Bien sorteado	
0,50 - 0,71	Moderadamente seleccionado	Moderadamente bien sorteado	
0,72 - 0,99		Moderadamente sorteado	
1,0 - 1,99	Pobrementemente seleccionado	Mal sorteada	Bien seleccionado
2.0 a 4.00	Muy pobrementemente seleccionado	Muy mal sorteado	Pobrementemente seleccionado
> 4	Extremadamente mal seleccionado	Extremadamente mal sorteado	Mal seleccionado

Nota: Los datos de Cas & Wright (1987) son los más usados para depósitos volcánicos para determinar su grado de selección.

El índice de sorteo es una de las bases para la clasificación de depósitos piroclásticos (las caídas piroclásticas tendrán un buen sorteo). Para su determinación gráfica se tiene en cuenta la zona central y ambas colas de la curva.

Asimetría (SkI). Se establece de la gráfica valores (tamaño de grano) versus frecuencia (ocurrencia en la muestra). Valores de asimetría positiva, tendrán gráficamente un decaimiento de la curva a la derecha de la media (Figura 28), lo cual indica un exceso de partículas de diámetros gruesos (valores de phi negativos). Un valor de asimetría negativa tendrá gráficamente un decaimiento de la curva a la izquierda de la media (Figura 28, asimetría negativa), lo cual indica un exceso de partículas de diámetros finos. Según Folk (1965) se usa la siguiente fórmula para su cálculo:

$$(SkI) \phi = \frac{\phi_{84} + \phi_{16} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 - \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

Los resultados se interpretan en base a los intervalos de la Tabla 14.

Tabla 14

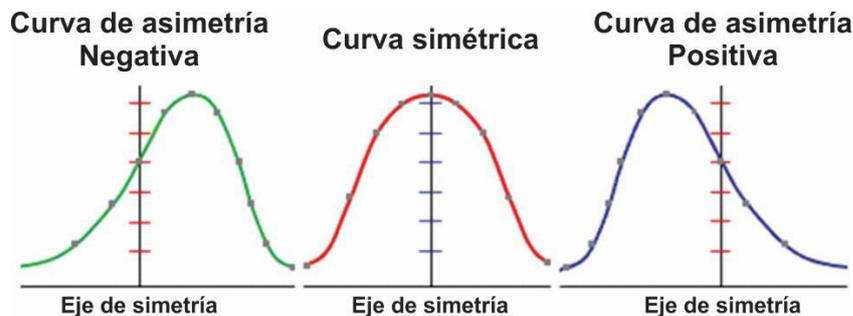
Clasificación de la asimetría (SkI) según sus rangos de valor Phi (ϕ).

Clasificación	Asimetría (SkI)
-1.00 a -0.31	Muy negativa
-0.30 a - 0.11	Negativa
-0.10 a 0.09	Cercanamente simétrica
0.10 a 0.29	Positiva
0.30 a 1.00	Muy positiva

Nota: Datos propuestos por Folk (1965).

Figura 28

Tipos de asimetría según la gráfica de la curva



Nota: El eje de simetría corresponde a la media.

Curtosis (KG) Mide la forma de la parte central de una curva Gaussiana (curva de distribución), es decir “peakedness”. Para su análisis se han establecido básicamente tres rangos de forma, las cuales son: leptocúrticas o puntiaguda (bien seleccionado), mesocúrticas (log normal) y platicúrticas (mal seleccionado) como se observa en la Figura 29. Para su uso en el análisis granulométrico Folk and Ward (1957) han establecido intervalos de clasificación según la Tabla 15. Su expresión matemática tiene la siguiente formula:

$$kG = \frac{(\emptyset 5 - \emptyset 95)}{2.44 (\emptyset 75 - \emptyset 25)}$$

Tabla 15

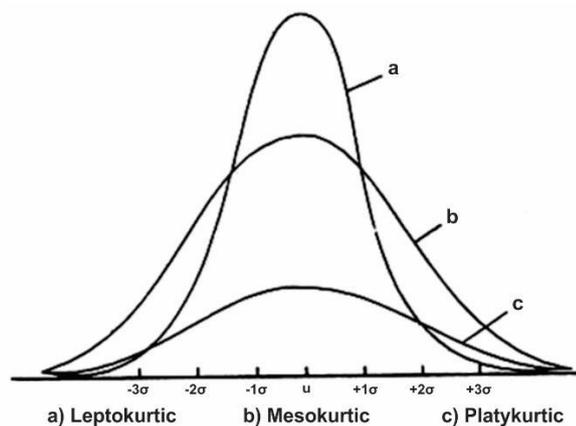
Rangos para la clasificación de la kurtosis (KG)

Clasificación	Kurtosis (KG)
< 0.67	Muy platicúrtica
0.67 - 0.89	Platicúrtica
0.90 - 1.10	Mesocúrtica
1.11 - 1.49	Leptocúrtica
1.50 – 3.00	Muy leptocúrtica
>3.00	Extremadamente leptocúrtica

Nota: Datos propuestos por Folk and Ward (1957) para los diferentes grados de agudeza.

Figura 29

Tipos de Kurtosis según su curva de frecuencia



4.3.4. Resultados de los Parámetros Estadísticos de los Depósitos “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

Los resultados de los parámetros estadísticos obtenidos se muestran en la [Tabla 17](#) y [Tabla 18](#), además de los gráficos de histogramas y curvas de frecuencia en la [Figura 30](#) y [Figura 31](#). Con estos se han evaluado las características de generación y emplazamiento para los depósitos del “Sandwich Inferior” (“S.I.”) y “Sandwich Superior” (“S.S.”).

Para relacionar el tamaño de partículas en mm y el phi con una clasificación por tamaño de componentes primarios de depósitos piroclásticos se ha tomado en cuenta la clasificación de Murcia et al. (2013) según la [Tabla 16](#), la cual ayuda a entender mejor los resultados.

Tabla 16

Clases de tamaño según mm y phi para partículas volcánicas primarias

Límite del diámetro de partícula		Clase de tamaño Volcánico
mm	phi	
2048	-11	Bloque/bomba gruesa(a)
2024	-10	
512	-9	Bloque/bomba medio (a)
256	-8	
128	-7	Bloque/bomba fino (a)
64	-6	
32	-5	Lapilli grueso
16	-4	
8	-3	Lapilli medio
4	-2	
2	-1	Lapilli fino
1	0	Ceniza muy gruesa
1/2	1	Ceniza gruesa
1/4	2	Ceniza media
1/8	3	Ceniza Fina
1/16	4	Ceniza muy fina
1/32	5	Ceniza extremadamente fina
1/64	6	
1/128	7	
1/256	8	
1/512	9	

Nota: Datos según el trabajo de Murcia et al. (2013).

Tabla 17

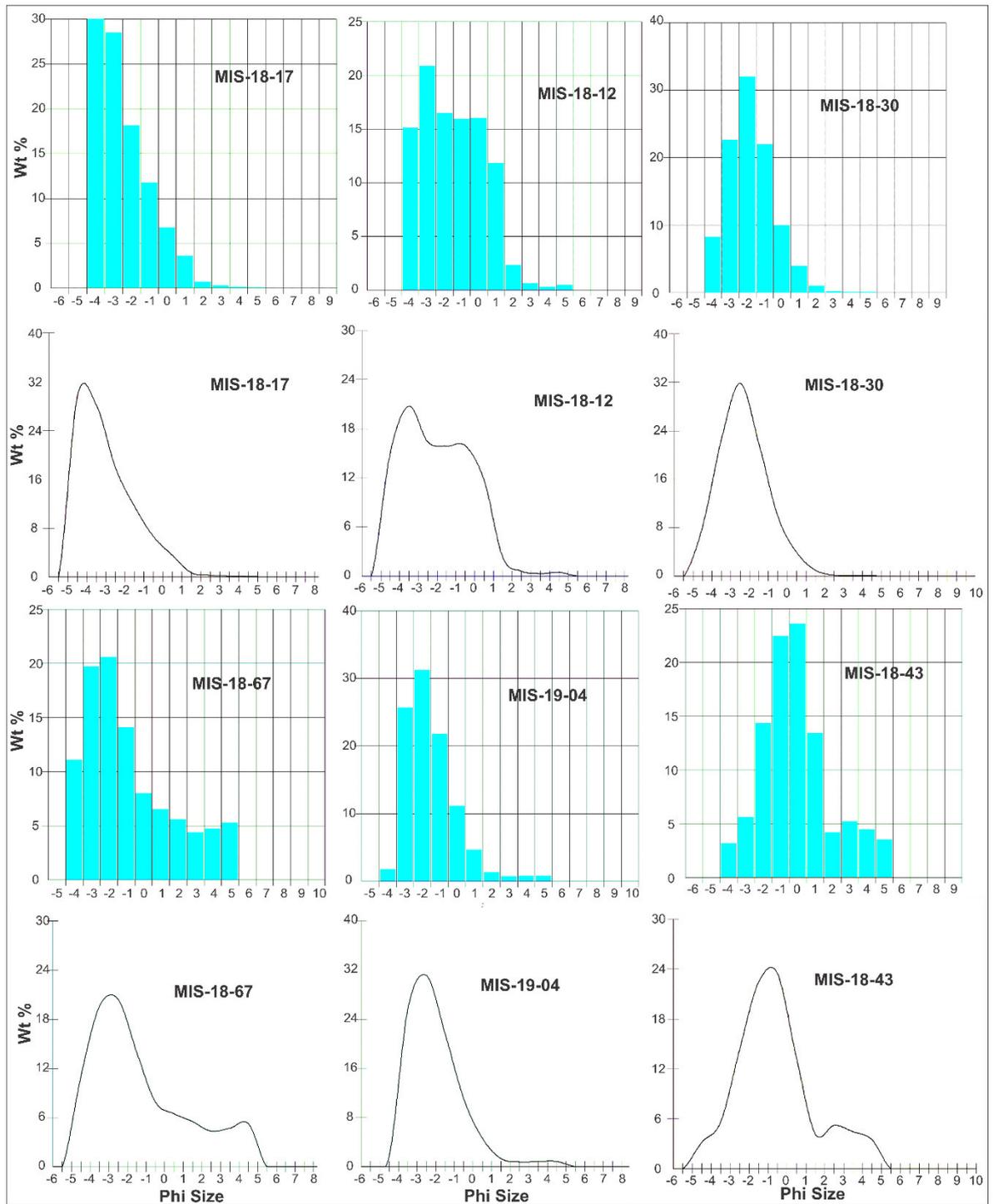
Resultados estadísticos del software SFT Kware para muestras del “S.I.”

MUESTRA	Md- ϕ	Mz	$\sigma\phi$	Skl	KG	SORTEO	C.F.	ZONA
MIS-18-30	-2.45	-2.4	1.33	0.09	1.04	B. s.	m.	D
MIS-18-17	-3.4	-3.13	1.5	0.32	0.98	B. s.	m.	P
MIS-18-12	-2.25	-2.13	1.98	0.1	0.77	B. s.	pl.	P
MIS-19-04	-2.35	-2.2	1.33	0.23	1.04	B. s.	m.	D
MIS-18-67	-2.1	-1.4	2.75	0.4	0.99	P. s.	m.	D
MIS-18-43	-0.85	-0.7	1.88	0.18	1.27	B. s.	l.	D

Glosario: m.: mesocurtica; l.: leptocúrtica; m. l.: muy leptocurtica; P: proximal; D: distal.; B. s.: bien seleccionado; P. s. pobremente seleccionado; M. b. s.: Muy bien seleccionado; C. F.: curva de frecuencia.

Figura 30

Histogramas y curvas de frecuencia para muestras del “Sandwich Inferior”



Nota: Se observa un comportamiento bimodal predominante y unimodal además de una predominancia de Phi negativos lo que indica exceso de partículas gruesas.

Tabla 18

Resultados estadísticos del software SFT Kware para muestras del "S.S."

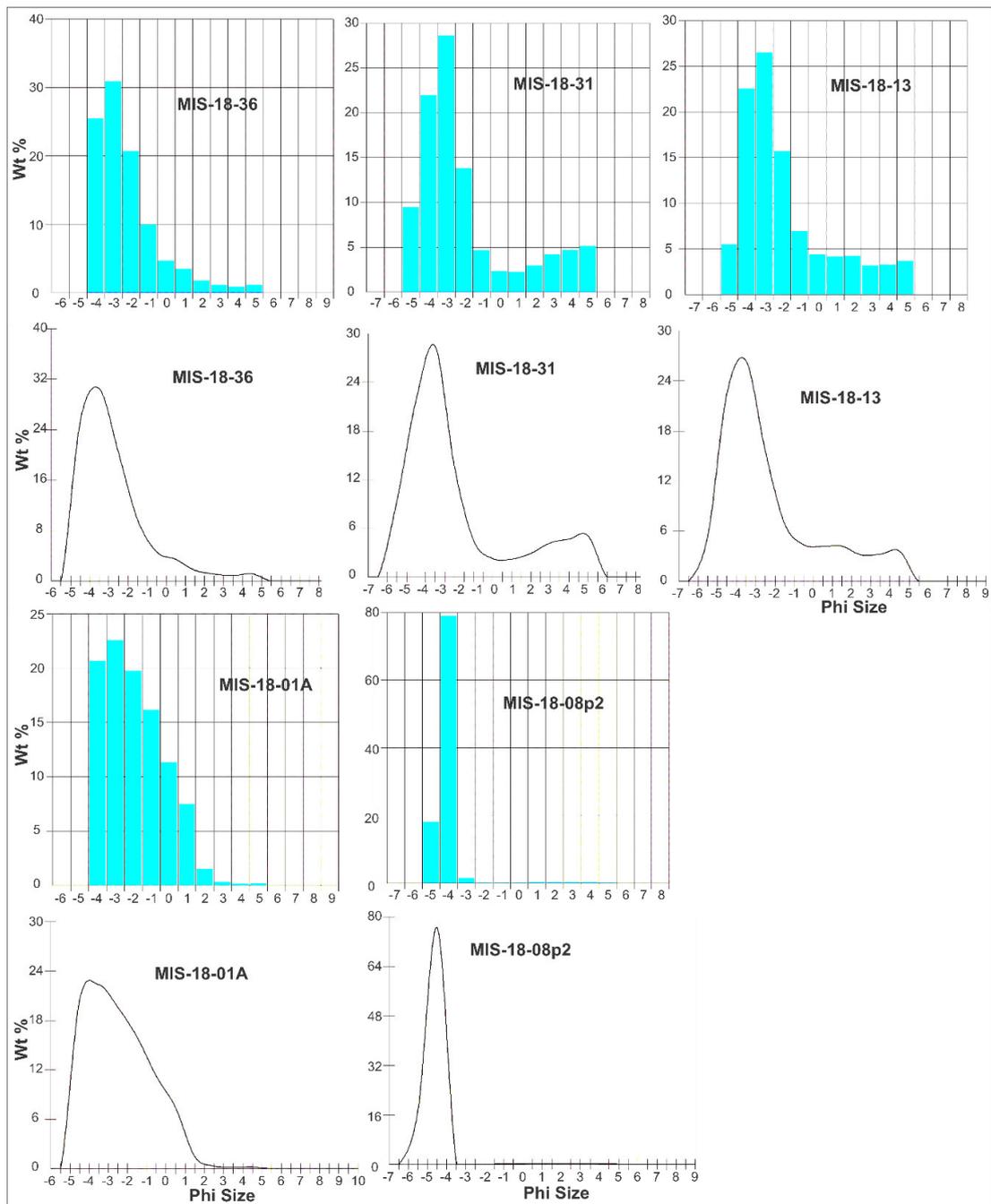
MUESTRA	Md- ϕ	Mz	$\sigma\phi$	Skl	KG	SORTEO	CURVA	ZONA
MIS-18-31	-3.4	-2.27	3.05	0.56	1.55	P. s.	m. l.	D
MIS-18-08p2	-4.65	-4.67	0.52	-0.08	1.05	M. b. s.	m.	P

MIS-18-01A	-2.75	-2.57	1.83	0.18	0.86	B. s.	pl.	P
MIS-18-13	-3.2	-2.4	2.55	0.51	1.28	P. s.	l.	P
MIS-18-36	-3.25	-3.02	1.5	0.33	1.23	B. s.	l.	D

Glosario: m.: mesocurtica; l.: leptocúrtica; m. l.: muy leptocurtica; P: proximal;
 D: distal.; B. s.: bien seleccionado; P. s. pobremente seleccionado;
 M. b. s.: Muy bien seleccionado; C. F.: curva de frecuencia.

Figura 31

Histogramas y curvas de frecuencia para muestras del "Sandwich Superior"



Nota: Se observa un comportamiento bimodal predominante y unimodal además de una predominancia de Phi negativos lo que indica exceso de partículas gruesas.

4.3.5. Interpretación de los Parámetros Estadísticos

Es necesario aclarar que los resultados granulométricos y su interpretación es independiente tanto para el “Sandwich Inferior” como “Sandwich Superior” ya que son depósitos de erupciones distintas. También hay que recordar que se ha establecido dos zonas, proximal y distal, según un criterio abstracto de simple distribución, pero de acuerdo a la definición de zonas propuesta por Pyle (1989) y su diagrama revisado por Fierstein y Nathenson (1992) el comportamiento solo define a una zona proximal para ambos depósitos.

Para los depósitos del **“Sandwich Inferior”** se tiene una distribución unimodal y bimodal (Figura 30).

La mediana (Md) varía de -3.4ϕ a -0.85ϕ indicando una disminución de partículas gruesas según se va alejando del cráter. La media (Mz) varía de -3.13ϕ a -0.7ϕ indicando que el tamaño promedio de granos pertenece al campo de los gruesos.

El sorteo (desviación estándar gráfica “ σ ”) del depósito es bien seleccionado predominantemente con un valor errático de un sorteo pobremente seleccionado.

La distribución de partículas es cercanamente simétrica a asimetría positiva, lo cual indica un ligero exceso de partículas gruesas sobre las finas.

La curtosis (KG) presenta curvas mayormente mesocúrticas que indica una calibración ideal de selección de los depósitos con cierta dispersión a partículas finas o gruesas.

Para los depósitos del **“Sandwich Superior”** se tiene una distribución unimodal y bimodal (Figura 31).

La mediana (Md) varía de -3.4ϕ a -2.75ϕ indicando una disminución de partículas gruesas según se va alejando del cráter. La media (Mz) varía de -4.67ϕ a -2.4ϕ indicando que el tamaño promedio de granos pertenece al campo de los gruesos.

El sorteo (desviación estándar gráfica “ σ ”) del depósito va desde muy bien seleccionado, bien seleccionado predominantemente con un valor errático de un sorteo pobremente seleccionado.

La distribución de partículas es cercanamente simétrica hasta asimetría muy positiva, lo cual indica un exceso de partículas gruesas.

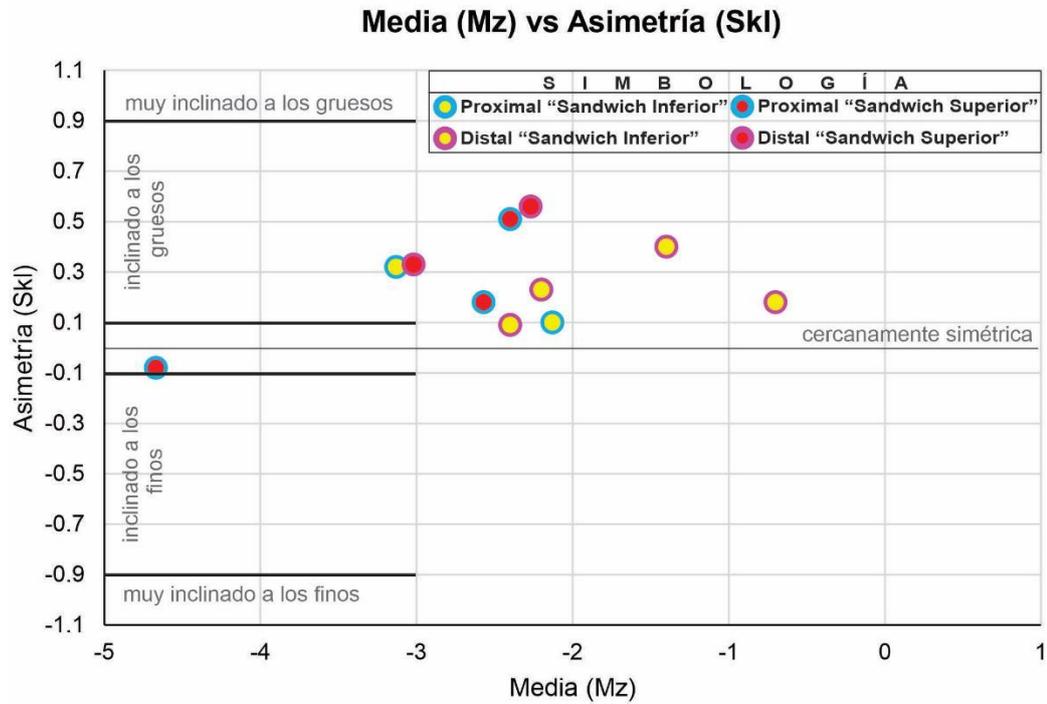
La curtosis (KG) presenta curvas de rango variado desde muy leptocúrticas hasta platicúrticas, lo cual indica una calibración de los depósitos con dispersión a partículas finas o gruesas.

Para entender mejor los parámetros estadísticos se hizo una correlación de ellos como se ven en la Figura 32, Figura 33 y Figura 34. Las diferencias de los depósitos del “Sandwich Inferior” y el “Sandwich Superior” son ligeras ya que ambos

son depósitos de caída de lapilli, sin embargo, existen y son visibles en las correlaciones.

Figura 32

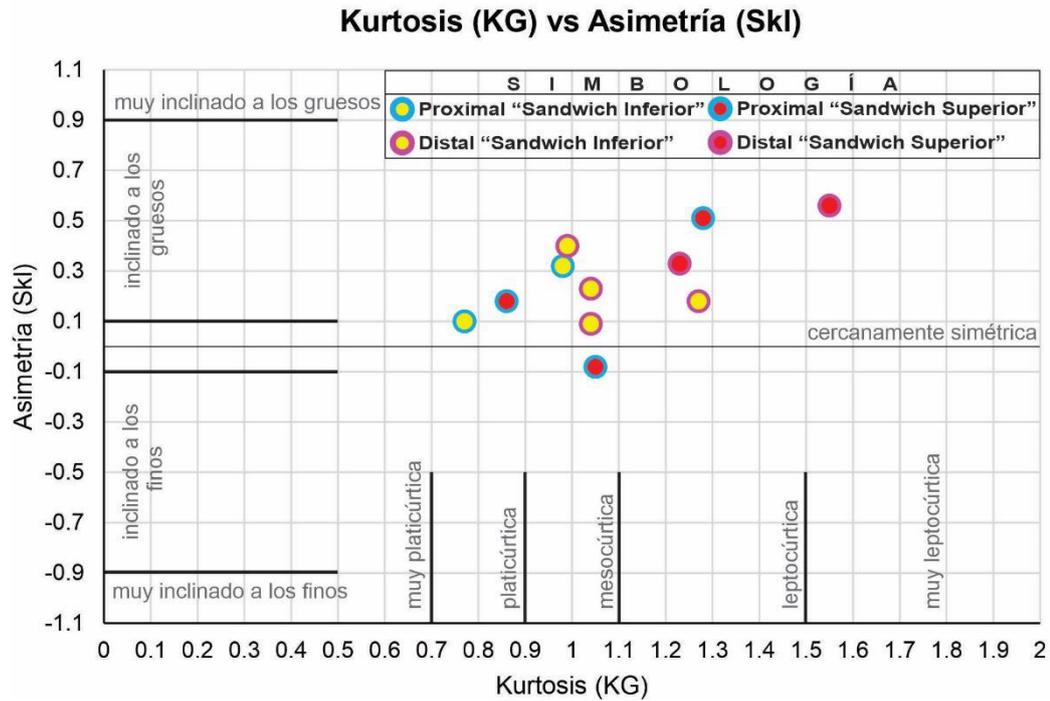
Correlación de Media vs Asimetría para muestras del “SI” y “SS”



Nota: Se observa la ligera inclinación hacia los gruesos, con un tamaño promedio de granos gruesos.

Figura 33

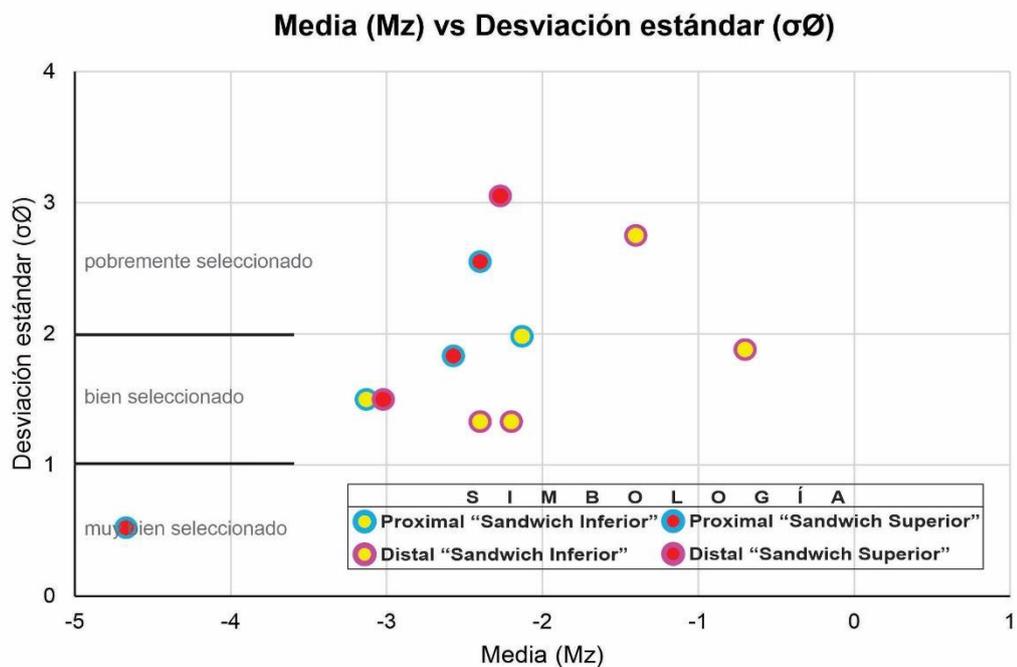
Correlación de Kurtosis vs Asimetría para muestras del “SI” y “SS”



Nota: Se observa la ligera inclinación hacia los gruesos en ambos depósitos con diferencias en las curvas de mesocúrtica a platocúrtica para el "SI" y leptocúrtica para el SS.

Figura 34

Correlación de Kurtosis vs Asimetría para muestras del "SI" y "SS"



Nota: Se observa que el tamaño promedio de granos es grueso predominantemente con valores para depósitos bien seleccionados predominantemente de desviación estándar según Cas & Wright (1987).

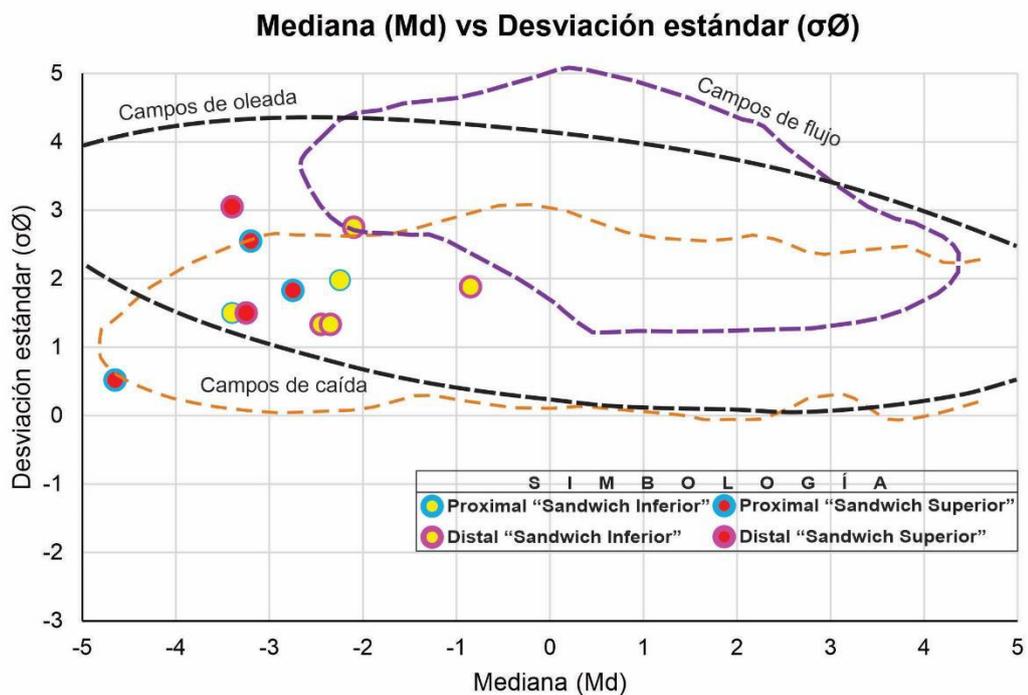
4.3.6. Diagrama de Walker

Es un diagrama para la clasificación de los tipos de depósito piroclástico en función de la correlación mediana ($Md-\phi$) versus desviación estándar ($\sigma\phi$), calculados en unidades phi (Walker, 1971). El diagrama de estos parámetros muestra el proceso por el cual depósitos bien sorteados, se pueden formar a partir de las caídas de tefras, en cambio, los depósitos poco sorteados considerando además si son pobres en fragmentos finos, se pueden formar a partir de flujos y oleadas piroclásticas.

Los depósitos “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” son producto de caídas de tefra, el uso de los resultados de los parámetros estadísticos de la mediana y la desviación estándar en el diagrama de Walker (1971) lo reiteran como se observa en la Figura 35.

Figura 35

Diagrama de Walker para muestras del “S.I.” y “S.S.”, con los campos establecidos para diferenciar caídas, oleadas y flujos piroclásticos



Nota: Las líneas entrecortadas fueron establecidas por Walker (1971) e interpretados por Inman (1952). Se observa claramente que los valores de depósitos se correlacionan en los “Campos de caída”.

4.4. Componentes Litológicos de depósitos de Caída Piroclástica

En este apartado se describirán los componentes litológicos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” y en el apartado “4.4.1.” la proporción de ellos en base

al conteo de granos. Considerando que los componentes litológicos se dividen en dos grupos:

a. Componentes *Juveniles*

Originados por el magma que será expulsado de forma explosiva. Siendo estos tefras (pómez y/o escorias), cristales, vidrio volcánico y líticos cogenéticos (líticos juveniles).

b. Componentes No Juveniles (líticos no juveniles)

Líticos cuya composición no es la del magma que origino la erupción explosiva los cuales se dividen en:

- Líticos xenolíticos: Fragmentos de rocas volcánicas, metamórficas y sedimentarias que conformaron el sustrato del estratovolcán
- Líticos accesorios: Fragmentos de rocas que conformaron el cono volcánico de composición andesítica
- Líticos oxidados: Fragmentos lávicos oxidados o hidrotermalizados.

Para los depósitos del “**Sandwich Inferior**”, los componentes litológicos que lo conforman son los siguientes y se pueden ver en la [Figura 36](#) y [Figura 37](#):

Componentes Juveniles

Pómez. Blancas, blancas amarillentas con vesículas escasas subredondeadas muy pequeñas y densas (microvesículas) con cristales de máficos. Algunas están cubiertas por una patina parda rojiza.

Escoria. Marrones oscuras a marrones claras con vesículas subredondeadas a irregulares de regular tamaño con cristales de máficos.

Vidrio Volcánico. De colores transparentes con tonalidades claras predominantes y oscuras pertenecientes a la sección fina (0.125 mm = 3 phi).

Cristales. Formados por fragmentación durante la erupción explosiva del magma con altos contenidos de sílice, principalmente plagioclasas y escasos piroxenos.

Líticos Cogenéticos. Líticos grises oscuros angulares a sub angulares afaníticos, la mayoría con patina arcillosa.

Componentes No Juveniles

Líticos no juveniles. Presenta solo un tipo de líticos no juveniles, pardos grisáceos. Probablemente líticos xenolíticos o líticos accesorios.

Figura 36

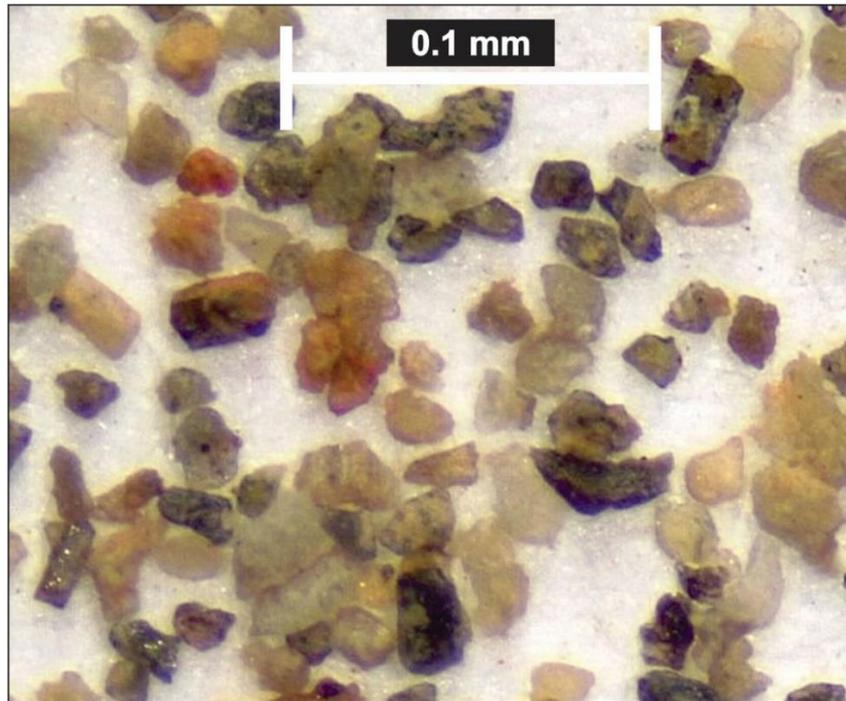
Componentes litológicos de la caída del “Sandwich Inferior” (malla 4 mm)



Nota: a. Escoria. b. Pómez. c. Líticos cogenéticos. d. Líticos no juveniles pardos grisáceos. Muestra Mis-18-67 obtenida del cribado en la malla de 4 mm.

Figura 37

Componentes litológicos de la caída del “Sandwich Inferior” (malla 0.125 mm)



Nota: Cristales de plagioclasa, vidrio volcánico y probablemente clinopiroxenos escasos, además de otros componentes juveniles y líticos. Muestra Mis-18-30 del “Sandwich Inferior”, obtenida del cribado en la malla de 0.125 mm.

Para los depósitos del “**Sandwich Superior**”, los componentes litológicos que lo conforman son los siguientes y se pueden ver en la [Figura 38](#) y [Figura 39](#).

Componentes Juveniles

Este depósito es similar al “Sandwich Inferior”. Presenta escorias predominantemente y pómez con vesículas densas, aunque la densidad es ligeramente menor al “Sandwich Superior” (textura microvesicular) ([Fig. 6.5.4.](#)).

Pómez: Blancas, blancas pardas con vesículas subredondeadas a redondeadas muy pequeñas y densas (microvesículas) con escasos cristales de máficos finos.

Escoria: Marrones oscuras a marrones claras con vesículas subredondeadas, con cristales escasos de máficos.

Vidrio volcánico: Colores transparentes con tonalidades claras predominantes y oscuras. Visibles en la sección fina (0.125 mm = 3 phi).

Cristales. Formados por fragmentación durante la erupción explosiva del magma con altos contenidos de sílice. Principalmente plagioclasas y escasos piroxenos.

Líticos Cogenéticos. Líticos grises oscuros angulares a subangulares predominantes, raramente con patina arcillosa.

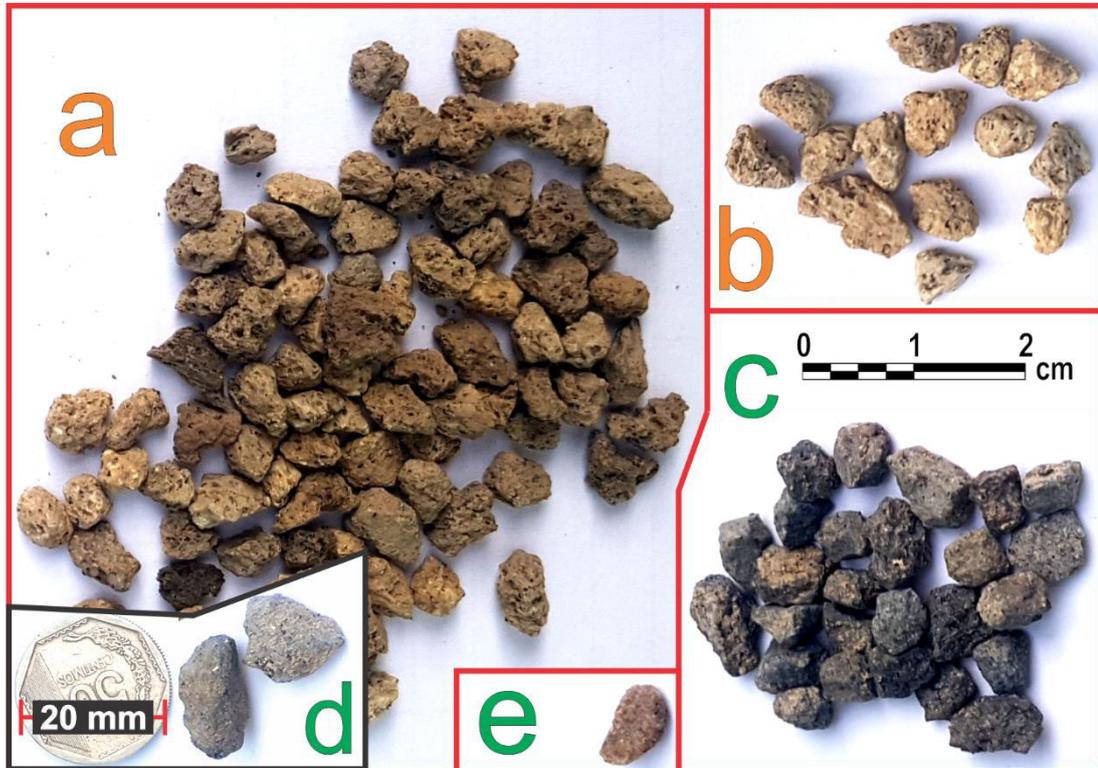
Componentes No Juveniles

Líticos No Juveniles. Líticos grisáceos claros, probablemente líticos xenolíticos o líticos accesorios.

Líticos oxidados: Rojizos con patina arcillosa o limosa.

Figura 38

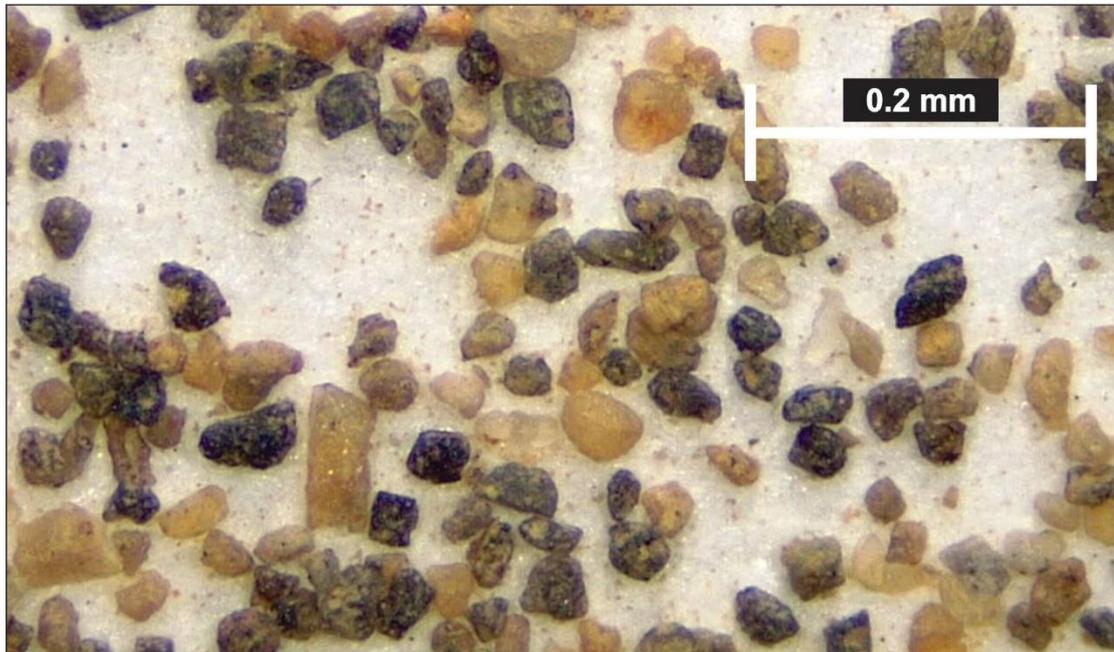
Componentes litológicos de la caída del "Sandwich Superior" (mallas 8 y 4 mm)



Nota: a. Escoria. b. Pómez (vesículas menos densas que el "Sandwich Inferior"). c. Líticos cogenéticos. d. Líticos no juveniles grisáceos claros. e. Líticos no juveniles rojizos. Muestra Mis-18-01A obtenida del cribado en la malla de 4 mm (a, b, c, e) y 8 mm (d).

Figura 39

Foto de componentes litológicos de la caída del "SS" (malla 0.125 mm)



Nota: Cristales de plagioclasa tabulares y vidrio volcánico, además de otros componentes juveniles y líticos. Muestra Mis-18-31, obtenida del cribado en la malla de 0.125 mm.

4.4.1. Proporción de los Componentes Litológicos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

Los componentes predominantes en los depósitos “Sandwich Inferior” como del “Sandwich Superior” son componentes juveniles, escorias y pómez. Además, algunas escorias presentan textura “mingling” (fragmento de escoria con bandas claras) lo cual evidencia la mezcla o inyección de magmas.

Si bien ambos depósitos incluyen en el nombre que se les ha dado el término “Sandwich”, se podría pensar que son un único depósito, queda claro que son depósitos independientes debido a las diferencias encontradas por el conteo granulométrico de muestras (del tamizado o cribado) en las mallas 8, 4, 2, 0.5 y 0.125 mm; evidenciadas en la [Tabla 19](#) y [Tabla 20](#).

Para los depósitos del “**Sandwich Inferior**” los componentes juveniles representan el 77%, 61% de escorias y 16% de pómez. Algo resaltante con respecto a los componentes no juveniles es que no presenta líticos rojizos oxidados o hidrotermalizados ([Tabla 19](#)).

Tabla 19

Proporción de componentes litológicos del “Sandwich Inferior”

Componentes litológicos	8 mm (%)	4 mm (%)	2 mm (%)	0.5 mm (%)	0.125 mm (%)	Promedio
C. juveniles.						
Pómez	42%	15%	5%	10%	7%	16%

Escoria	47%	74%	81%	59%	46%	61%
Mingled	0%	0%	0%	1%	0%	0%
Cristales						
Plagioclasas	0%	0%	0%	3%	2%	1%
Piroxenos o anfíboles	0%	0%	0%	1%	2%	1%
Líticos co-genéticos	11%	11%	14%	20%	26%	16%
Líticos no juveniles						
Xenolíticos o accesorios	1%	1%	0%	6%	13%	4%
Lavicos oxidados o hidrotermalizados	0%	0%	0%	0%	4%	1%

Nota: Se refleja la proporción de componentes litológicos del tamizado en las mallas de 8, 4, 2, 0.5 y 0.125 mm.

Para los depósitos del “**Sandwich Superior**” los componentes juveniles representan el 76%, 61% de escorias y 15% de pómez. Algo resaltante con respecto a los componentes no juveniles es que presenta líticos rojizos oxidados o hidrotermalizados en un 1% ([Tabla 20](#)).

Tabla 20

Proporción de componentes litológicos del “Sandwich Superior”

Componentes litológicos	8 mm (%)	4 mm (%)	2 mm (%)	0.5 mm (%)	0.125 mm (%)	Promedio
C. juveniles.						
Pómez	13%	15%	10%	21%	15%	15%
Escoria	74%	69%	76%	36%	47%	61%
Mingled	0%	0%	0%	1%	0%	0%
Cristales						
Plagioclasas	0%	0%	0%	11%	5%	3%
Piroxenos o anfíboles		0%	0%	0%	1%	0%
Líticos co-genéticos	11%	12%	11%	24%	20%	16%
Líticos no juveniles						
Xenolíticos o accesorios	1%	2%	2%	6%	11%	4%
Lavicos oxidados o hidrotermalizados	0%	2%	0%	0%	1%	1%

Nota: Se refleja la proporción de componentes litológicos del tamizado en las mallas de 8, 4, 2, 0.5 y 0.125 mm.

El porcentaje mayor de escoria a comparación de la pómez en el depósito “Sandwich inferior” puede implicar un mayor volumen del magma más básico (andesítico) en la cámara magmática. En el depósito “Sandwich Superior” aumenta el porcentaje de escorias que puede significar nueva inyección de magma básico. El porcentaje de líticos oxidados puede ser por la presencia de una zona hidrotermalizada en el cráter en el momento de la erupción.

4.5. *Diferenciación por Proporción de Componentes y Análisis*

Granulométrico entre el “Sandwich Inferior” y Sandwich Superior”

Teniendo en cuenta el análisis granulométrico por el método del cribado y sus resultados estadísticos, se concluye que para ambos depósitos los componentes finos tienen menor proporción con respecto a los gruesos, por tal podemos considerar diferencias en el campo de los finos como en el campo de los gruesos.

Para el campo de los gruesos (8, 4 y 2 mm), los resultados del conteo granulométrico revelan dos diferencias considerables entre ambos depósitos. La diferencia principal es la proporción de pómez y escorias. Para el “Sandwich Inferior” el contenido de pómez es de un 20% y escorias 67%, mientras que para el “Sandwich Superior” el contenido de pómez es 13 % y escorias 73%. La diferencia secundaria es la presencia de líticos rojizos para el “Sandwich Superior”. Estos datos sirven para un fácil reconocimiento en campo.

Para el campo de los finos (0.5 y 0.125 mm), los resultados del conteo granulométrico revelan diferencias en la proporción cristales de plagioclasa y piroxenos. Para el “Sandwich Inferior” el contenido de plagioclasas es de 3% y piroxenos de 1.5%, mientras que para el “Sandwich Superior” el contenido de plagioclasas es de 8% y piroxenos 0.5%. En caso de los componentes juveniles la proporción de pómez y escorias se invierte, pero considerando los análisis estadísticos de granulometría podemos subestimar estos resultados, además que en la parte fina el reconocimiento y diferenciación entre pómez y escorias es menos exacta.

4.6. **Cálculo de la Densidad de Tefras**

Los componentes juveniles como las pómez y/o escorias son materiales de muy baja densidad y porosidad lo que les permite viajar de decenas hasta cientos de kilómetros, esto es muy importante al momento de la dispersión de los depósitos de caída de tefra. Por tal el cálculo de densidad de las pómez y escorias es fundamental.

La medición de la densidad para muestras representativas de pómez y escoria, previamente secadas, se realizó por el método de Houghton y Wilson ([1989](#)), el cual involucra la siguiente formula:

$$\rho = \frac{W_{air}}{W_{air} - (W_{water} - (0.04 \times W_{water}^{film}))}$$

Donde: ρ es densidad, W_{air} es el peso la partícula seca, W_{water} es el peso de la partícula sumergida y W_{water}^{film} es el peso de la partícula con parafina.

Cuando se realiza el procedimiento, algunas partículas sobresalen del agua, estas son forzadas usando un peso extra el cual se resta.

4.6.1. Valores de Densidad para los Depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

Para el “Sandwich Inferior” se tiene una densidad de pómez que varía de 1.01 g/cc³ a 1.16 g/cc³, con un valor promedio de 1.09 g/cc³, y para las escorias una densidad que varía de 1.76 g/cc³ a 2.22 g/cc³, con un valor promedio de 1.97 g/cc³.

Para el “Sandwich Superior” se tiene una densidad de pómez que varía de 0.88 g/cc³ a 1.20 g/cc³, con un valor promedio de 0.99 g/cc³, y para las escorias una densidad que varía de 1.12 g/cc³ a 2.16 g/cc³, con un valor promedio de 1.64 g/cc³.

4.7. Petrografía

Se han realizado 34 secciones delgadas de muestras de pómez y escorias de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”, para la caracterización petrográfica minerográfica de cada depósito. Se debe considerar para el tamaño de cristales que los que tengan tamaños mayores a 0.25 mm son considerados “cristales” y aquellos con tamaños menores son microcristales. Las medidas en milímetros son en base al eje o diámetro mayor de cristales y vesículas.

4.7.1. Pómez del “Sandwich Inferior”

Presentan textura porfirítica y matriz microvesicular (24% de microvesículas), constituido por cristales de: plagioclasa (20%), clinopiroxeno (15%), anfíboles (2%) y óxidos de Fe-Ti (3%). Algunos cristales de anfíboles y plagioclasas presentan intercrecimiento. No se ha encontrado líticos accesorios.

Plagioclasa. Cristales subhedrales predominantes a euhedrales. **mayormente libres** y limpios ([Figura 39; A2](#)), algunos con macla polisintética de entre 0.6 mm hasta 1.0 mm ([Anexo V, D2](#)). **Algunos con intercrecimiento** de otras plagioclasas (forma de cruz de 0.6 mm x 0.8 mm) y/o clinopiroxeno ([Figura 40; A2](#)).

Anfibol. Cristales euhedrales predominantes a anhedrales (~0.20 mm) con pleocroísmo (tonalidades de verde), superficie limpia y **aislados**. ([Figura 40; A2](#)).

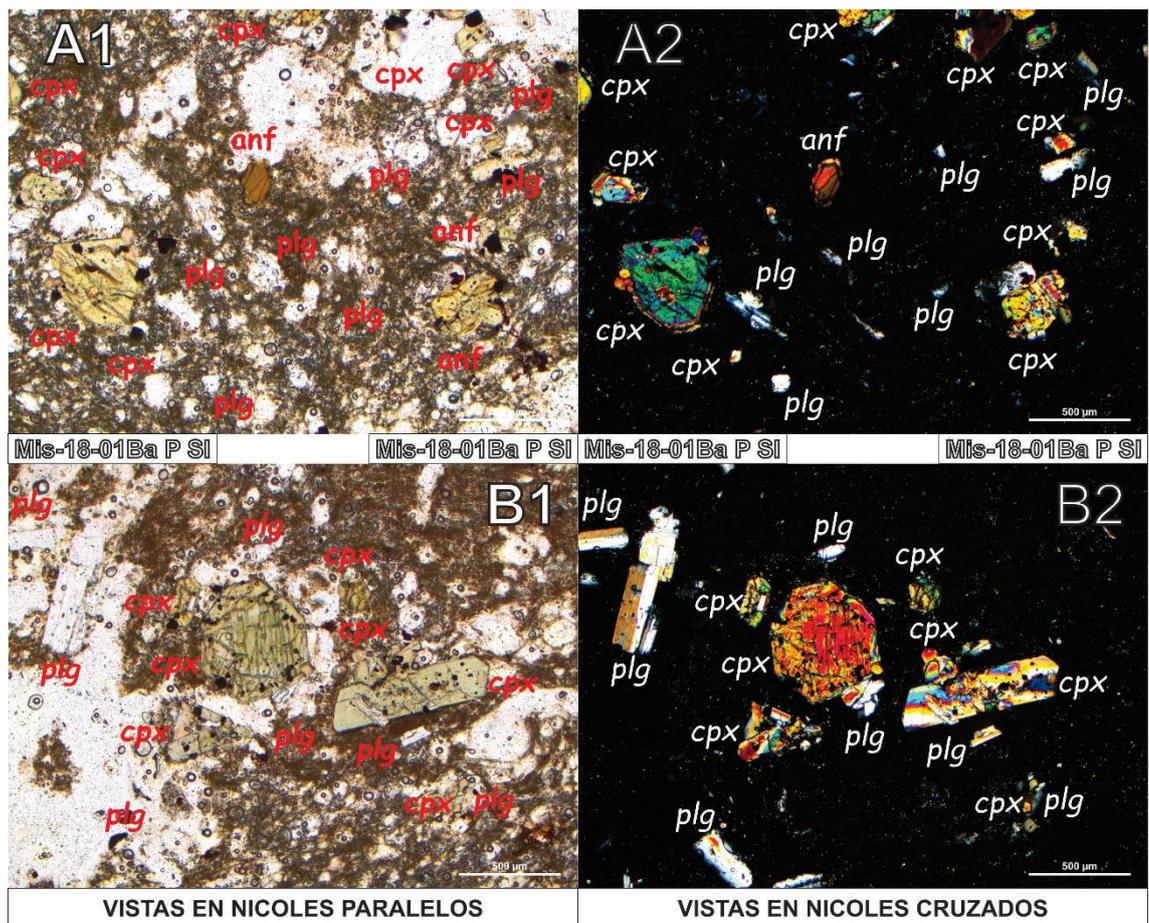
Clinopiroxenos. Cristales subhedrales predominantes a anhedrales, con clivaje y textura tipo sieve (mayormente) de hasta 0.62 mm con **intercrecimiento (mayormente)** de plagioclasas ([Figura 40; B2](#)) y/o otros clinopiroxenos, **algunos aislados** pequeños (~ 0.1 mm). La mayoría de cristales grandes (~0.5 mm) presentan la mayor parte de minerales de óxidos de Fe-Ti como inclusiones.

Matriz. Microvesicular predominante y vesicular de formas subredondeadas desde 0.07 mm hasta 0.25 mm.

Óxidos de Fe-Ti. La mayor parte se encuentra como inclusiones en cristales de clinopiroxeno, el resto se encuentra dentro de la matriz. El tamaño promedio es ~ 0.03 mm.

Figura 40

Vistas en nicoles paralelos y nicoles cruzados de pómez del "Sandwich Inferior"



Nota: Clinopiroxenos (cpx), anfíboles (anf) y plagioclasas (plg). Vesículas subredondeadas (~0.07 mm).

4.7.2. Escoria del "Sandwich Inferior"

Presenta textura porfírica y matriz vesiculada (27%), constituido por cristales de: plagioclasa (19%), clinopiroxenos (16%), ortopiroxenos (1%), anfíboles (1%) y óxidos de Fe-Ti (5%). Se ha encontrado un lítico accesorio en una vista (con cristales de clinopiroxeno y ortopiroxeno), probablemente hallan más.

Plagioclasa. Cristales **aislados** generalmente subhedrales a euhedrales (desde 0.18 mm hasta 0.78 mm) de forma prismática tabular alargada. Mayormente limpias ([Figura 41](#)), con macla polisintética, algunas con zonación. No se ha visto en aglomerados o intercrecimiento.

Clinopiroxeno. Cristales **aislados** subhedrales a anhedrales **predominantes** (desde 0.2 mm hasta 0.62 mm) con clivaje paralelo casi siempre visible o fracturas ([Anexo V, F2-G2](#)). Algunas presentan macla simple (augita) ([Anexo V, F2](#)). Algunas se ven en intercrecimiento con otros clinopiroxenos o ortopiroxenos (ambos escasos), ([Figura 41](#)). La mayoría de cristales grandes (~0.5 mm) presentan la mayor parte de minerales de óxidos de Fe-Ti como inclusiones.

Ortopiroxenos. Cristales **aislados**, escasos encontrados, euhedrales a subhedrales con clivaje. Tamaños de 0.1 mm y 0.35 mm.

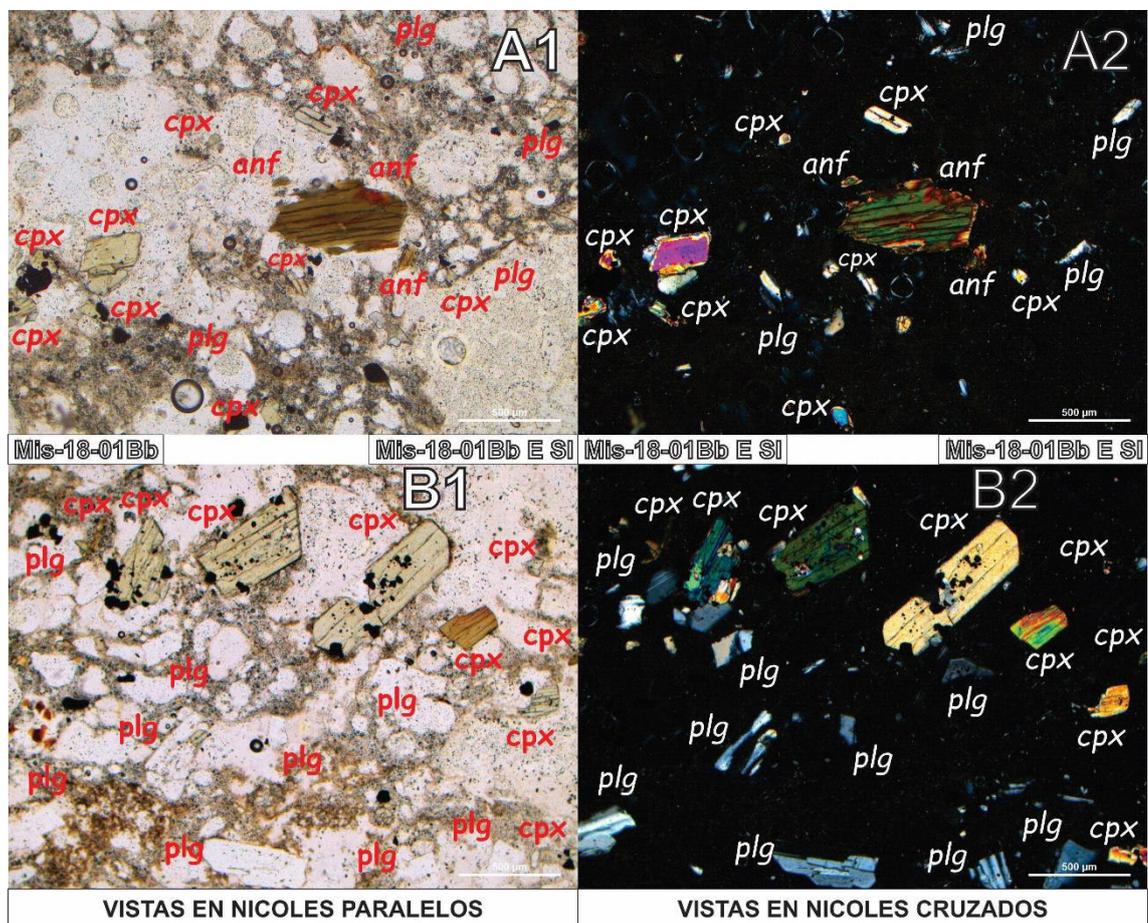
Anfiboles. Cristales subhedrales y anhedrales (ambos escasos), mayormente limpios y **aislados** de 0.25 y 0.68 mm ([Figura 41; A2](#)).

Óxidos de Fe-Ti. La mayor parte se encuentra como inclusiones en cristales de clinopiroxeno, el resto se encuentra dentro de la matriz. Los tamaños predominantes son ~ 0.03mm, escasos llegan a 0.12 mm.

Matriz. Vesiculada, con vesículas de forma subredondeadas predominantes a ligeramente elongadas desde 0.12 mm hasta 0.3 mm en promedio.

Figura 41

Vistas en nicoles paralelos y nicoles cruzados de escorias del “Sandwich Inferior”



Nota: Plagioclasas (plg), clinopiroxenos (cpx) y un anfíbol (anf) de 0.68 mm (diámetro mayor). Vesículas subredondeadas desde 0.12 mm hasta 0.3 mm.

4.7.3. Pómez del “Sandwich Superior”

Presenta textura porfírica y matriz microvesicular a vesicular (15%), constituido por cristales de: plagioclasa (23%), clinopiroxeno (19%), anfíboles (1%) y óxidos de Fe-Ti (4%). Se han encontrado un lítico incrustado ([Figura 42; A2](#)).

Plagioclasa. Se presentan cristales **aislados (predominantes)** euhedrales, anhedrales escasos y subhedrales predominantes (desde 0.06 mm hasta 0.75 mm en promedio), con texturas de disolución (huecos o fracturas), limpios, con maclas polisintéticas. **Formando parte de intercrecimientos** (escasos) de clinopiroxenos y finalmente **con inclusiones** de clinopiroxeno ([Figura 42; C2](#)).

Clinopiroxenos. Se presentan **mayormente en intercrecimiento** con otros clinopiroxenos y/o plagioclasas (escasos), subhedrales predominantes a euhedrales escasos (formas bien definidas) con inclusiones de óxidos de Fe-Ti, algunos maclados ([Anexo V. K2](#)) simples (augita) y con exfoliación paralela al eje mayor (0.7 mm).

Poco aislados ([Fig. 6.7.3.;C2](#)), euhedrales, subhedrales a anhedrales, mayormente pequeños (0.13 a 0.25 mm en promedio).

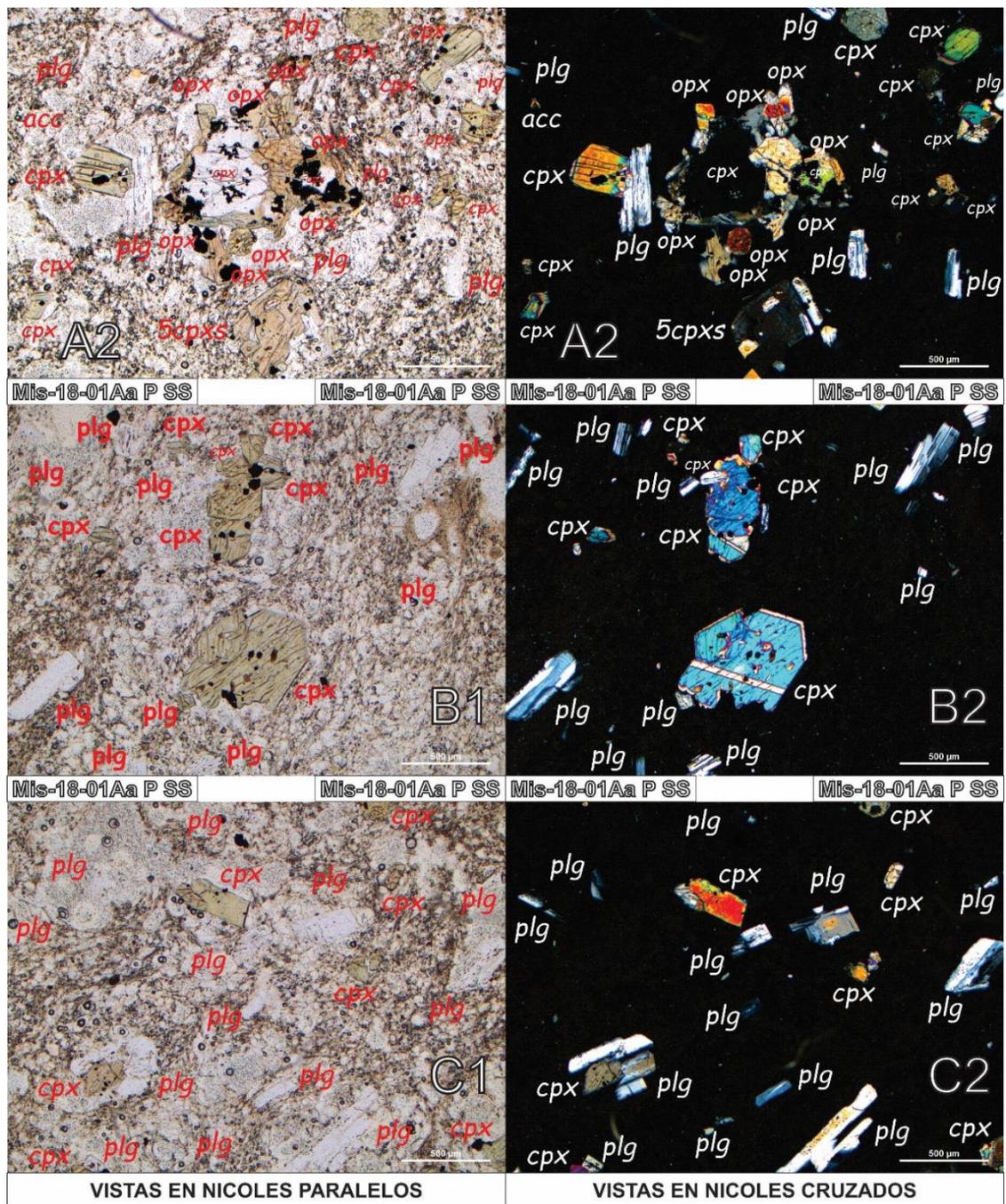
Anfiboles. Se presentan cristales **aislados**, escasos encontrados ([Anexo V. K2](#)), euhedrales a subhedrales con clivaje. Tamaños 0.37 mm y 0.47 mm.

Óxidos de Fe-Ti. La mayor parte se encuentra como inclusiones en cristales de clinopiroxeno, el resto se encuentra dentro de la matriz. Los tamaños predominantes son ~ 0.04mm, escasos llegan a 0.25 mm.

Matriz. Microvesiculada predominante a vesicular, con microvesículas y vesículas de forma subredondeadas predominantes a ligeramente elongadas (escasas) con tamaños desde 0.05 mm hasta 0.20 mm.

Figura 42

Vistas en nicoles paralelos y nicoles cruzados de pómez del "Sandwich Superior"



Nota: En B2 y C2 se observan cristales aislados subhedrales, en A2 se observa intercrecimiento de cristales de plagioclasas (plg), ortopiroxenos (opx) y clinopiroxeno (cpx) pertenecientes a un lítico incrustado.

4.7.4. Escoria del “Sandwich Superior”

Presenta textura porfírica con matriz vesicular (20%) y óxidos de Fe-Ti (4%) escasos. Los cristales presentes son: plagioclasa (18%), clinopiroxeno (17%), anfíboles (3%) y ortopiroxeno (1%).

Se han encontrado líticos incrustados ([Anexo V; L1, N1](#)).

Plagioclasa. Cristales **aislados predominantes**, subhedrales a anhedrales, con maclas polisintéticas, mayormente limpias en aglomerados algunas con textura

tipo sieve. Tamaños desde 0.35 en promedio hasta 0.7 mm (escasas). Algunos en intercrecimiento con otras plagioclasas o clinopiroxenos ([Figura 43; A2, B2](#)), euhedrales a subhedrales, con tamaños desde 0.14 mm hasta 0.25 mm en promedio.

Clinopiroxenos. Cristales **en intercrecimiento** ([Figura 43](#)) con otros clinopiroxenos (**predominantes**) y/o plagioclasas (escasos), subhedrales con clivaje, maclados (augita; [Anexo V, N2](#)), tamaños desde 0.25 mm hasta 0.8 mm. Cristales aislados, euhedrales predominantes a subhebrales con clivaje, tamaños desde 0.06 mm hasta 0.38 mm en promedio. La mayoría de óxidos de Fe-Ti se encuentra como inclusiones sobre todo en los clinopiroxenos más grandes.

Ortopiroxenos. Cristales en intercrecimiento con clinopiroxenos ([Figura 43; A2](#)), euhedrales tabulares alargados (escasos encontrados), tamaños de ~ 0.37 mm.

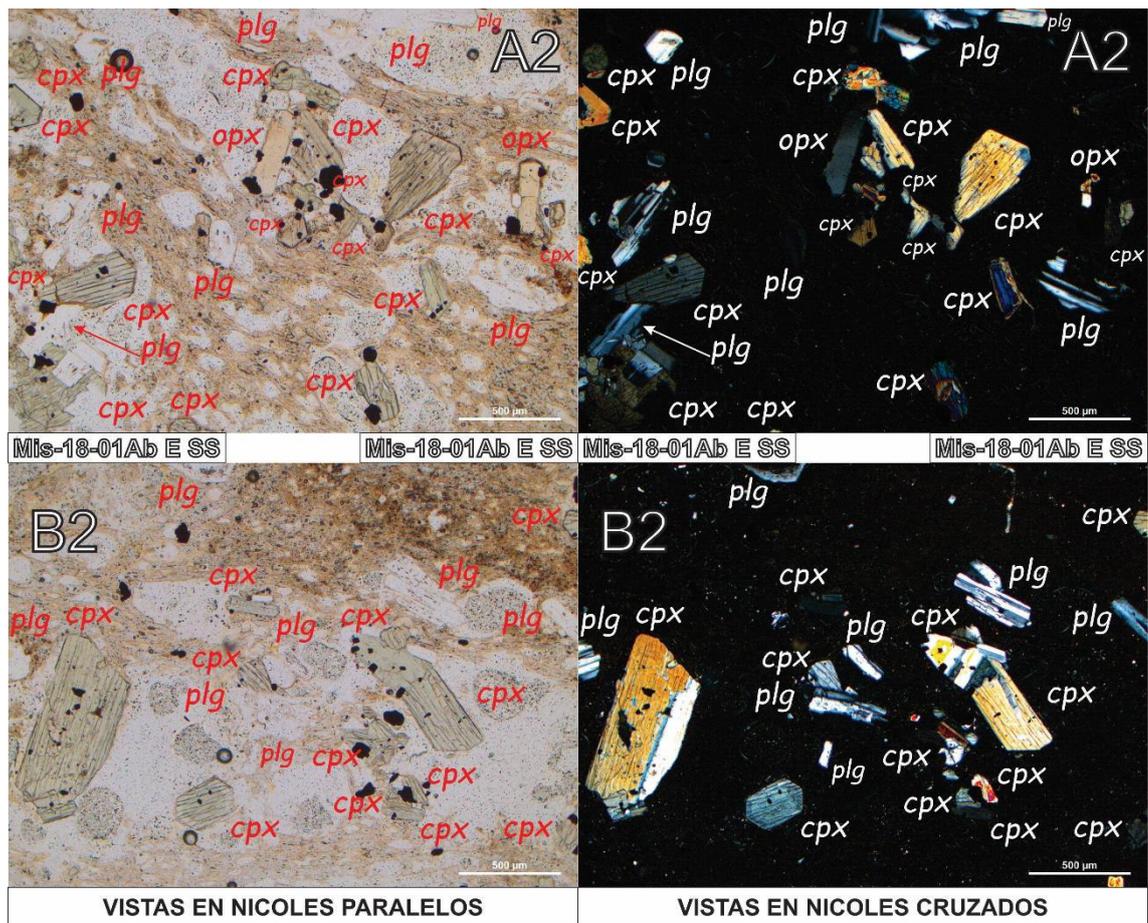
Anfiboles. Cristales en intercrecimiento ([Anexo V, N2](#)) con otros anfíboles y aislados, euhedrales a anhedrales con clivaje, escasos encontrados, tamaños desde 0.12 mm hasta 0.48 mm en promedio.

Óxidos de Fe-Ti. La mayor parte se encuentra como inclusiones en cristales de clinopiroxeno, el resto se encuentra dentro de la matriz. Los tamaños predominantes son ~ 0.03 mm, escasos llegan a 0.12 mm.

Matriz. Vesiculada, subredondeada predominantes a elongadas, con tamaños promedio de 0.14 mm, y escasos desde 0.08 mm hasta 0.25 mm.

Figura 43

Vistas en nicoles paralelos y nicoles cruzados de escorias del “Sandwich Superior”



Nota: En estas vistas se observa: plagioclasas (plg) tabulares subhedrales y clinopiroxenos (cpx) de hasta 0.8 mm.

4.7.5. Proporción y Diferencias Mineralógicas entre el “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

Se ha realizado un conteo en las vistas de las secciones delgadas representativas por el método de malla (cuadrícula de 130 puntos sobre las vistas) para determinar el porcentaje de cristales en cada muestra, el porcentaje que falta para el 100% calculado correspondería principalmente a la matriz vítrea más un porcentaje mínimo a cristales accesorios.

En la [Tabla 21](#) se tiene el resumen con la proporción de componentes encontrados. Este tabla muestra las diferencias mineralógicas entre los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”, considerando que la proporción de escorias es mayor a la de pómez en ambos depósitos.

Las diferencias principales son en la proporción de clinopiroxenos y anfíboles, siendo para el “Sandwich Inferior” menores a la del “Sandwich Superior. También se tiene que la proporción de matriz vítrea (MTO) es menor en el “Sandwich Inferior”. Otras diferencias ligeras son en el contenido de plagioclasas, siendo menor para el “Sandwich Superior”.

En caso de las vesículas la proporción es menor para el “Sandwich Inferior”, lo cual indicaría una menor exsolución de volátiles (H_2O , CO_2) y viscosidad del magma. Además, las pómez presentan micro vesículas para ambos depósitos, con tamaños ligeramente menores para el “Sandwich Superior”. Las vesículas de pómez para el “Sandwich Inferior” son subredondeadas, mientras que para el “Sandwich Superior”, son subredondeadas predominantemente con algunas ligeramente elongadas. Las escorias tienen vesículas subredondeadas (predominantes) a ligeramente elongadas para el “Sandwich Inferior” y subredondeadas (predominantes) a elongadas (visiblemente acentuada) para el “Sandwich Superior”, los tamaños en el “Sandwich Inferior” son ligeramente menores a las del “Sandwich Inferior”.

Tabla 21

Proporción mineralógica del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

VISTAS DE SECCIONES DELGADAS	Plg	Cpx	Anf	Opx	Óxidos Fe-Ti	Vesículas	MTO	Acc
Sandwich Inferior	%	%	%	%	%	%	%	%
Pómez SI	20	15	2	0	3	24	35	1
Escorias SI	19	16	1	1	5	27	31	0
Sandwich Superior								
Pómez SS	23	19	1	0	4	15	38	0
Escorias SI	18	17	3	1	4	20	37	0
plg: plagioclasas; anf: anfíboles; cpx: clinopiroxenos; opx: ortopiroxeno; MTO: matriz vítrea y otros; acc: cristales accesorios; SI: "Sandwich Inferior"; SS: "Sandwich Superior"								

4.8. Geoquímica

La geoquímica para depósitos de caída piroclástica se realiza en los componentes juveniles, pómez o escoria. Para los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” se han evaluado 4 y 2 muestras respectivamente, la mayor cantidad de pruebas no es necesaria ya que la variación geoquímica entre afloramientos es mínima.

El análisis químico de los elementos mayores se realizó en el Laboratorio de Química Analítica del INGEMMET. El método empleado para el análisis de elementos mayores y trazas fue “polímero iónico-metal” (IPMCs). Los análisis de elementos mayores fueron recalculados al 100% en base anhidra, y se expresó la totalidad de hierro en forma de Fe_2O_3 .

4.8.1. Clasificación Geoquímica de la Serie

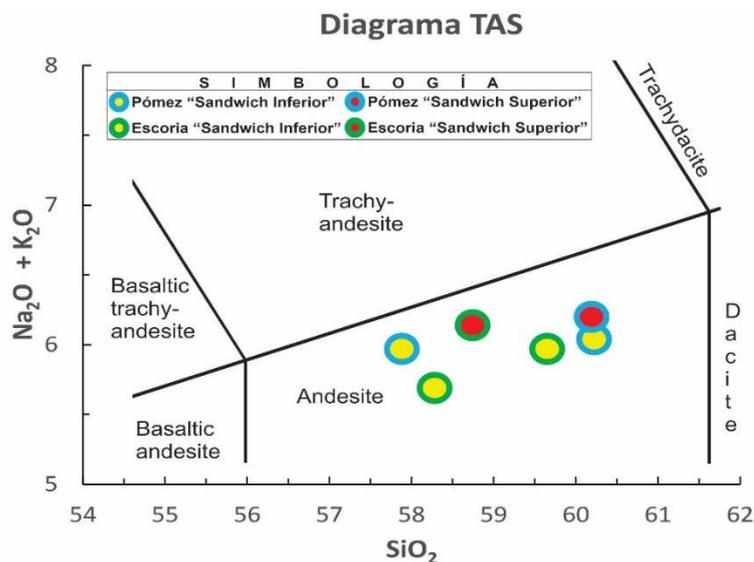
Los resultados de los análisis químicos se representaron en diagramas de clasificación clásica de rocas volcánicas como el diagrama “Total de alcalinos vs Sílice” (TAS) de Le Bas et al. (1986), el diagrama de Peccerillo & Taylor (1976) y el diagrama triangular AFM de Kuno (1968).

Según el diagramas de la [Figura 44](#) tenemos para las pómez y escorias del “**Sandwich Inferior**” una composición andesítica, con un valor promedio en wt % de SiO₂ para las pómez de 59.05 y para las escorias de 58.97. El valor promedio en wt % de Na₂O₂ + K₂O para las pómez son de 6.01 y para las escorias de 5.83. Para las pómez y escorias del “**Sandwich Superior**” también la composición es andesítica, con un valor en wt % de SiO₂ para la pómez de 60.19 y para las escorias de 58.74. El valor promedio en wt % de Na₂O + K₂O para las pómez son de 6.20 y para las escorias de 6.14. Los valores indican una composición de SiO₂ mayor para el “Sandwich Inferior” y menor de Na₂O₂ + K₂O.

Según los diagramas de la [Figura 45](#) y [Figura 46](#), la serie para el “Sandwich Inferior” para las pómez y escorias es calcoalcalino, con un contenido potásico promedio en wt % para las pómez de 2.10 y para las escorias de 1.86. Para el “Sandwich Superior” la serie también es calco alcalino, con un contenido potásico en wt % para la pómez de 2.28 y para las escorias de 2.08. El contenido potásico para ambos es de mediana a fuertemente potásico (1.8 – 4.0 wt % de K₂O), recordando que la serie calcoalcalina corresponden a valores de rocas del Misti ([Mariño et al., 2016](#)) estos resultados son idóneos.

Figura 44

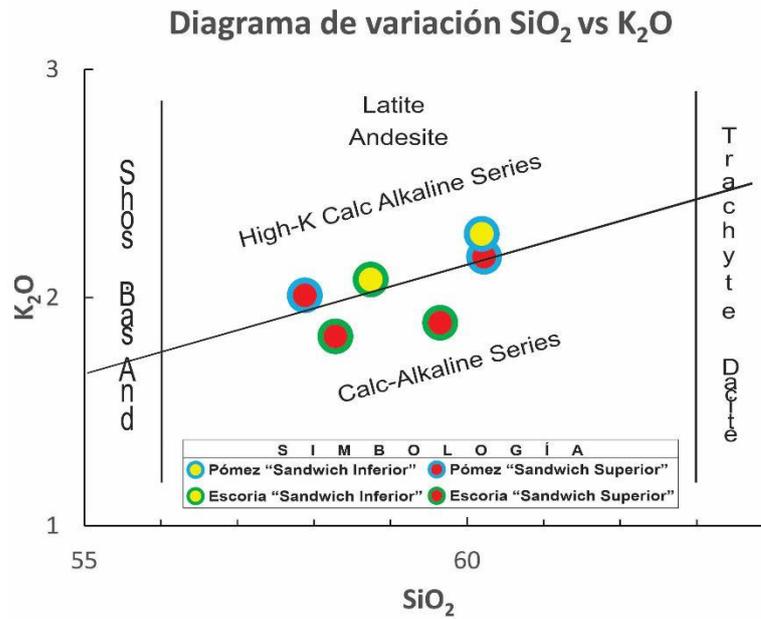
Clasificación de las pómez y escorias del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” en el diagrama TAS



Nota: Correlación de porcentaje en peso (wt%); por Le Bas et al. ([1986](#)).

Figura 45

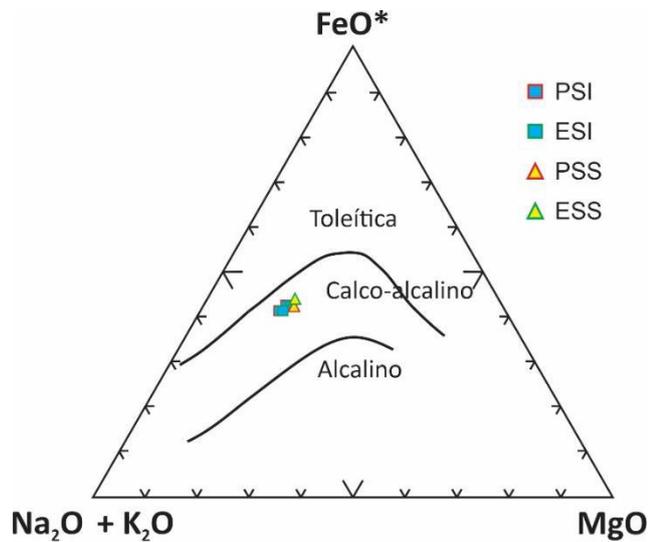
Clasificación de las pómez y escorias del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”, en el diagrama de variación SiO₂ vs K₂O



Nota: Correlación de porcentaje en peso (wt%); por Peccerillo y Taylor (1976).

Figura 46

Clasificación de las pómez y escorias del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” en el diagrama ternario AFM



Nota: Correlación de porcentaje en peso (wt%); por Kuno (1968).

5. Modelo Eruptivo en Base al Estudio de sus Depósitos

5.1. Cálculo de Parámetros Eruptivos de las erupciones ligadas a los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

Para caracterizar cualitativa y cuantitativamente una erupción tenemos que determinar los parámetros medibles del mismo, tales como: (1) volumen expulsado y del magma, (2) altura de la columna eruptiva, (3) dispersión de la tefra, (4) estilo eruptivo, (5) magnitud e intensidad e (6) Índice de Explosividad Volcánica (IEV).

La columna eruptiva formada por una erupción explosiva es desplazada por los vientos ([Carey and Sparks, 1986](#)), la dirección y velocidad determinará el espesor, alcance y dispersión de los depósitos. Una erupción sin viento predominante produciría que la columna eruptiva no tenga desplazamiento en una dirección preferente, por tal el depósito de caída tendría una dispersión simétrica y circular con isópacas concéntricas alrededor del punto de emisión, este hecho es raro, siendo común que el viento sople en una dirección preferencial confiriéndole al depósito la semiforma elíptica y cuyo eje de dispersión mayor es paralelo a la dirección principal del viento.

Los depósitos de caída “Sandwich Superior” y “Sandwich Inferior” del volcán Misti fueron emplazados por dos erupciones explosivas. La elaboración del mapa de isópacas e isópletas (de pómez y de líticos) para cada uno determinarán si sus columnas eruptivas tuvieron la influencia del viento, cuál fue la dirección principal de dispersión (eje principal de dispersión) y finalmente establecerán cualitativa y cuantitativamente sus parámetros dinámicos.

5.1.1. Mapa de Isópacas

El mapa de isópacas consiste en líneas que unen los puntos de igual espesor de un depósito. Este mapa se elaboró en base al espesor tomado del depósito de caída en 29 puntos de afloramientos para el “**Sandwich Inferior**” y 23 puntos de afloramientos para el “**Sandwich Superior**”. Estos datos fueron introducidos y trabajados en un sistema de información geográfica (ArcMap) donde se interpolaron en curvas de igual espesor, luego los mismos fueron procesados y mostrados sobre un modelo de elevación digital (DEM). Con ayuda del programa se calculó el área de cada isópaca ([Tabla 22](#) y [Tabla 23](#)) para después calcular el volumen del depósito.

Mapa de Isópaca del “Sandwich Inferior”. En la [Tabla 22](#) se tiene principalmente las áreas de las isópacas calculadas en ArcGIS de la [Figura 47](#).

Tabla 22

Área y espesor de las isópacas para los depósitos del “Sandwich Inferior”

Isópaca (cm)	Isópaca (m)	Área acumulada (km ²)	Área medida (km ²)
60	0.60	15.76	15.76
50	0.50	20.48	4.72
40	0.40	40.09	19.61
30	0.30	66.04	25.95
25	0.25	81.9	15.86
20	0.20	106.01	24.11
10	0.10	168.83	62.82
8	0.08	197.7	28.87

Total	197.70
--------------	--------

Según la [Figura 47](#). Las isópacas de áreas proximales (menores a 12.7 km), poseen un lóbulo de dispersión de forma elíptica triangular. El eje de dispersión en estas áreas proximales está orientado en dirección SO, lo conforman las isópaca de 60, 50, 40, 30 y 25 cm de espesor. La isópaca de mayor espesor (60 cm) se encuentra a 6.2 km del cráter, en las nacientes de la quebrada Huarangueros.

Las isópacas en áreas distales (mayores a 12.7 km) presenta forma arriñonada con dirección de dispersión al SSO. Está conformada por las isópacas de 20 cm, 10 cm y 8 cm. La isópaca más distal de 8 cm está ubicada a 14.3 km del cráter, al oeste de La Calera y Los Encuentros (al S del Misti) y a 14.4 km del cráter por Villa Ecológica al pie de la quebrada El Peral (OSO del Misti) .

Se puede ver de las formas de las isópacas que el comportamiento del viento ha variado de SO hacia el SSO. La isópaca de 8 cm de espesor se encuentra a una distancia de 14.4 km del cráter abarcando un área de 197.7 km².

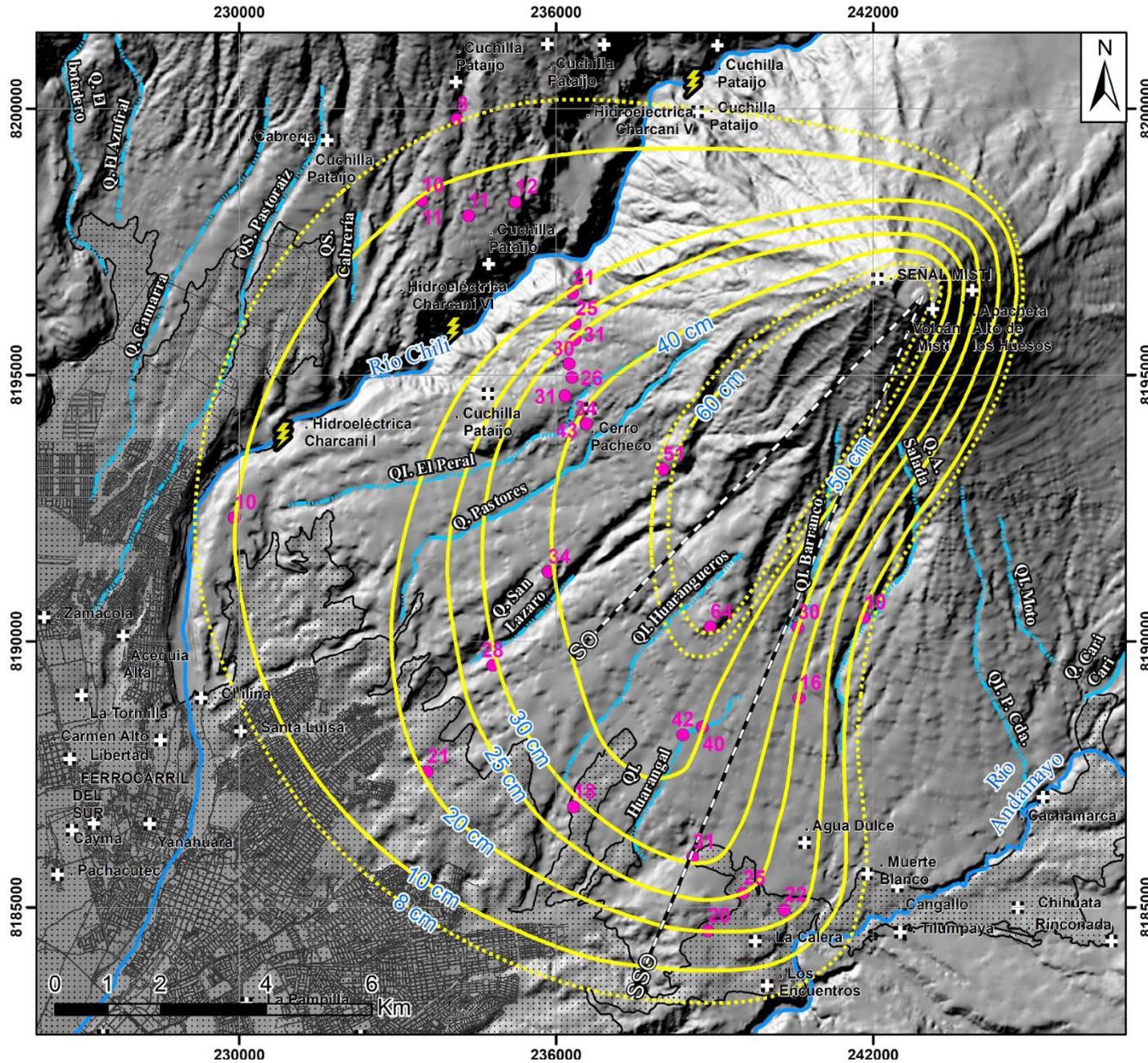


Figura 47

Mapa de isópachas de los depósitos de caída del “Sandwich Inferior”

Nota: Las líneas entrecortadas amarillas hacen referencia a isópachas inferidas. Las líneas rectas blanco-negro muestra el eje de dispersión para las diferentes áreas o zonas. Cada una de ellas mantiene preferentemente la dirección SO. También se muestra en líneas negras los bordes actuales rurales-urbanos de la ciudad de Arequipa, nótese el crecimiento de la población con respecto al 2011 (líneas rectas grises).

Mapa de Isópaca del “Sandwich Superior”. En la [Tabla 23](#) se tiene principalmente las áreas de las isópacas calculadas en ArcGIS de la [Figura 48](#).

Tabla 23

Área y espesor de las isópacas para los depósitos del “Sandwich Superior”

Isópaca (cm)	Isópaca (m)	Área acumulada (km ²)	Área medida (km ²)
30	0.30	22.41	22.41
25	0.03	25.29	2.88
20	0.02	63.81	38.52
14	0.01	162.85	99.04
8	0.01	202.07	39.22
Total			202.07

Según la [Figura 48](#). Las isópacas en áreas proximales (menores a 9.5 km), poseen un lóbulo de dispersión de forma elíptica casi perfecta con un eje de dispersión orientado en dirección OSO. Están conformados por la isópaca de 30, 25 y 20 cm. La isópaca de 30 cm de espesor, se encuentra de 6.9 km del cráter, en las nacientes de las quebradas Pastores y el Peral cerca al pueblo de Cuchilla Pataijo.

En áreas distales (mayor a 9.5 km) las isópacas cambian ligeramente su forma ensanchándose en dirección SO, el eje de dispersión para estas zonas es al SO. Esta área está conformada por las isópacas de 8 y 10 cm. La isópaca más distal de 8 cm de espesor se encuentra a una distancia de 15.3 km del cráter abarcando un área de 202.07 km² con dirección de dispersión al SO.

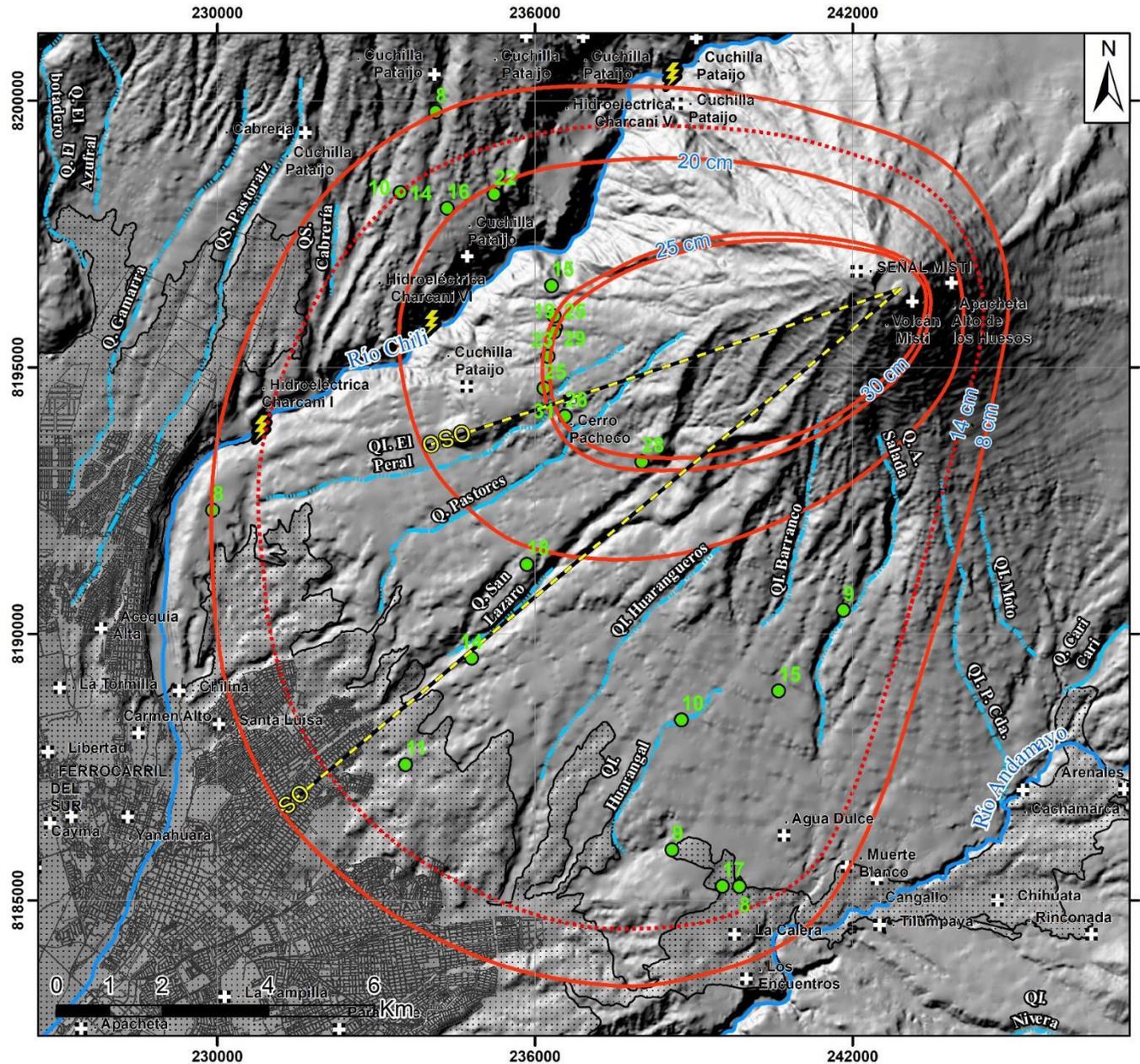


Figura 48

Mapa de isópacas de los depósitos de caída del “Sandwich Superior”

Nota: Las líneas entrecortadas rojas hacen referencia a isópacas inferidas. Las líneas rectas amarillo-negro muestra el eje de dispersión para las diferentes áreas o zonas. Cada una de ellas mantiene preferentemente la dirección OSO. También se muestra en líneas negras los bordes actuales rurales-urbanos de la ciudad de Arequipa, nótese el crecimiento de la población con respecto al 2011 (líneas rectas grises).

5.1.2. Estimación del Volumen de los Depósitos de Caída

El volumen total o completo (volumen bulk) del depósito de caída, que involucra a la capa que contiene las pómez, escorias, líticos y material fino, se estima a partir de los espesores de las capas del depósito completo que no hayan sido retrabajados ni muestren rasgos considerables de erosión o acumulación. En el software ArcGIS se unió los puntos de igual espesor y se crearon polígonos con formas semielípticas, de los cuales con la ayuda de las herramientas del software se calculó el área de los polígonos (isópaca), siendo estos datos la línea base para poder hacer los cálculos de volúmenes según los métodos propuestos anteriormente en las bases teóricas ([Capítulo 2, 2.2.2.](#)).

El espesor de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” disminuyen a medida que nos alejamos del cráter del volcán Misti, ya que ambos son considerados depósitos independientes por los datos y pruebas presentados en esta tesis se calculara un volumen independiente para cada uno.

Modelo del Adelgazamiento Exponencial. Propuesto por Pyle ([1989](#)) y extendida por Fierstein & Nathenson ([1992](#)), se obtiene el volumen del depósito a partir de la siguiente ecuación.

$$V = 2 \times \frac{T_0}{k^2} \dots \text{(ecuación 1)}$$

Donde:

V= volumen bulk del depósito

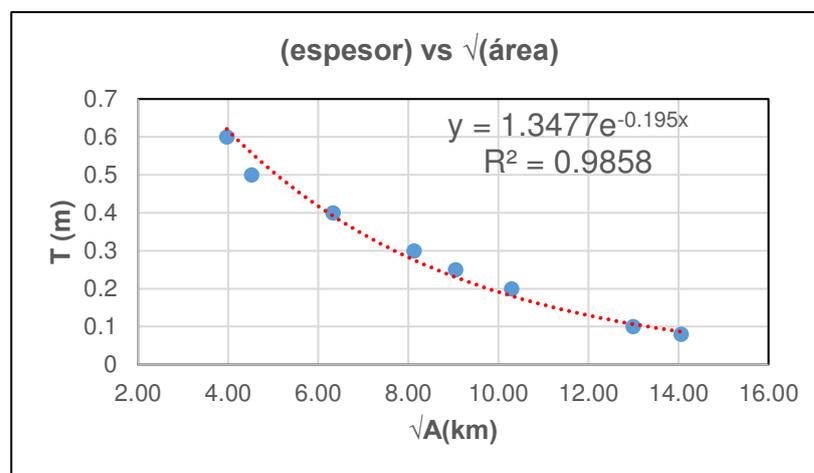
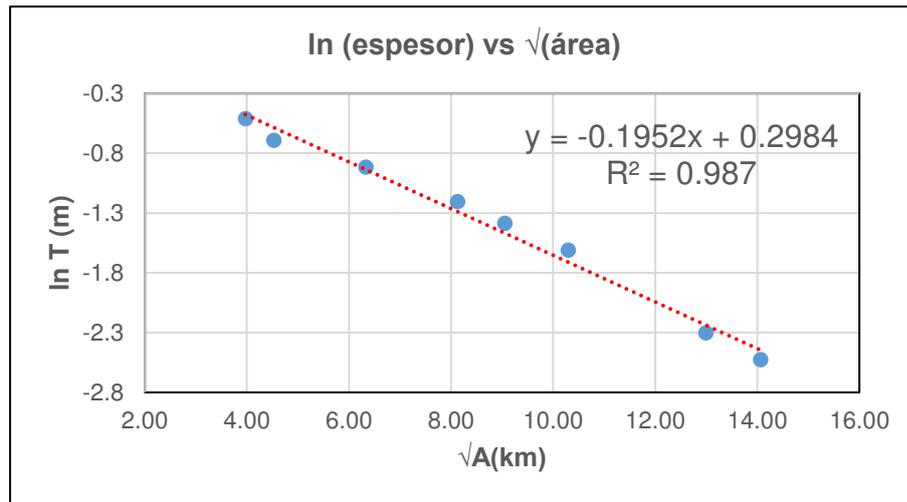
To: Máximo espesor extrapolado

k: es la pendiente del segmento exponencial mejor trazado en la gráfica lnT vs la raíz cuadrada del área de la isópaca

Entonces se presentan las gráficas del lnT vs \sqrt{A} y T vs \sqrt{A} , [Figura 49](#) para el “Sandwich Inferior” y [Figura 50](#) para el “Sandwich Superior”.

Figura 49

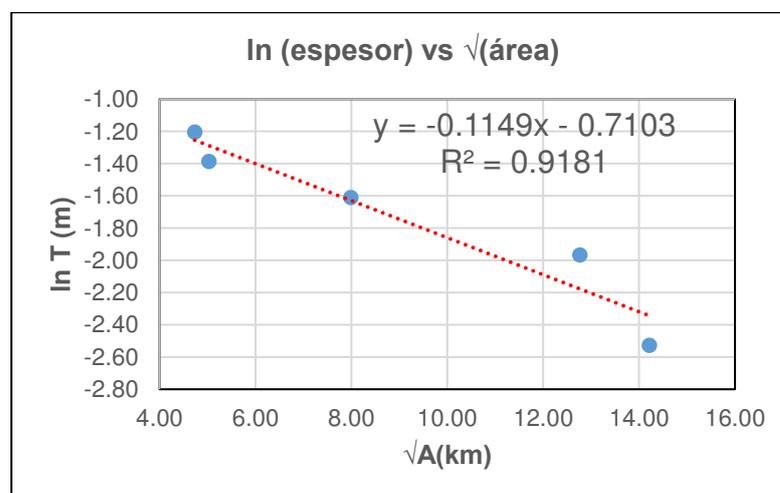
Dos gráficos para hallar el volumen de los depósitos del “SI” según el método exponencial “(ln)espesor vs área” y “espesor vs (raíz)área”

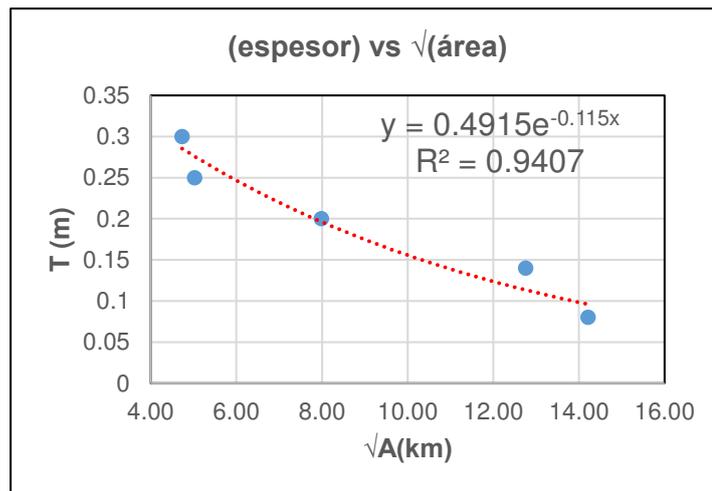


Nota: Gráficos propuestos por Fierstein & Nathenson (1992) donde $T_0=1.348$ metros $K=0.195$, en base a los datos de isópacas de los depósitos del “Sandwich Inferior”.

Figura 50

Dos gráficos para hallar el volumen de los depósitos del “SS” según el método exponencial “(ln)espesor vs área” y “espesor vs (raíz)área”





Nota: Gráficos propuestos por Fierstein & Nathenson (1992) donde $T_0=0.492$ metros $K=0.115$, en base a los datos de isópacas de los depósitos del “Sandwich Superior”.

Reemplazando los valores obtenidos de las gráficas en la ecuación 1 se obtiene un volumen de 0.071 km^3 , volumen bulk del depósito de caída “Sandwich Inferior” y 0.074 km^3 del depósito de caída “Sandwich Superior”.

Método de “Ley de Poder”. Propuesto por Bonadonna & Houghton (2005), se obtiene el volumen del depósito a partir de la siguiente ecuación.

$$v = \frac{2T_{pl}}{2-m} [C^{(2-m)} - B^{(2-m)}] \qquad B = \left(\frac{T_0}{T_{pl}}\right)^{\frac{1}{-m}} \dots \text{(ecuación 2 y 3)}$$

Donde:

T_{pl} : coeficiente de la curva de la ley potencial

m : exponente de la curva de la ley potencial

T_0 : Máximo espesor extrapolado (tomado del método de adelgazamiento exponencial)

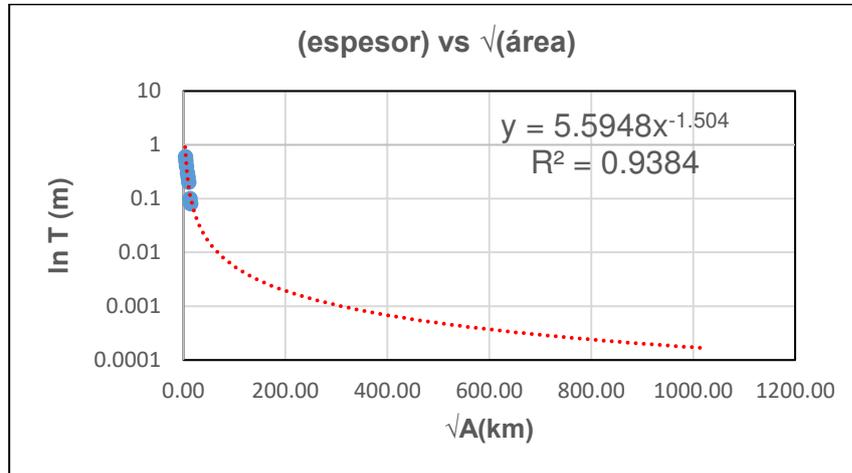
C : se elige el límite a favor del viento (downwind limit) de la propagación significativa de nubes volcánicas como lo muestran las imágenes satelitales (Prata y Grant, 2001), en caso sea un depósito antiguo se estima un valor empírico.

De la gráfica de la ley de potencial se obtienen los coeficientes (T_{pl}) y exponentes (m) con los cuales se estima B según la ecuación 3. Para C , se estima un valor de acuerdo con erupciones pasadas, siendo en Perú la de mayor IEV (6) la erupción pliniana del Huaynaputina del año 1600 D.C., la cual alcanzo hasta 600 km (isópaca de 0.5 cm), según Japura (2018) y en la actualidad las erupciones del Ubinas se han reportado hasta 200 km, teniendo un IEV de 2. También para el depósito “Sacarosa” (Cuno, 2019) de un IEV de 5 se ha considerado un valor de C igual a 600 km.

Entonces se presenta las gráfica de T vs \sqrt{A} . [Figura 51](#) para el “Sandwich Inferior” y [Figura 52](#) para el “Sandwich Superior”

Figura 51

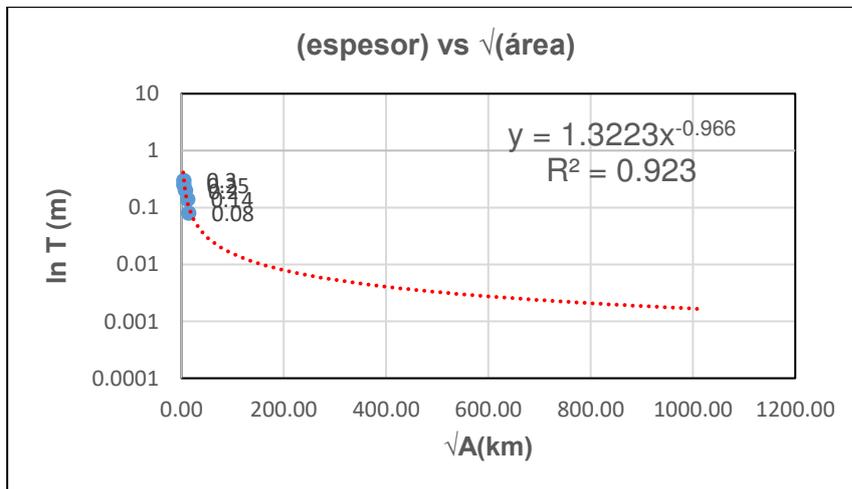
Gráfico para hallar el volumen de los depósitos del “SI” según el método de “ley de potencia” (“ln)espesor vs (raíz)área”)



Nota: Gráfico propuesto por Bonadonna & Houghton (2005) donde $T_{pl}=5.594$ metros y $m=1.504$, en base a los datos de isópacas de los depósitos del “**Sandwich Inferior**”.

Figura 52

Gráfico para hallar el volumen de los depósitos del “SS” según el método de “ley de poder” (“ln)espesor vs (raíz)área”)



Nota: Gráfico propuesto por Bonadonna & Houghton (2005) donde $T_{pl}=1.322$ metros $m=0.966$, en base a los datos de isópacas de los depósitos del “**Sandwich Superior**”.

Reemplazando los valores obtenidos de las gráficas en la ecuación 2 se obtiene un volumen de **0.50 km³**, volumen bulk del depósito de caída “**Sandwich**”

Inferior” considerando para C un valor de 400 Km y **1.25 km³** del depósito de caída **“Sandwich Superior”** considerando un valor para C de 600 Km.

Modelo de Integración de una Función Tipo Weibull. Propuesto por Bonadonna & Costa (2012), basada en la integración de una función tipo Weibull de la cual se obtiene la ecuación.

$$T = \theta \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{n-2} e\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^n\right] \dots \text{(ecuación 4)}$$

Donde:

λ : escala de decaimiento característico del espesor del depósito (km).

θ : escala de espesor (cm)

x: raíz cuadrada del área de la isópaca

n: parámetro adimensional

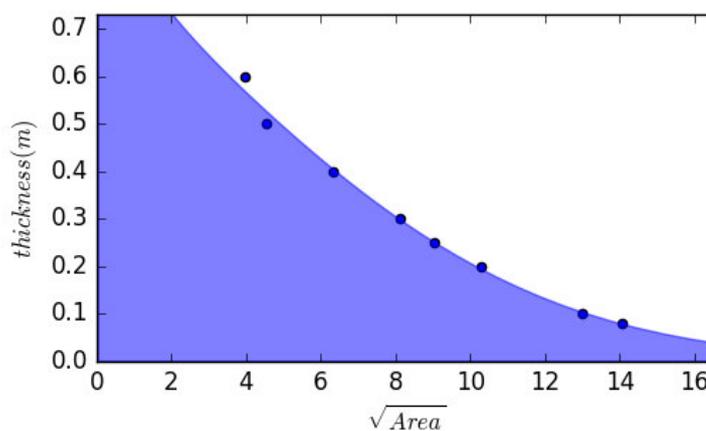
Es necesario escoger un rango para cada parámetro θ , λ y n , los cuales son definidos como 0,1 - 5000 cm para θ , 0,1 - 1000 km para λ y 0.2 - 2 para n , ya que estos valores minimizan el error residual, según los autores (Segura, 2016).

Daggitt et al. (2014) desarrollo un software en los que se puede comparar fácilmente los dos métodos desarrollados anteriormente y también *“recomienda para el método de Weibull, que inicialmente se proporcionen límites sueltos para n y λ (por ejemplo, $0 \leq \lambda \leq 1000$, $0 \leq n \leq 10$). Cuando se encuentra un ajuste razonable para los datos, los límites pueden ajustarse aún más. por ejemplo, si se encontró que $\lambda = 2.63$ y $k = 0.849$ proporcionó un ajuste razonable, los límites luego podría apretarse a $1 \leq \lambda \leq 5$, $0 \leq k \leq 2$ ”* (traducido de User manual AshCalc, Daggitt et al., 2014).

Entonces se presenta la gráfica del T vs \sqrt{A} . [Figura 53](#) para el “Sandwich Inferior” y [Figura 54](#) para el “Sandwich Superior”.

Figura 53

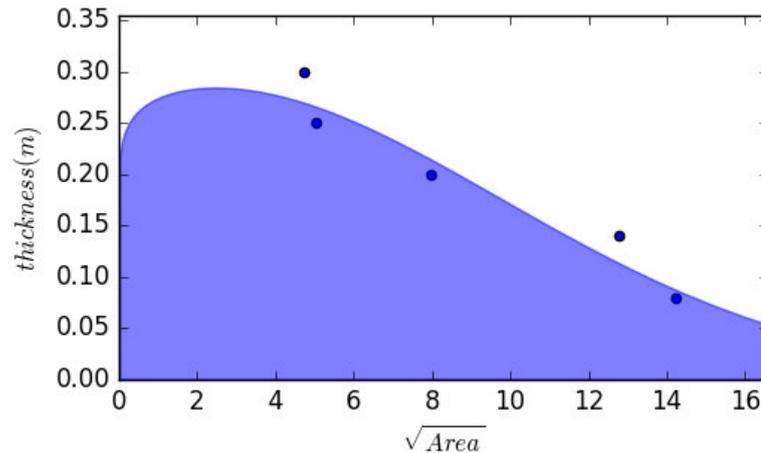
Gráfico para hallar el volumen de los depósitos del “SI” según el “Modelo de Integración de una Función Tipo Weibull” (“espesor vs (raíz)área”)



Nota: Gráfico propuesto por Bonadonna & Costa (2012) mediante la implementación del software AshCalc de Daggitt et al. (2014), en base a los datos de isópacas de los depósitos del “Sandwich Inferior”.

Figura 54

Gráfico para hallar el volumen de los depósitos del “SS” según el “Modelo de Integración de una Función Tipo Weibull” (“espesor vs (raíz)área”)



Nota: Gráfico propuesto por Bonadonna & Costa (2012) mediante la implementación del software AshCalc de Daggitt et al. (2014), en base a los datos de isópacas de los depósitos del “Sandwich Superior”.

A partir de los datos ingresados en el software AshCal y de ejecutar diferentes iteraciones y corridas para encontrar valores óptimos para los parámetros λ , θ , y n ; se obtuvo la [Tabla 24](#).

Tabla 24

Valores obtenidos del software AshCalc para el “Modelo de Integración de una Función Tipo Weibull” en base a los datos de isópacas de los depósitos del “SI” y “SS”

	SI	SS
Volumen total estimado	0.061 km ³	0.048 km ³
Error cuadrático relativo	0.001	0.0126
λ	9.74	12.32
k	1.83	2.08
θ	0.59	0.33
Ecuación:	T=0.59224	T=0.33237

Nota: El parámetro k resulta de eliminar θ , para que este tome un valor óptimo en términos de k y λ .

Finalmente, de la [Tabla 24](#) se obtiene los valores de los volúmenes bulk de **0.061 km³** para el depósito del “Sandwich Inferior” y **0.048 km³** para el depósito del “Sandwich Superior”.

5.1.3. Volumen del Magma

El valor del volumen del depósito más representativo que contrasta con los datos de campo de preservación, puntos de afloramiento distales y proximales y espesores son los obtenidos mediante el método de Bonadona & Costa (2012) con la implementación de software y recomendación de Daggit et al. (2014).

Entonces para el cálculo del volumen del magma se utilizó la siguiente formula:

$$V_M = \frac{\rho_C}{\rho_M} x V_D$$

Donde:

V_M : Volumen del magma

V_D : Volumen del depósito

ρ_C : Densidad promedio del depósito, tomado en forma general con un valor de 1000 kg/m³

ρ_M : Densidad del magma, que en el caso de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” según los datos geoquímicos obtenidos es de 2500 kg/m³ (densidad para magmas andesíticos).

Por tal el volumen del magma para el “**Sandwich Inferior**” es de **0.024 km³** y para el “**Sandwich Superior**” de **0.019 km³**.

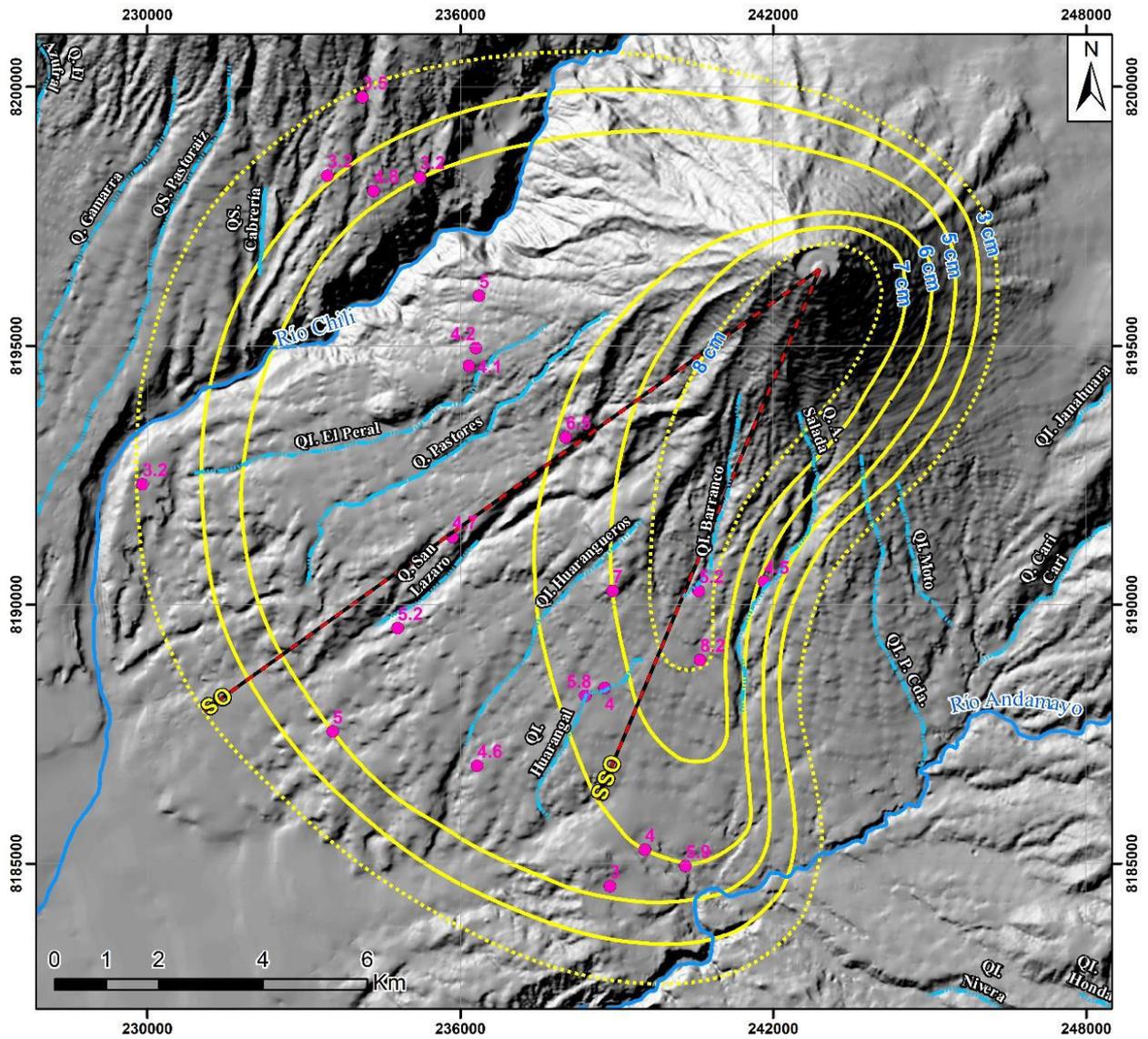
5.1.4. Mapa de Isopleetas

Los mapas de isópleetas son aquellos que unen puntos del mayor diámetro del del eje mayor de pómez y líticos. En caso del mapa de isópleetas de líticos podemos mencionar que muestran con mayor claridad la dirección principal o dirección predominante del eje de dispersión de los depósitos, debido a su peso y densidad los fragmentos de líticos son menos influenciados por el viento, además la confiabilidad sobre su integridad en el transporte es de mayor certeza con respecto a las pómez y/o escorias que son más frágiles y deleznales.

5.1.4.1. Mapa de Isopleetas de pómez. Se han elaborado mapas de isópleetas de pómez para los depósitos del “Sandwich Inferior” [Figura 55](#) y “Sandwich Superior” [Figura 56](#).

Figura 55

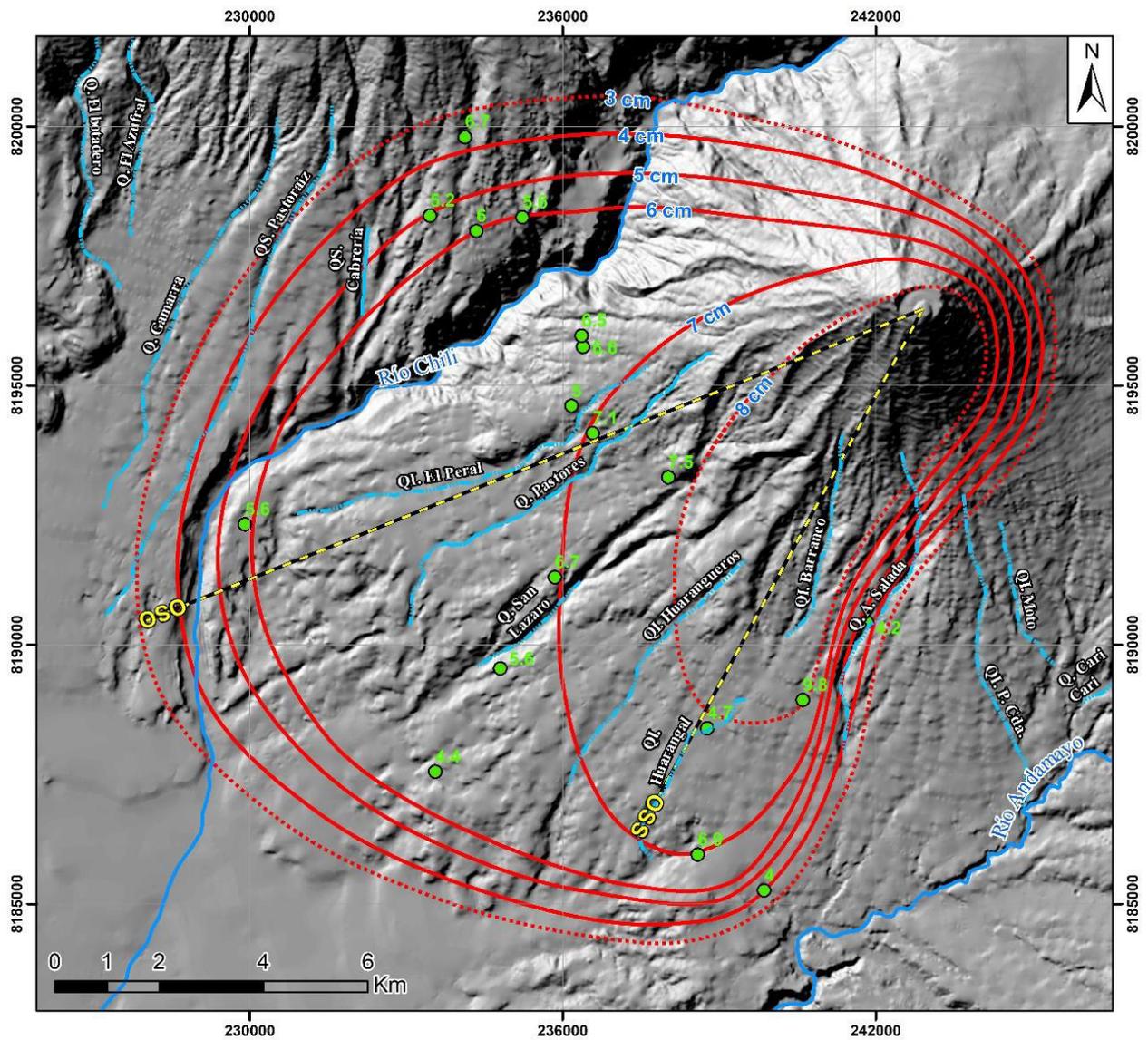
Mapa de isópleetas de pómez del depósito de caída de tefra del Sandwich Inferior



Nota: Las líneas rectas rojo-negra muestran el eje de dispersión para las diferentes áreas o zonas, las líneas entrecortadas amarillas son isópletas inferidas.

Figura 56

Mapa de isopletas de pómez del depósito de caída de tefra del “Sandwich Superior”

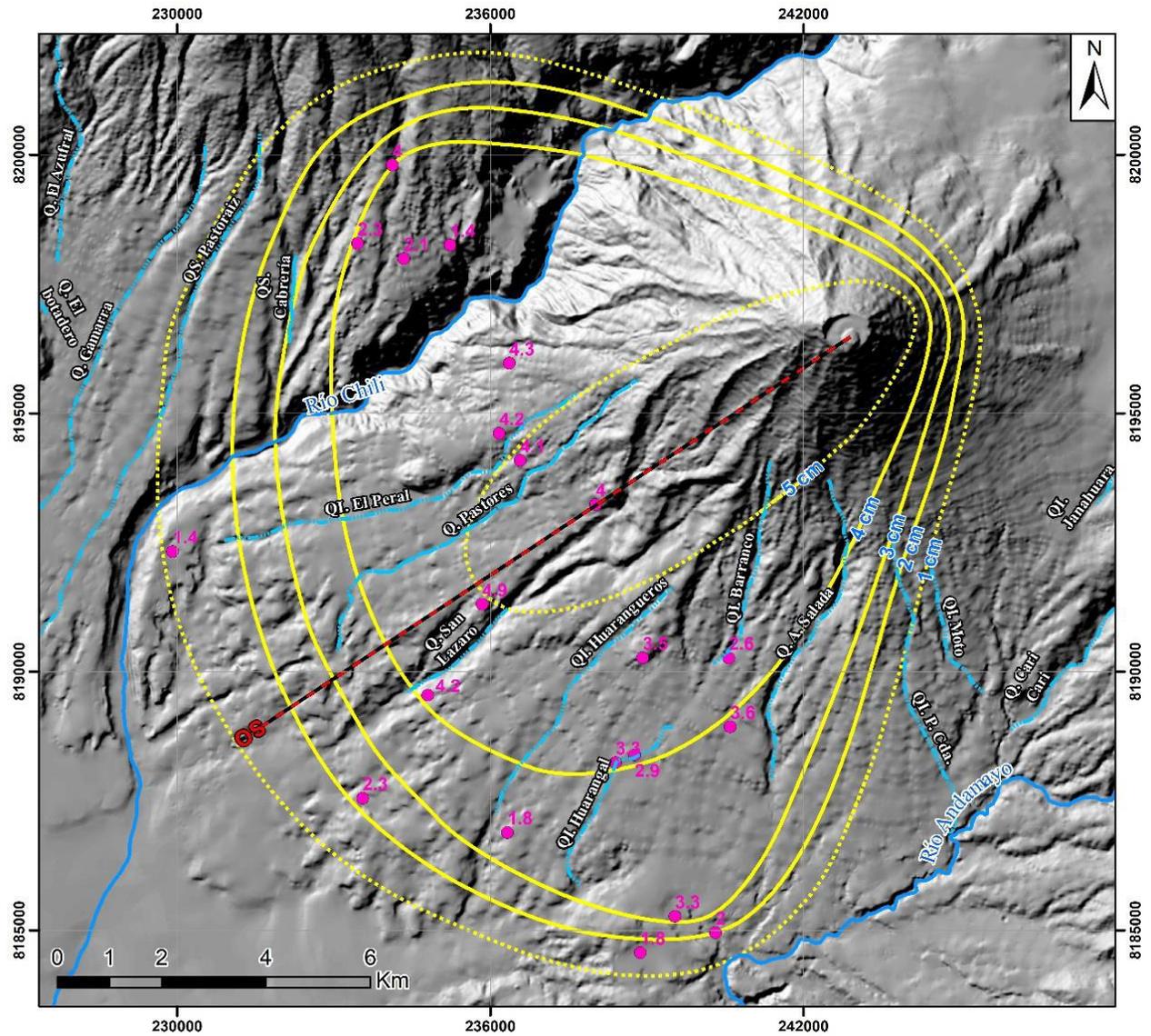


Nota: Las líneas rectas amarillo-negra muestran el eje de dispersión para las diferentes áreas o zonas, las líneas entrecortadas rojas son isópetas inferidas.

5.1.4.2. Mapa de Isopetas de Líticos. Se han elaborado mapas de isópetas de líticos para los depósitos del “Sandwich Inferior” [Figura 57](#) y “Sandwich Superior” [Figura 58](#).

Figura 57

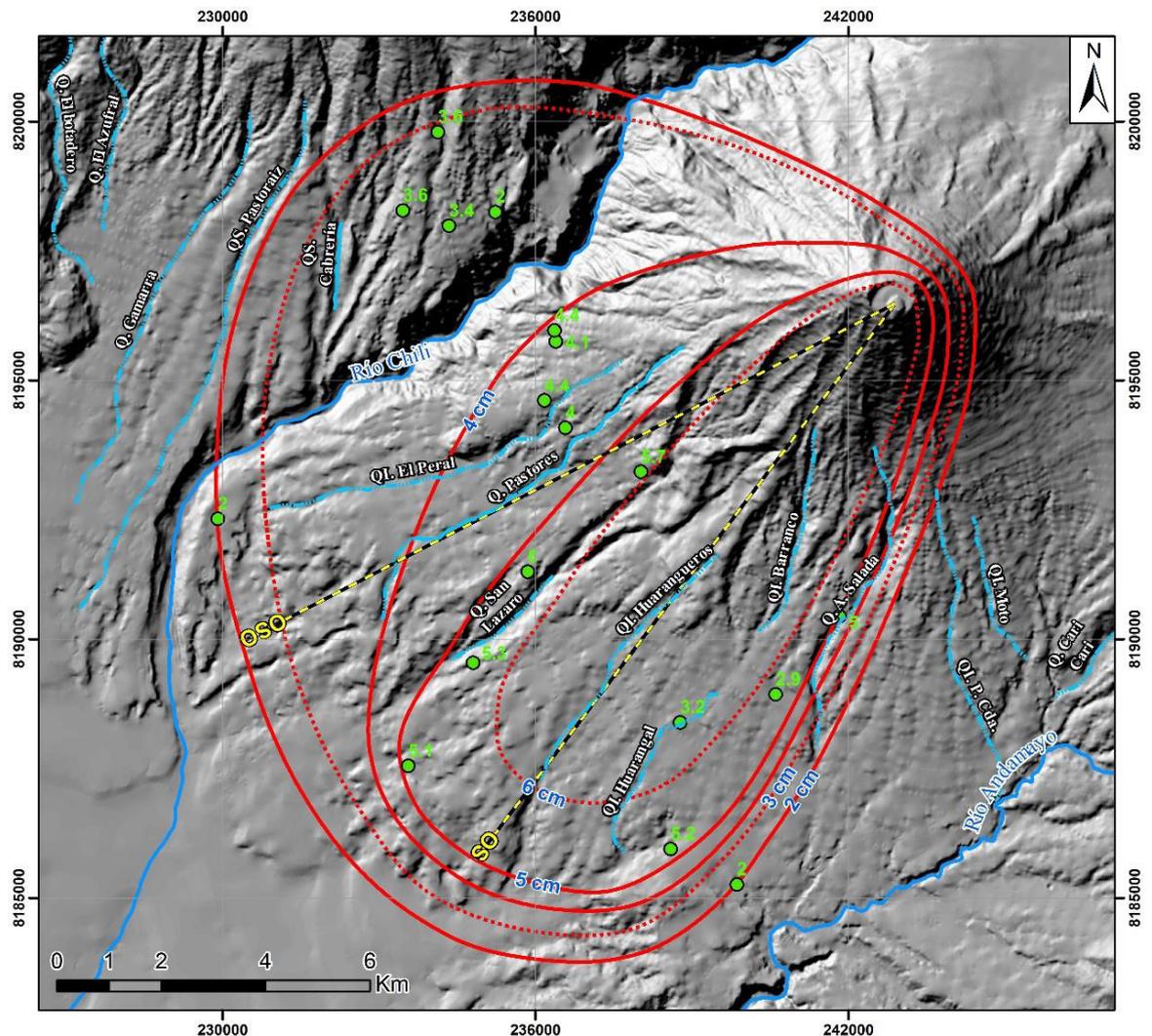
Mapa de isopetas de líticos del depósito de caída de tefra del “Sandwich Inferior”



Nota: Las líneas rectas rojo-negra muestran el eje de dispersión para las diferentes áreas o zonas, las líneas entrecortadas amarillas son isópetas inferidas.

Figura 58

Mapa de isopletas de líticos del depósito de caída de tefra del “Sandwich Superior”



Nota: Las líneas rectas amarillo-negra muestran el eje de dispersión para las diferentes áreas o zonas, las líneas entrecortadas rojas son isópetas inferidas.

5.1.5. Estimación de la Altura de la Columna Eruptiva

Para el cálculo de la altura de la columna eruptiva se usó la implementación en MATLAB de Biass et al. (2015) para el método de Carey & Sparks (1986). El código escrito en MATLAB permite ingresar a través de una interfaz muy sencilla las variables de “downwind” (en km, distancia del eje mayor de la isópleta), “crosswind” (en km, distancia máxima perpendicular desde el eje mayor hacia el punto más alejado de la isópleta), diámetro de clastos (cm) y densidad del clasto (kg/m^3). La aplicación muestra en forma de texto las estimaciones de los valores de la altura de la pluma por encima de la altura de muestreo (km) y la velocidad del viento (m/s) según Carey & Sparks (1986).

Las densidades para líticos se han asumido en 2500 kg/m^3 tanto como para los depósitos del “Sandwich Inferior” como para los depósitos del “Sandwich Superior”, en caso de las escorias y las pómez se han usado únicamente las

densidades asumidas para las escorias que son de 1500 kg/m^3 para ambos depósitos.

La [Tabla 25](#) y [Tabla 26](#) muestran los valores de “crosswind” y “downwind” de cada depósito, así como los resultados para la altura máxima de la columna eruptiva y la velocidad del viento. Cabe considerar que a la altura resultante del programa se le restó la altura de 2.6 km con respecto a la altura del cráter sobre la superficie promedio donde se tomaron los diámetros de los líticos y pómez de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”.

Tabla 25.

Resultados del cálculo en MatLab para hallar la velocidad del viento y la altura máxima de la columna eruptiva de los depósitos del “SI”.

Isópleta (cm)	Downwind (km)	Crosswind (km)	HT (km)	V (m/s)
4	10.35	6.28	25.58	16
3	11.82	8.26	27.67	13
2	12.79	8.59	26.4	11
Promedio			26.55	13.3

Nota: Los datos tomados para esta tabla se basan en los mapas de isópletas de líticos del depósito “Sandwich Inferior”, Ht: altura máxima de la columna (menos 2.6 km respecto a la superficie de la ciudad) calculado por el aplicado de Biass et al. (2015) en base a los cálculos de Carey & Sparks (1986) al igual que la velocidad (V).

Tabla 26

Resultados del cálculo en MatLab para hallar la velocidad del viento y la altura máxima de la columna eruptiva de los depósitos del “SS”

Isópleta (cm)	Downwind (km)	Crosswind (km)	HT (km)	V (m/s)
5	13.43	3.33	19.69	41
4	13.36	5.58	24.09	30
3	13.28	8.41	27.93	17
2	14.14	8.90	26.89	13
Promedio			24.65	25.25

Nota: Los datos tomados para esta tabla se basan en los mapas de isópletas de líticos del depósito “Sandwich Superior”, Ht: altura máxima de la columna (menos 2.6 km respecto a la superficie de la ciudad) calculado por el aplicado de Biass et al. (2015) en base a los cálculos de Carey & Sparks (1986) al igual que la velocidad (V).

Resultados de la Estimación de la Altura Máxima de la Columna Eruptiva. Según los datos de las tablas [Tabla 25](#) y [Tabla 26](#) la altura máxima de la columna eruptiva sobre el cráter para los depósitos del “**Sandwich Inferior**” es de **26.6 km**, con una velocidad promedio de **13.3 m/s** y para los depósitos del

“**Sandwich Superior**” es de **24.7 km**, con una velocidad de viento promedio de **25.3 m/s**.

5.1.6. Estimación de la Dispersión

Tasa de Descarga de Volumen. En base a la ecuación de Sparks et al. (1997).

$$Ht = 1.67Q^{0.259} \dots \text{(ecuación 5)}$$

En donde:

Ht: máxima altura de la columna

Q: tasa descarga de volumen en m³/s

1.67: es una constante relacionada a la estratificación de la atmosfera

Usando los datos de la tabla 7.1.7.1. en la ecuación 5 de Sparks et al. (1997) tenemos para **Q** en los depósitos del “**Sandwich Inferior**” un valor de **4.4x10⁴ m³/s** y para los depósitos del “**Sandwich Superior**” un valor de **3.3x10⁴ m³/s**.

Tasa de Descarga de Masa o Tasa de Masa Eruptiva (MER). Se hizo tres cálculos en base a las ecuaciones más usadas en los diferentes estudios de depósitos de caída de tefra.

En base a la ecuación por Wilson & Walker (1987), mediante la siguiente formula.

$$Hmax = (k \times MER)^{0.25} \dots \text{(ecuación 6)}$$

En donde:

Hmax: máxima altura de la columna sobre el cráter

k: constante empírica típicamente establecida en 0.236 para magmas silíceo y valores entre 0.244-0.295 para magmas andesítico o basálticos.

Tabla 27

Altura de la columna eruptiva máxima (Hmax) sobre el cráter hallados para el “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” y la contante “k” de Wilson & Walker (1987)

Hmax SI (km)	26.60
Hmax SS (km)	24.70
K	0.24

Nota: Datos hallados con el aplicativo de Biass et al. (2015), el valor de k para magmas andesíticos asumido para los depósitos andesíticos.

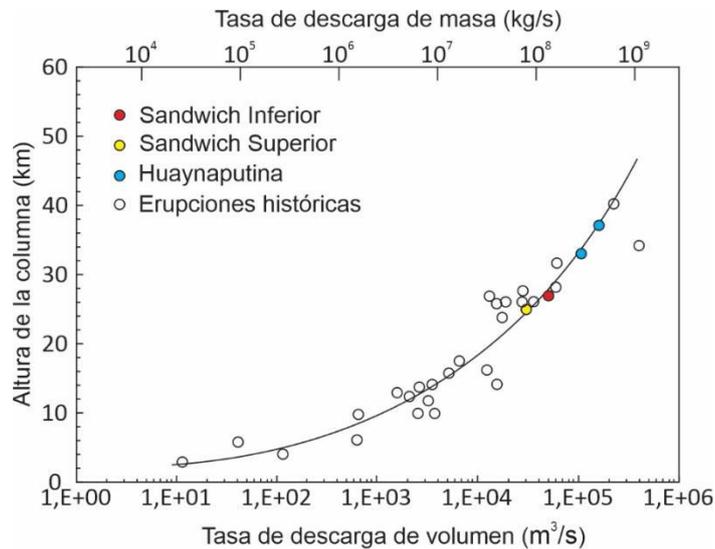
Reemplazando los valores de la [Tabla 27](#) en la ecuación 6 de Wilson & Walker (1987) tenemos. Para los depósitos del “**Sandwich Inferior**” un valor de MER de **1.4x10⁸ kg/s** y para los depósitos del “**Sandwich Superior**” un valor de **1.1x10⁸ kg/s**.

En base al diagrama de Sparks et al. (1997) se plotea los valores de la altura máxima y la tasa de descarga de volumen en la [Figura 59](#). Entonces tenemos el valor

de la tasa de descarga de masa (MER) para el “**Sandwich Inferior**” de $\sim 1.1 \times 10^8$ kg/s y para los depósitos del “**Sandwich Superior**” un valor de $\sim 9 \times 10^7$ kg/s.

Figura 59

Diagrama de Sparks et al. (1997) para hallar la tasa de descarga de masa de las erupciones asociadas a los depósitos del “SI” y “SS”



En base a la ecuación de Mastin et al. (2010), con el ajuste entre relación de la altura con la tasa de descarga de masa de Sparks et al. (1997) mediante la siguiente formula.

$$Hmax = k \times VDR^{0.241} \dots \text{(ecuación 7)}$$

En donde:

Hmax: máxima altura de la columna sobre el cráter

VDR: tasa descarga de volumen en m³/s

k: 2.0 establecida por Mastin et al. (2010)

Para el cálculo de MER en kg/s es necesario multiplicar por la densidad de 2500 kg/m³.

Resolviendo la ecuación 7, para el cálculo del MER según Mastin et al. (2010) tenemos la siguiente formula.

$$MER = \left(\frac{Hmax}{k} \right)^{\frac{1}{0.241}} \times 2500 \dots \text{(ecuación 8)}$$

Usando la ecuación 8 con los datos de la [Tabla 27](#) tenemos un valor de MER de $\sim 1.2 \times 10^8$ kg/s para el depósito del “**Sandwich Inferior**” y $\sim 0.9 \times 10^8$ kg/s para los depósitos del “**Sandwich Superior**”.

5.1.7. Duración de la Erupción

Se calculo según la ecuación propuesta por Walker (1980).

$$Ed = \frac{Mt}{MER} \dots \text{(ecuación 9)}$$

En donde:

Ed: duración de la erupción (s)

Mt= masa total de productos emitidos (kg)

MER = tasa de descarga de la masa (kg/s)

Para hallar la masa total de productos emitidos se asumió una densidad de 1000 kg/m³ para ambos depósitos y con el valor del volumen bulk tomado de los resultados del software AshCalc ([Daggit et al., 2014](#)) según el cálculo de Weibull de Bonadonna & Costa ([2012](#)) se obtiene la masa para cada depósito y la duración de las erupciones en la [Tabla 28](#) según la ecuación 9.

Tabla 28

Tabla de datos calculados de MER (tasa de descarga) y Mt (masa total) con los cuales se obtuvo la duración de la erupción (ED) de los depósitos “SI” y “SS”

	SI	SS
MER (kg/s)	1.05x10 ⁸	0.79x10 ⁸
Mt (kg)	6.1x10 ¹⁰	4.8x10 ¹⁰
ED (horas)	9.6	10.0

Entonces se tiene para la erupción ligada al depósito del “**Sandwich Inferior**” una duración de **9.6 horas** y para el “**Sandwich Superior**” una duración de **10 horas**.

5.1.8. Estilo Eruptivo

De acuerdo a los parámetros obtenidos aplicables a los esquemas de clasificación de Mastin et al. ([2009](#)) en la [Figura 60](#) y Bonadonna & Costa, ([2013](#)) en la [Figura 61](#), tenemos que el depósito del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” corresponden a erupciones de estilo pliniano.

Figura 60

Diagrama de Mastin et al. (2009) para determinar el estilo eruptivo de las erupciones asociadas a los depósitos del “SI” y “SS”.

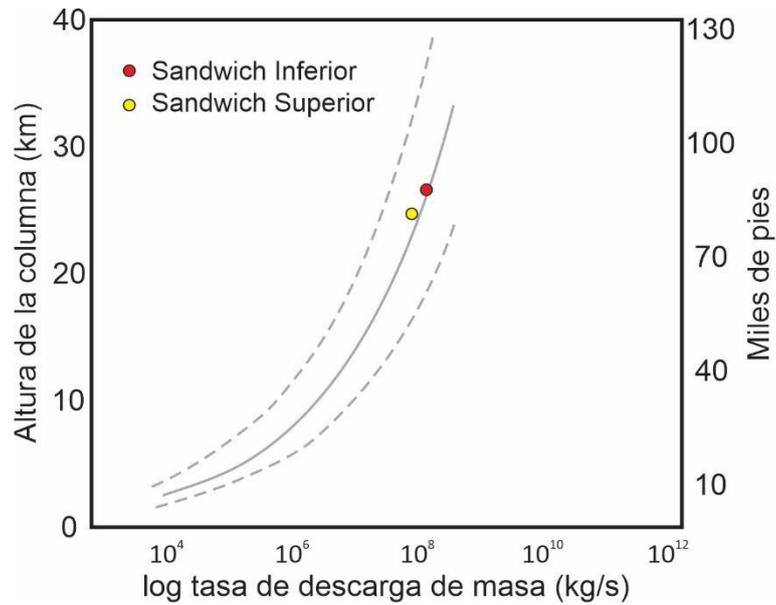
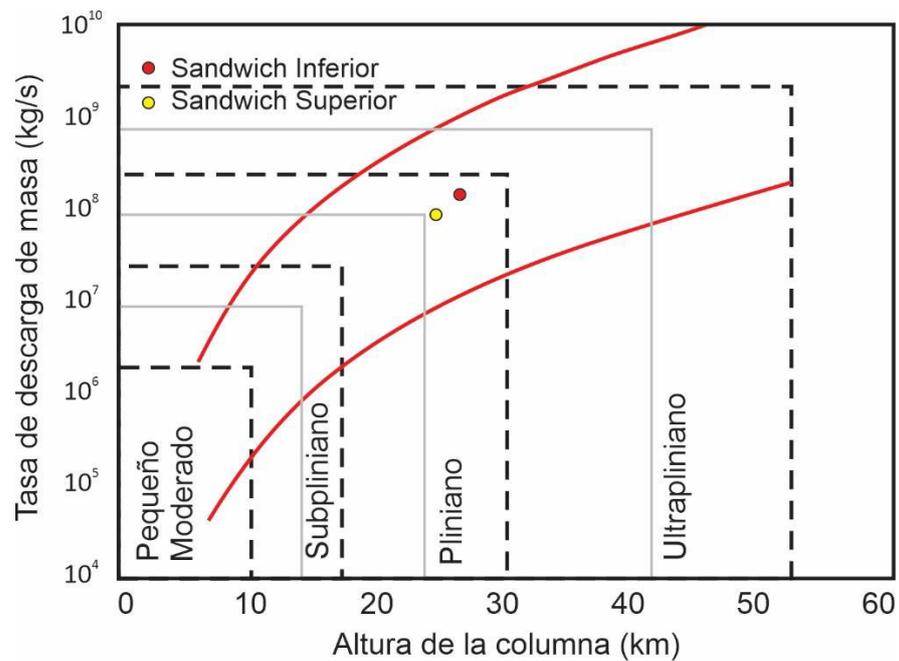


Figura 61

Diagrama de Bonadonna y Costa (2013) para determinar el estilo eruptivo de las erupciones asociadas a los depósitos del “SI” y “SS”



Además, Cioni et al. (2008), propone una distinción entre erupciones plinianas y subplinianas como se ve en la [Tabla 30](#) por la cual los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” corresponden principalmente a erupciones de tipo “Subplinianas II” y “Plinianas” de acuerdo a los datos que hemos calculado y están resumidos en la [Tabla 29](#). Para el uso de la [Tabla 30](#) es necesario dos parámetros adicionales que corresponde al cálculo de Pyle (1989), los cuales se obtienen en las siguientes ecuaciones.

$$b_t = \frac{\ln(2)}{k_T \sqrt{\pi}} \quad y \quad b_c = \frac{\ln(2)}{k_C \sqrt{\pi}}$$

Donde:

k_T : Pendiente del segmento exponencial mejor trazado en la gráfica T (espesor en m) vs la raíz cuadrada del área (en km) de la isópaca.

k_C : Pendiente del segmento exponencial mejor trazado en la gráfica C (diámetro máximo del clasto en m) vs la raíz cuadrada del área (en km) de la isópleta.

Tabla 29

Resumen de valores calculados para los parámetros de las erupciones asociadas a los depósitos del “SI” y “SS”

Depósito	R.	Volumen total (m ³)	Magnitud (kg)	Intensidad (kg/s) Mastin et al. (2010).	Altura de la columna sobre el nivel del mar (km) Carey & Sparks (1986)	b_t (km) Pyle (1989)	b_c (km) Pyle (1989)
Sandwich Inferior	R1	6,1x10 ⁷	6,1x10 ¹⁰	~1,2x10 ⁸	26.6	2,01	1,43
	R2	5x10 ⁸	5x10 ¹¹				
	R3	7,1x10 ⁷	7,1x10 ¹⁰				
Sandwich Superior	R1	4,8x10 ⁷	4,8x10 ¹⁰	~9x10 ⁷	24.7	3,40	2,01
	R2	1,25x10 ⁹	1,25x10 ¹²				
	R3	7,4x10 ⁷	7,4x10 ¹⁰				

R.: Referencia; R1: Bonadonna & Costa (2012); R2: Bonadonna & Houghton (2005) y R3: Pyle (1989)

Tabla 30

Tabla de “Clasificación del Estilo Eruptivo” de las erupciones asociadas a los depósitos del “SI” y “SS” en base a sus parámetros eruptivos.

Principales características de las erupciones Plinianas					
Tipo de erupción	Subpliniana I		Subpliniana II	Pliniana	Ultrapliniana o Ignimbrítica
Volumen total (m ³)	÷10 ⁸		10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁸	-
Magnitud (kg)		~ 10 ¹¹		10 ¹¹ -10 ¹³	>10 ¹³
Intensidad (kg/s)		~ 10 ⁶		10 ⁶ -10 ⁸	> 10 ⁸
Altura de la columna sobre el nivel del mar (km)	15-20		10-15	>20	> 35
b_t (km)		0.5-4		2-10	> 10
b_c (km)		1-3		3-8	8-15
Fases principales	Inestablemente sostenida, columna convectiva			Establemente sostenida, columna convectiva	Fuente sostenida

b_t : distancia desde el cráter donde el espesor alcanza la mitad de su valor total; b_c : distancia desde el cráter donde el diámetro máximo del clasto alcanza la mitad de su valor total (ambos en base a Pyle, 1989). El relleno rojo pertenece a valores del “Sandwich Inferior” y el celeste al “Sandwich Superior”.

Nota: Tabla producto de la compilación de trabajos de Cioni et al. (2000) y Cioni et al. (2008). El relleno rojo pertenece a valores del “Sandwich Inferior” y el celeste al “Sandwich Superior”.

5.1.9. **Magnitud e Intensidad**

Ya que el IEV asume una relación entre magnitud e intensidad pero que en trabajos posteriores se ha demostrado que no hay dicha relación simple, es posible describir y comparar tanto erupciones explosivas como efusivas con dos escalas logarítmicas, una para la masa (magnitud) y otra para la tasa de erupción (intensidad) según Pyle (2000).

Entonces según la ecuación:

$$M = \log_{10}(Mt) - 7 \dots \text{ecuación propuesta por Pyle (2000)}$$

Donde:

M: magnitud

Mt: masa total del depósito erupcionada (kg)

Para la mayoría de las erupciones, las magnitudes definidas de esta manera serán similares a sus IEV. De este modo para el “**Sandwich Inferior**” su magnitud es de 3.8, y para el “**Sandwich Superior**” su magnitud es de 3.7.

Para la **intensidad** se usó la siguiente ecuación:

$$I = \log_{10}(MER) + 3 \dots \text{ecuación propuesta por Pyle (2000)}$$

Donde:

I: Intensidad

MER: tasa de erupción masiva en kg/s

Según esta escala, una erupción extremadamente vigorosa tendrá una intensidad de 10 a 12, mientras que una erupción muy suave podría tener una intensidad de 4 o 5. De este modo para el “**Sandwich Inferior**” su intensidad es de 11.1, y para el “**Sandwich Superior**” su intensidad es de 11.

5.1.10. **Índice de Explosividad Volcánica (IEV)**

Las erupciones se pueden cuantificar cuantitativamente mediante el uso del Índice de Explosividad Volcánica (IEV) propuesto por Newhall and Self (1982), el cual es ampliamente aceptado por la comunidad científica en la actualidad. Este se basa en el volumen máximo de tefra depositado (volumen bulk en m³) y la altura máxima de la columna eruptiva (en km). Este índice tiene una escala de 0 a 8 proporcional al incremento de explosividad y es aplicable solo para erupciones explosivas.

De este modo según los valores obtenidos de los parámetros eruptivos para el “Sandwich Inferior” este tiene un IEV de 2-5 y para el “Sandwich Superior” un IEV de 2-4, como se observa en la [Tabla 31](#).

Tabla 31

Tabla de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) con valores ploteados de los parámetros de las erupciones asociadas al “SI” y “SS”

Indice IEV	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción general	No explosiva	Pequeña	Moderada	Moderada-grande	Grande	Muy Grande			
Descripción cualitativa	Suave	Efusivo	Explosivo		Cataclísmico, paroxístico				
Volumen máximo de tefra en erupción (m ³)	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
Altura de la columna eruptiva (km)	<0,1	0,1-1	1-5	3-15	10-25	>25			
Clasificación	Hawaiano	Estromboliano		Vulcaniano		Pliniano			
Duración			< 1	1-6		>12			
Inyección en la troposfera	Nula	Escasa	Moderada	Sustancial					
Inyección en la estratosfera	No	No	No	Posible	Definida	Significativa			

*Adaptada de Newhall and Self, 1982; por Pyle (2000) en Encyclopedi of Volcanoes (2000) pp 253.

“Sandwich Inferior” (relleno rojo) “Sandwich Superior” (relleno celeste)

Nota: Se observa que el IEV para el “Sandwich Inferior” (relleno rojo) es de 2 a 5 y para el “Sandwich Superior” (relleno celeste) de 2 a 4.

6. Discusión e Interpretación

En este capítulo se discutirá e interpretará los datos obtenidos hasta el capítulo anterior, en los cuales se han alcanzado los objetivos específicos y demostrado sus hipótesis específicas planteadas. Con respecto al objetivo principal en base a los modelamientos de dispersión de tefras y el contraste con la configuración actual de Arequipa, Puno, Tacna y Bolivia, se elaboró el “Mapa de Peligros por Caída de Tefra” (mapa de uso académico que veremos en los apartados siguientes) para demostrar la hipótesis principal, evaluando así el peligro volcánico que representarían erupciones plinianas similares a los que depositaron el “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” si se dieran en condiciones climáticas actuales.

Entonces con respecto a la primera hipótesis específica presentamos las principales diferencias que justifican que el depósito del “Sandwich Inferior” es

independiente y corresponde a otro evento eruptivo que no involucra al “Sandwich Superior”, ya que inicialmente se han descritos como un solo depósito “Sandwich” ([Mariño et al., 2016](#)), alcanzando con esto el primer objetivo específico.

Con respecto a la segunda hipótesis específica, se resumió los datos encontrados de la correlación tefro-estratigráfica y se definió un intervalo de edad para los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”. Además, con los parámetros de altura de la columna eruptiva y volumen depositado se logró modelar sucesos eruptivos similares a los ligados al “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” mediante el uso del software ASH3D (de uso público en la página <https://vsc-ash.wr.usgs.gov/ash3d-gui/#/> del Servicio Geológico de Estado Unidos), alcanzando así el segundo objetivo específico.

Con respecto a la tercera hipótesis específica, se definió el estilo de fragmentación del magma y se describió el suceso eruptivo en base a las características granulométricas, litológicas (componentes), geoquímicas, petrográficas, mapas de isópacas e isópletas y parámetros eruptivos, alcanzando así el tercer objetivo específico.

Finalmente, con todo lo presentado hasta este capítulo se generó las conclusiones y recomendaciones.

6.1. Diferencias entre los Niveles de los Depósitos

Mariño et al. ([2016](#)) menciona: *“El depósito de caída piroclástica de pómez denominado Sándwich se identifica con facilidad ya que **presenta un nivel intermedio de ceniza, de color gris, que en promedio mide 3 cm de espesor. El nivel inferior del depósito es de color gris amarillento, mientras que el superior es amarillo grisáceo, posiblemente por la alteración supérgena de las pómez; ambos niveles son ricos en líticos. El depósito posee entre 0.5 y 0.7 m de espesor, a 8-10 km al SO del cráter del Misti (sector de cerro Pacheco)**”.*

De esto se ha comprobado que el nivel intermedio no corresponde a la caída, ni del “Sándwich Inferior”, ni del “Sandwich Superior”; ya que es un nivel de material fino limoso que contiene ocasionalmente pequeñas pómez o escorias retrabajadas subredondeadas a redondeas con escasos líticos, ambos de un tamaño menor a 1 cm. Además, es preciso mencionar que este nivel intermedio con las características mencionadas está presente cuando ambos depósitos afloran juntos, lo cual es común, pero tanto el nivel inferior como el superior aparecen de forma independiente en varios puntos de afloramiento sin el nivel intermedio reconocible.

Entonces con respecto a los niveles inferior y superior, se ha comprobado que se diferencian tanto en proporción de componentes de pómez (20% para el “Sandwich Inferior” y 15% para el “Sandwich Superior”) y escorias (67% para el

“Sandwich Inferior” y 73% para el “Sandwich Superior”), para el campo de los gruesos, como de cristales de plagioclasa (3% para el “Sandwich Inferior” y 8% para el “Sandwich Superior”) y piroxenos (1.5% para el “Sandwich Inferior” y 0.5% para el “Sandwich Superior”), para el campo de los finos.

Los estudios petrográficos normalizados con el conteo granulométrico de la [Tabla 32](#), revelan principalmente que el “Sandwich Superior” presenta mayor proporción de clinopiroxenos (17.4%), anfíboles (2.6 %) y óxidos de Fe-Ti (4%) que el “Sandwich Inferior” (15.8%, 1.2%, 1.7%, respectivamente).

Tabla 32

Datos combinados y normalizados resultado del conteo granulométrico y conteo por puntos de secciones delgadas para los depósitos del “SI” y “SS”

Depósito	Proporción	Vesículas	Plagioclasas	Anf.	Cpx.	Opx.	Óxidos de Fe-Ti
S. I.	%	%	%	%	%	%	%
Pomez	23	24.0	4.2	0.4	3.1	0.0	0.6
Escoria	77	27.0	15.1	0.8	12.7	0.2	1.0
	Total		19.2	1.2	15.8	0.2	1.7
S. S.							
Pomez	15%	15.0	4.5	0.2	3.8	0.0	0.8
Escoria	85%	20.0	14.4	2.4	13.6	0.8	3.2
	Total		19.0	2.6	17.4	0.8	4.0
Anf.: Anfíboles; Cpx.: Clinopiroxeno; Opx.: Ortopiroxeno; S.I.: “Sandwich Inferior”; S.S.: “Sandwich Superior”							

6.2. Diferencias en los Parámetros Eruptivos de los Depósitos

A partir de los mapas de isópacas obtenidos de los datos de puntos de afloramiento se han observado inicialmente un comportamiento distinto de dispersión, los ejes de dispersión para el “Sandwich Inferior” son SO para zonas proximales y SSO para zonas distales, en caso del “Sandwich Superior” los ejes son OSO para zonas proximales y SO para zonas distales.

Los parámetros eruptivos principales obtenidos también difieren considerablemente como muestra la [Tabla 33](#) y [Tabla 34](#).

Tabla 33

Comparación de resultados obtenidos para los parámetros eruptivos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

Parámetros eruptivos	Volumen (km ³)	Altura de la columna (km)	Velocidad del viento (m/s)	Tasa de masa eruptiva (MER) (kg/s)

Depósito	Pyle (1989)	Bonadona & Houghton (2005)	Bonadona & Costa (2012)	Carey & Sparks (1986)	Carey & Sparks (1986)	Wilson & Walker (1987)	Sparks et al. (1997)	Mastin et al. (2010)
Sandwich Inferior	0,071	1,25	0,061	26,6	13,3	1,4x10 ⁸	~6x10 ⁷	~1,2x10 ⁸
Sandwich Superior	0,074	0,5	0,048	24,7	25,3	1,1x10 ⁸	~5x10 ⁷	~0,9x10 ⁸

Nota: El volumen considerado para los depósitos es el de Bonadona & Costa (2012) y el MER de Mastin et al. (2010) debido al contraste con datos de campo y a que dan nuevos fundamentos para un cálculo más preciso.

Tabla 34

Resumen de resultados obtenidos de la tasa de descarga de volumen, duración de la erupción, estilo eruptivo y el Índice de Explosividad Volcánica (IEV), para las erupciones asociadas a los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

Parámetros eruptivos	Tasa de descarga de volumen (m ³ /s)	Duración de la erupción (horas)	Estilo eruptivo	IEV
Depósito	Sparks et al. (1997)	Walker (1980)	Bonadona & Costa (2013)	Newhall and Self (1982)
Sandwich Inferior	4,4x10 ⁴	9,6	Pliniano	2-5
Sandwich Superior	3,3x10 ⁴	10	Pliniano	2-4

6.3. Estilo de Fragmentación

De lo mencionado en las bases teóricas de estilo de fragmentación (capítulo 2; 2.2.6.) tenemos en base a la Tabla 35 para el depósito del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” una vesicularidad entre 30% a 50%, lo que nos indica que la viscosidad y tasa de erupción no fueron altas, que disminuyeron los volátiles y el magma pudo desacoplarse.

Como se ha visto en capítulos anteriores la morfología de las escorias y pómez, para ambos depósitos, son rugosas e irregulares.

Ambas características (vesicularidad y morfología de juveniles) definen una fragmentación magmática (según Cas y Wright, 1987) tanto para el “Sandwich Inferior” como para el “Sandwich Superior”. Una ligera diferencia sería la vesicularidad mayor del “Sandwich Inferior”, lo que indicaría una menor viscosidad del magma.

La baja proporción de líticos cogenéticos en ambos depósitos también nos indica un estilo magmático (según Barberi et al., 1989).

Tabla 35

Resumen de datos obtenidos de conteo granulométrico y conteo por puntos de secciones delgadas para los depósitos del “SI” y “SS”

Depósito	Proporción	Vesículas
Sandwich Inferior		%
Pomez	16%	35.6
Escoria	61%	37.2
Líticos cogenéticos	16%	
Líticos no juveniles	5%	
Sandwich Superior		
Pomez	15%	27.5
Escoria	61%	32.2
Líticos cogenéticos	16%	
Líticos no juveniles	5%	

Nota: El porcentaje de vesículas incluye un 33% agregado del cálculo de matriz y otros (MTO) para corregir errores visuales y de cálculo. No se han considerado cristales ni “mingling”.

6.4. Edad de los Depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”

En la [Tabla 36](#) se tiene en base a las correlaciones de columnas estratigráficas de campo de esta tesis y de otros estudios, las caídas más importantes del volcán Misti. En esta tabla se observa que los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” tienen una edad menor a 33.7 mil años y mayor a 2 mil años. Sin embargo, la diferencia de edad entre los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” es corta con respecto a otros eventos eruptivos plinianos, debido a que la capa que los divide por lo menos en 20 afloramientos siempre es delgada, lo cual indica un tiempo geológico corto.

Tabla 36

Depósitos de caída de tefra conocidos ligados a erupciones plinianas del volcán Misti

DEPÓSITOS DE CAÍDA PIROCLÁSTICA DEL MISTI	DATACIÓN (ka)	IEV	ESTUDIO MÁS RECIENTE	ESTUDIO A DETALLE
Ceniza "Pachacutec"		2	Thouret et al., 2001	NO
"2 ka"	2	5	Harpel et al., 2011	SI
"Rosado"			Mariño et al., 2016	NO
"Sandwich Superior"		4	Escobar, 2021	SI
"Sandwich Inferior"		5	Escobar, 2021	SI
"Espuma Iridiscente"			Harpel et al., 2018	NO
"Espuma Gris"			Harpel et al., 2018	NO
"Autopista"		4	Cacya, 2006	SI
"Zebra"			Harpel et al., 2018	NO
"Blanco"			Mariño et al., 2016	NO
"Fibroso II"			Mariño et al., 2016	NO
"Sacarosa"	33.7	5	Cuno, 2019	SI

"Fibroso I"		Mariño et al., 2016	NO
-------------	--	---------------------	----

6.5. Modelo del Suceso Eruptivo

Haciendo una recopilación de las características y parámetros principales encontrados en base al estudio de los depósitos del "Sandwich Inferior" y "Sandwich Superior" en la [Tabla 37](#), podemos hacer una breve reseña de los sucesos eruptivos ligados a ellos hace aproximadamente ~9 mil años atrás, de la siguiente manera:

La erupción del "Sandwich Inferior" ocurrida hace 9 mil años atrás involucro la fragmentación magmática de dos magmas andesíticos calcoalcalinos de mediana a fuertemente potásico que le dieron la peculiaridad de expulsar principalmente pómez, escorias y "mingling" (escorias marrones con bandas blanquecinas). El inicio de la actividad eruptiva fue brusco, no tuvo evento previo y la culminación fue gradual (debido a que no hay gradación en la capa depositada). El inicio de la actividad involucro magma más ácido (debido a ello se tiene la presencia de una ligera concentración de pómez en la parte inferior de la capa depositada), pero el magma predominante fue más básico (escorias predominantes en toda la capa). La altura máxima de la columna eruptiva alcanzada fue de 26.6 km, esta fue influenciada por vientos con una dirección inicial hacia el suroeste (SW) y hacia el término de la erupción hacia el sur-suroeste (SSW), la duración de la erupción fue de 9.6 horas, lo que depósito 6.1×10^7 m³ de tefra en un área semielíptica hacia el suroeste del volcán Misti. La erupción resultante fue de estilo pliniano y tuvo un Índice de explosividad Volcánico máximo de 5.

Para la erupción del "Sandwich Superior" ocurrida hace ~8.5 mil años, el evento eruptivo tiene similares características cualitativas a la del "Sandwich Inferior" y las características cuantitativas se pueden ver en la [Tabla 37](#), considerando que fue una erupción de menor Índice de Explosividad Volcánico (4) y que el magma (ligeramente más andesítico) en su ascenso pudo tener contacto con una zona hidrotermalizada debido a que en este depósito se encontró fragmentos líticos rojizos.

Tabla 37

Características principales para reconstruir el suceso eruptivo de las erupciones ligadas a los depósitos del "Sandwich Inferior" y "Sandwich Superior"

DINÁMICA ERUPTIVA	ERUPCIONES	
	"Sandwich Inferior"	"Sandwich Superior"
IEV	5	4
Fragmentación	Magmática	

Composición	Dos magmas andesíticos calcoalcalinos de mediana a fuertemente potásicos	
Altura máxima de la columna eruptiva	26.6 km	24.7 km
Ejes de dispersión	SW y SSW	WSW y SW
Velocidad del viento	13.3 m/s	25.2 m/s
Duración	9.6 horas	10 horas
Volumen del magma	$2.4 \times 10^7 \text{ m}^3$	$1.9 \times 10^7 \text{ m}^3$
Volumen depositado	$6.1 \times 10^7 \text{ m}^3$	$4.8 \times 10^7 \text{ m}^3$
Otros		posibilidad de contacto con zona hidrotermalizada

6.6. Peligro Volcánico y Alcance Areal de las Erupciones

Erupciones similares a las que produjeron los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” de IEV 5-4, teniendo en cuenta que no se ha descartado la presencia de depósitos de corrientes de densidad piroclástica (ya sea de flujo piroclástico o de bloques y ceniza) y/o de lahares para ambas erupciones, los cuales representan un peligro mayor para las zonas más cercanas (~13 km) y las ubicadas en las torrenteras o quebradas que cruzan varios de los distritos de la ciudad de Arequipa.

Considerando que el Misti tiene un cráter que se encuentra a 17 km del centro de la ciudad, ~11 km del punto límite rural más cercano del distrito de Paucarpata, Alto Selva Alegre y Miraflores, ~9.5 km punto límite rural más cercano de Cayma, Mariano Melgar y Chiguata (datos de imágenes satelitales Google Earth del 27/02/2020).

En caso de las erupciones ligadas a los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”, causarían capas de pómez y/o escoria en los límites urbanos y rurales de los distritos como se muestra en la [Tabla 38](#), sin embargo, el alcance real de las erupciones se verá en el apartado [8.7.1.](#) gracias a las simulaciones y el mapa de peligros que se ha elaborado en esta tesis.

Tabla 38

Distritos en donde hay presencia de depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” con sus respectivos espesores encontrados

DEPÓSITO	ESPESOR				
Sandwich Inferior	40 a 50 cm	40 - 30 cm	25 - 20 cm	20 - 10 cm	10 - 8 cm
Sandwich Superior				17 - 14 cm	14 - 8 cm
Distancia desde el cráter del Misti	9.8 - 10.4 km	10.3 - 11.5 km	12.2 - 13.1 km	9.8 - 14.3 km	11.3 - 15.2 km
DISTRITOS	Mariano Melgar	Chiguata	Chiguata	Alto Selva Alegre	Alto Selva Alegre
Algunos puntos de los límites urbanos más cercanos al Misti Alto Selva Alegre: 11.8 km Cayma: 10.9 km Chiguata: 9.0 km Mariano Melgar: 9.8 km Miraflores: 11.0 km Paucarpata: 11.6 km		Mariano Melgar	Mariano Melgar	Chiguata	Cayma
		Miraflores	Miraflores	Mariano Melgar	Chiguata
			Paucarpata	Miraflores	Mariano Melgar
				Paucarpata	Miraflores
					Paucarpata

Estas capaz podrían colapsar techos según las experiencias recogidas de la erupción del volcán Galeras (Torres, 2001) en la Tabla 39, contaminar: ríos, reservorios, represas de agua, suelos; destruir la vegetación y envenenar animales. Teniendo un gran impacto ambiental y económico en la ciudad.

Tabla 39

Resultados del análisis de cargas de colapso para techos de viviendas en base a la zona de influencia del volcán Galeras

Clase de cubierta	Descripción	Carga de colapso, Q mean	Espeesor de ceniza equivalente
Liviana	Techos que tienen como material de cobertura hojas de zinc o aluminio y hasta cartón o similares como marquesinas en marcolita u otro material acrílico o vidrio. La estructura de cubierta puede ser en madera o metálica.	1,0 kPa	8,2 cm
Moderada	Techos que tienen como material de cobertura hojas de zinc o aluminio y hasta cartón o similares como marquesinas en marcolita u otro material acrílico o vidrio. La estructura de cubierta puede ser en madera o metálica.	1,3 kPa	10,6 cm
Pesada	Techos que tienen como material de cobertura hojas de zinc o aluminio y hasta cartón o similares como marquesinas en marcolita u otro material acrílico o vidrio. La estructura de cubierta puede ser en madera o metálica.	2,5 kPa	20,4 cm
Losa Maciza	Techos que tienen como material de cobertura hojas de zinc o aluminio y hasta cartón o similares como marquesinas en marcolita u otro material acrílico o vidrio. La estructura de cubierta puede ser en madera o metálica.	5,5 kPa	44,9 cm
Losa Aligerada	Techos que tienen como material de cobertura hojas de zinc o aluminio y hasta cartón o similares como marquesinas en marcolita u otro material acrílico o vidrio. La estructura de cubierta puede ser en madera o metálica.	5,8 kPa	47,3 cm

Nota: Tabla realizada por Torres (2001).

Las probabilidades según las columnas tefro-estratigráficas y los estudios más recientes de las erupciones plinianas del volcán Misti sugieren lapsos de 2 mil años para erupciones plinianas de un IEV de 4 a 5, habiendo ocurrido la erupción del “2 ka” hace ya más dos mil años podríamos decir que una erupción pliniana en este siglo es posible. Por esta razón y por tener un volcán activo muy próximo a una ciudad tan grande, el INGEMMET a través su Observatorio Vulcanológico realizan monitoreos geofísicos, geoquímicos y visuales del Misti. De esto se informa que en la actualidad la ocurrencia de una erupción pliniana es baja, sin embargo, el monitoreo es permanente y las alertas son actualizadas mediante su página web http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=999.

6.6.1. Mapa de Peligros en Base a Simulaciones de las Erupciones Asociadas a los Depósitos del “Sandwich”

Con los datos de los parámetros eruptivos de las erupciones del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” (Tabla 33 y Tabla 34), y mediante el uso del software Ash3D Volcanic Ash Dispersion Model provista por el “United States Geological Survey” (USGS) en su página web (<https://vsc-ash.wr.usgs.gov/ash3d-gui/#/>); se modeló las erupciones con datos climatológicos actuales de dirección y velocidad del viento (provistas por el National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA) que originaron los depósitos del “Sandwich”. Los datos climatológicos obtenidos del SENAMHI (Tabla 9, capítulo 4) sirvieron para escoger el día donde la dirección del viento es la preferente (según el procesado de datos de viento de la estación Chiguata).

El resultado de las simulaciones fueron mapas de isópacas de tefra (mm), ceniza en el aire (g/m^2), altura máxima de ceniza (pies) y tiempo de llegada de ceniza (en horas) según su dispersión como se observa en la Figura 62 y Figura 63.

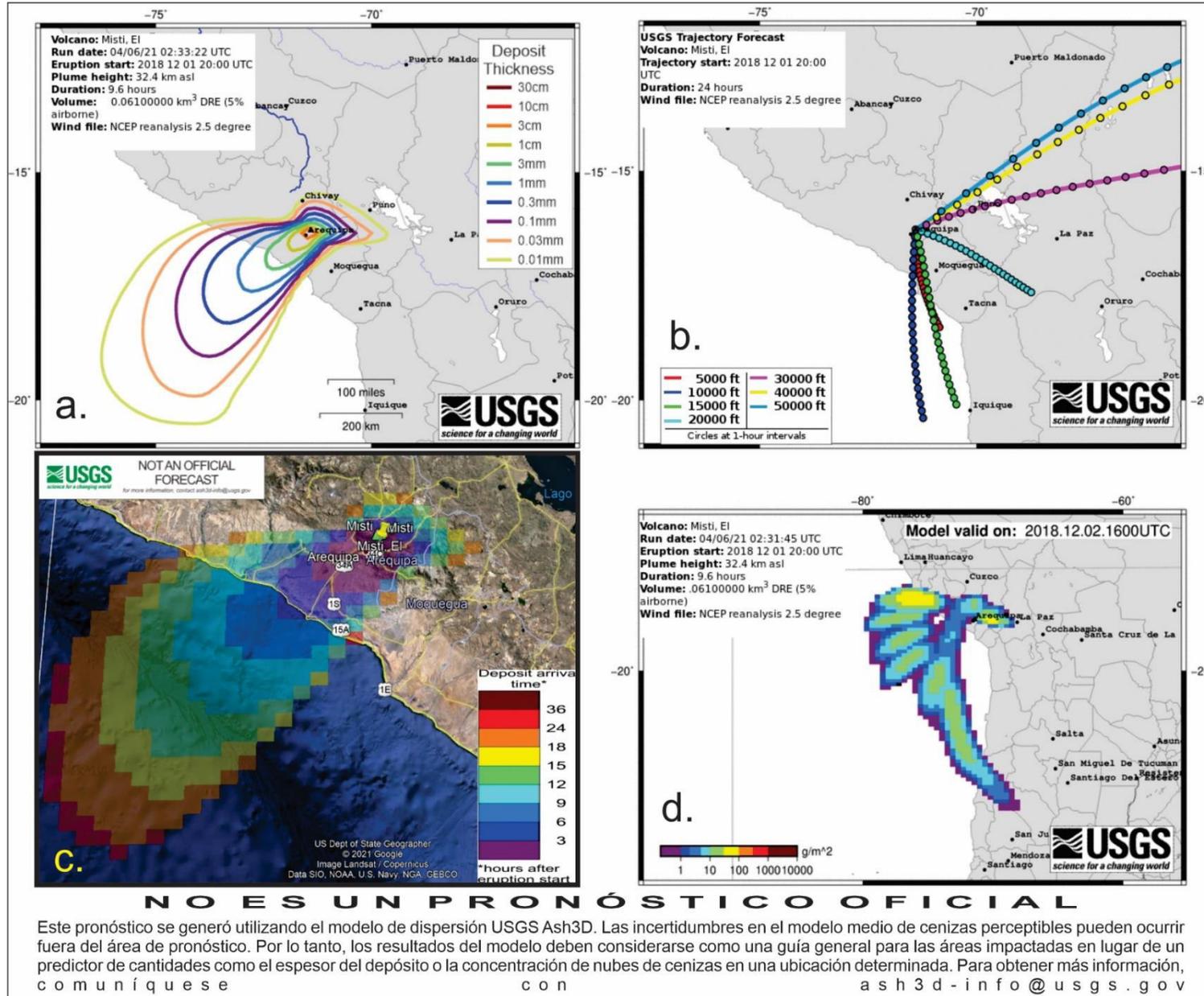


Figura 62

Cuatro mapas de simulación en caso una erupción similar al “Sandwich Inferior” se diera en las condiciones climáticas del día 01-12-2018, comenzando a las 20:00 horas con una duración de 9.6 horas

Nota:

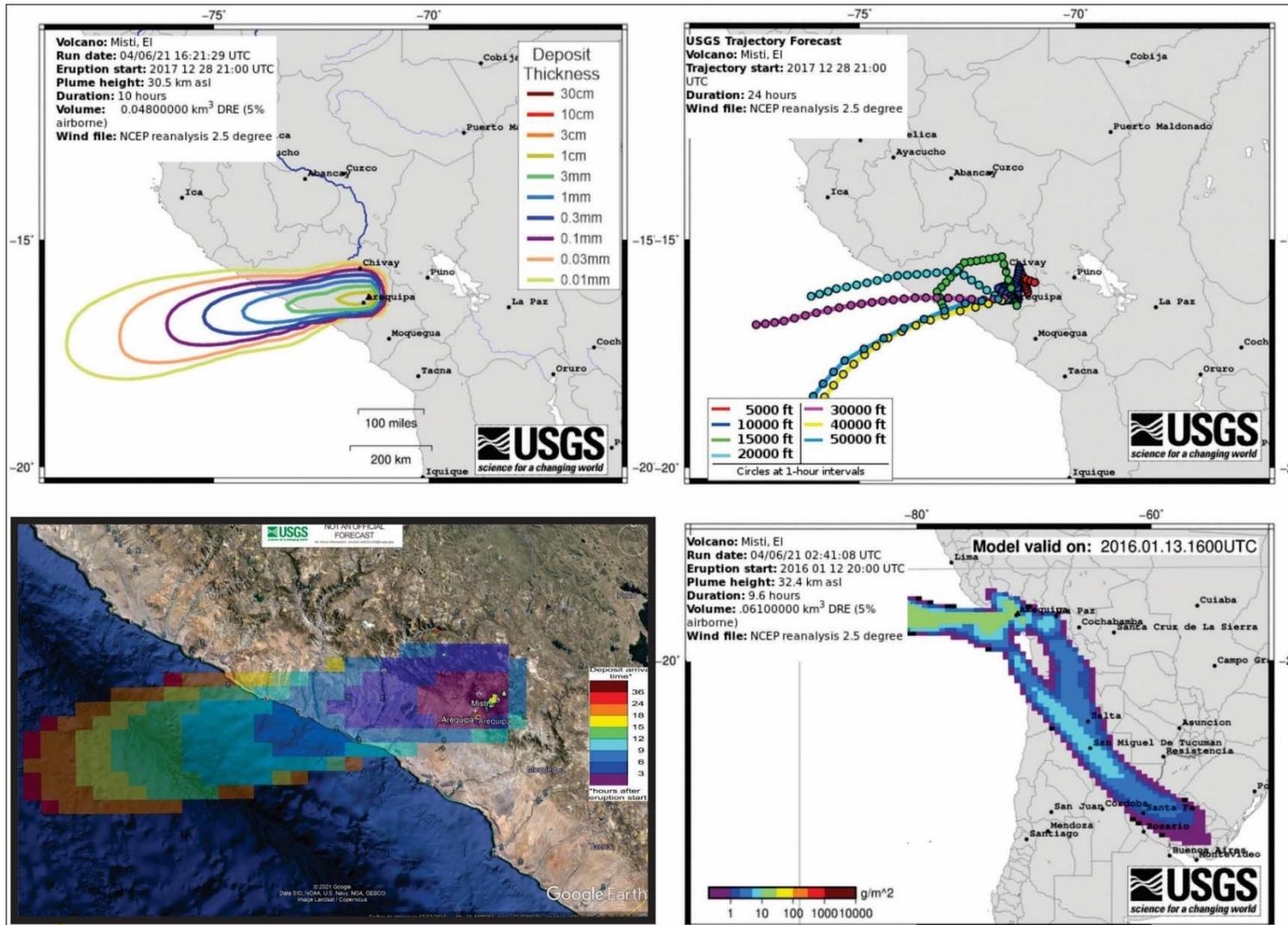
- Se observa isópacas del “Sandwich Inferior”, desde 0.01 mm hasta 3 cm.
- Se observa la altura máxima y trayectoria de las nubes de ceniza del “Sandwich Inferior”.
- Se observa el tiempo de llega en horas a las ciudades una vez iniciado la erupción del “Sandwich Inferior”.
- Se observa la carga máxima en el aire (g/m²) de ceniza y las áreas máximas de expansión.

Figura 63

Mapas de simulación en caso una erupción similar al “Sandwich Superior” se diera en las condiciones climáticas del día 28-12-2017, comenzando a las 21:00 horas con una duración de 10 horas

Nota:

- Se observa isópacas del “Sandwich Inferior”, desde 0.01 mm hasta 3 cm.
- Se observa la altura máxima y trayectoria de las nubes de ceniza del “Sandwich Inferior”.
- Se observa el tiempo de llega en horas a las ciudades una vez iniciado la erupción del “Sandwich Inferior”.
- Se observa la carga máxima en el aire (g/m^2) de ceniza y las áreas máximas de expansión.



NO ES UN PRONÓSTICO OFICIAL

Este pronóstico se generó utilizando el modelo de dispersión USGS Ash3D. Las incertidumbres en el modelo medio de cenizas perceptibles pueden ocurrir fuera del área de pronóstico. Por lo tanto, los resultados del modelo deben considerarse como una guía general para las áreas impactadas en lugar de un predictor de cantidades como el espesor del depósito o la concentración de nubes de cenizas en una ubicación determinada. Para obtener más información, comuníquese con ash3d-info@usgs.gov

Para la elaboración del **Mapa de Peligros por Caídas de Tefra para Erupciones de Magnitudes Similares al “Sandwich” IEV 5-4 de uso académico**, se interpretaron y procesaron los datos de 24 simulaciones de erupciones con los parámetros eruptivos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” en Ash3D.

El resultado fue el mapa de la [Figura 64](#), este muestra 3 zonas o áreas donde la dispersión abarco mayores distancias hacia el SW y al NE concordantes con la dirección preferente del viento según el análisis estadístico histórico de los años 2017 a 2018 del SENAMHI; sin embargo, es necesario mencionar que al correr las simulaciones se tomaron direcciones de viento hacia el SW, NE, NW y SE. Las zonas en este mapa son: Zona Celeste, Zona Verde y Zona Amarilla.

La [Figura 65](#) corresponde al área de influencia de la Zona Amarilla que debido a la escala no es lo suficientemente visible en la [Figura 64](#). En esta figura se observa adicionalmente la Zona Naranja y la Zona Roja donde la dirección preferente del viento ha sido hacia el SW y al NE. Este mapa tiene mayor relevancia debido a que los espesores de tefra son mayores y afectan a la ciudad de Arequipa con más de un Millón de habitantes.

Las zonas de la [Figura 64](#) están basados en simulaciones de Ash3D, pero las de la [Figura 64](#) solo se basan en los mapas de las isópacas encontradas del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior. Todas las zonas están descritas en la [Tabla 40](#), en la cual se ha resumido los principales medios afectados en cada zona.

Tabla 40

Descripción de las zonas de los Mapas de Peligros por Caídas de Tefra para Erupciones de Magnitudes Similares al “Sandwich” IEV 5-4 (uso académico)

Zonas	Descripción	Principales afectados
Zona Celeste	Indica espesores de lapilli de 3 mm hasta 1 cm (en dirección al cráter del Misti). Zona más distal de menor impacto.	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminar casi el área total del lago Titicaca. • Afectar vuelos de los aeropuertos de Puno, Moquegua y Arequipa. • Afectar la flora y fauna en las reservas: Reserva Aymara Tupaca y Reserva Nacional Titicaca. • Turismo. • Contaminar ríos y represas.
Zona verde	Indica espesores de lapilli de 1 cm hasta 3 cm (en dirección al cráter del Misti). Zona distal.	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminar con 1 cm de tefra el área del borde SW del lago Titicaca. • Contaminar con ~2 cm de tefra la laguna de Salinas y la represa El Frayle. • Afectar la flora y fauna del altiplano entre el lago Titicaca y los extremos de Arequipa y Moquegua. • Afectar vuelos de los aeropuertos de Puno y Arequipa. • Turismo. • Contaminar ríos y represas.

<p>Zona Amarilla</p>	<p>Indica espesores de lapilli de 3 cm hasta 10 cm (en dirección al cráter del Misti). Zona intermedia</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminar la represa Aguada Blanca. • Contaminar los ríos Chili y Andamayo. • Afectar la central hidroeléctrica de Charcani. • Afectar vuelos del aeropuerto de Puno y Arequipa. • Afectar la flora y fauna en las reservas Salina y Aguada Blanca. • Turismo. • Si hay presencia de lluvias en el momento de la erupción, podría generar lluvias acidas que dañarían centros históricos y construcciones antiguas.
<p>Zona Naranja</p>	<p>Indica espesores de lapilli de 10 cm hasta 20 cm (en dirección al cráter del Misti). Zona proximal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminar los ríos Chili y Andamayo. • Afectar la central hidroeléctrica de Charcani. • Afectar carreteras y vías de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata y Chiguata (de 10 a 15 km desde el cráter del Misti). • Destruir la flora y fauna de comunidades cercanas al Misti. • Turismo. • Causar el colapso de techos de construcción liviana a moderada (calamina y similares), propios de estas zonas de invasión. • En esta zona la erupción arroja fragmentos de pómez que según los datos del "Sandwich" podrían tener ~6 cm de diámetro para las pómez y ~3 cm de diámetro para los líticos, lo cual podría causar lesiones en los habitantes de los distritos Alto Selva Alegre, Mariano Melgar, Paucarpata y Chiguata, de 10 a 15 km desde el cráter del Misti. • Si hay presencia de lluvias en el momento de la erupción, podría generar lluvias acidas que dañarían viviendas, vehículos, etc.
<p>Zona roja</p>	<p>Indica espesores de lapilli mayores a 20 cm (en dirección al cráter del Misti). Zona más proximal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminar el río Chili, obstruir su circulación. • Afectar la central hidroeléctrica de Charcani (daños considerables). • Afectar carreteras y vías (obstrucción de la circulación vehicular) de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar y Chiguata (10 a 13 km desde el cráter del Misti). • Destruir la flora y fauna de comunidades cercanas al Misti. • Turismo. • Causar el colapso de techos de construcción pesada (tejones o tejas de barro), comunes en zonas de invasión. En esta zona la erupción arroja fragmentos de pómez que según los datos del "Sandwich" podrían tener ~7 cm de diámetro para las pómez y ~4 cm de diámetro para los líticos, lo cual podría causar lesiones graves en los habitantes de los distritos Alto Selva Alegre, Mariano Melgar, Paucarpata y Chiguata, de 10 a 13 km desde el cráter del Misti. • Si hay presencia de lluvias en el momento de la erupción, podría generar lluvias acidas que dañarían viviendas, vehículos, etc.

El alcance real de las erupciones ligadas a los depósitos del "Sandwich Inferior" y "Sandwich Superior" se ve en la [Figura 64](#), y en base a esta, en la [Tabla 41](#) se tiene sus puntos más distales.

Tabla 41

Puntos más distales en caso se dieran erupciones similares al "Sandwich Inferior" y "Sandwich Superior" en la actualidad

<p>Depósitos "Sandwich"</p>	<p>LIMITES DE DISPERSIÓN SEGÚN EL MAPA DE PELIGROS (USO ACADÉMICO)</p>
-----------------------------	--

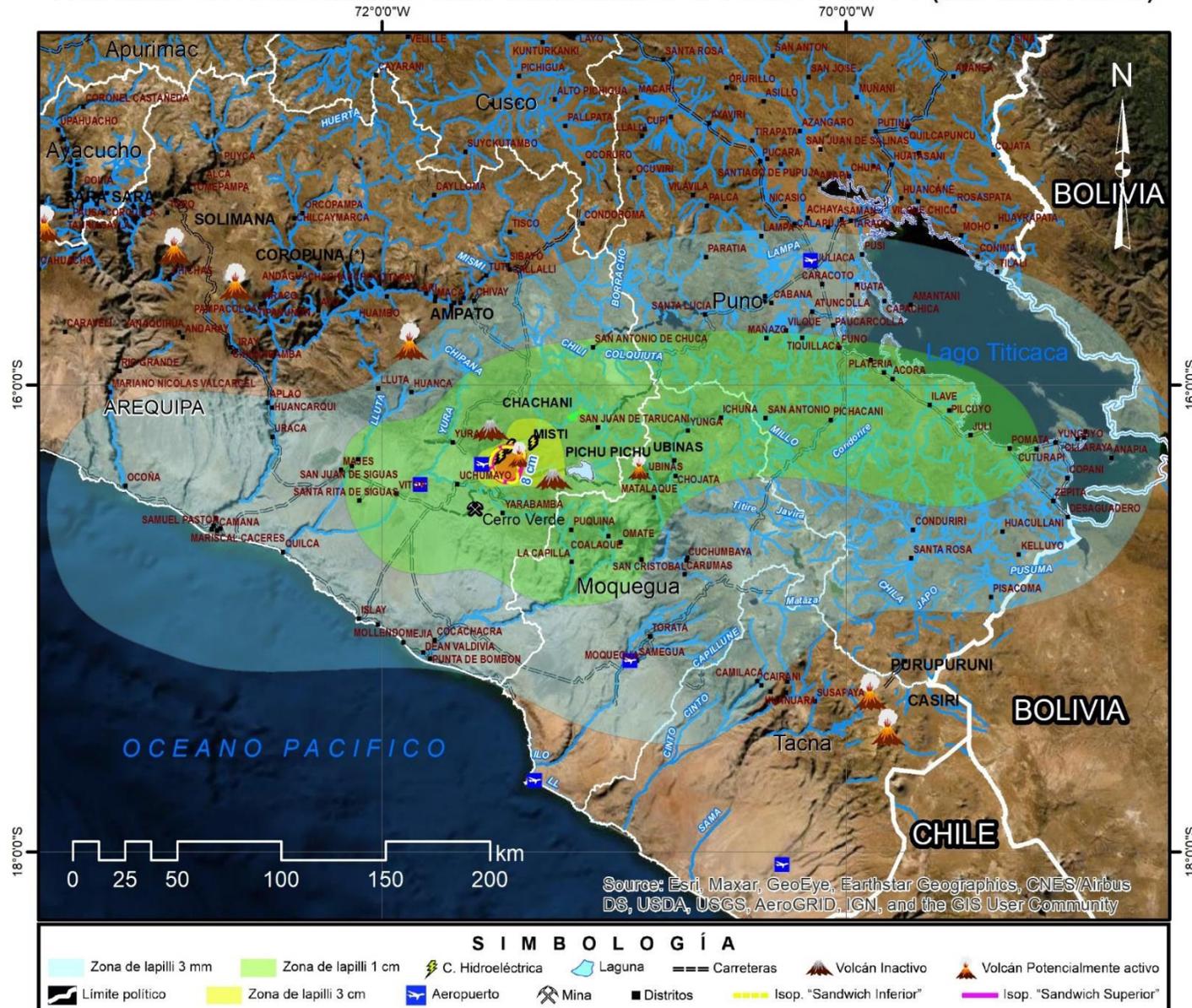
ÁREA TOTAL ABARCADA: 83754 km² ISÓPACA: 3 mm				
Dirección preferente	SW		NE	
Punto más distal	220 km		294 km	
Principales lugares más distales abarcados	208 km de playas	~12 % del NO de la Región Tacna	~8100 km ² (~98%) Lago Titicaca - 1% del SE de Bolivia	45% del sur de la Región Puno
	~45% del SE de la Región de Arequipa			
	Punta Bombón - Islay	Mirave	Localidad de Achacachi (Bolivia)	Chivay - Caylloma
	hasta Cerro de Arena-Atico-Caravelí			
60 km del Océano Pacífico				
Dirección complementaria		S		N

Es necesario aclarar que la elaboración de un Mapa de Peligros por Caídas de Tefra para uso real de prevención, el cual pudiera ser distribuido a autoridades de gobiernos locales y regionales, necesita por lo menos de la interpretación y procesamiento de mil simulaciones en varios softwares (Fall3D, VolcFlow, etc.) con datos de parámetros eruptivos de erupciones propias del Misti y de otras erupciones que tengan similitud con este volcán; además de la recolección de base de datos actuales de ríos, represas, reservas naturales y otros tipos susceptibles a ser afectados por caídas de tefras y lluvias acidas. Finalmente, se debe considerar que los datos climatológicos usados deben ser de estaciones meteorológicas locales, como aquellos provistos por SENAMHI, ya que los softwares de modelamiento por caída, dispersión de tefras y ceniza trabajan por defecto con datos de estaciones meteorológicas regionales, provistas por el National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA.

MAPA DE PELIGROS POR CAÍDAS DE TEFRA PARA ERUPCIONES DE MAGNITUDES SIMILARES AL "SANDWICH" IEV 5-4 (USO ACADÉMICO)

Figura 64

Mapa de Peligro por caídas de tefra en base a erupciones de IEV 5-4 que dejaron los depósitos del "Sandwich" (uso académico)

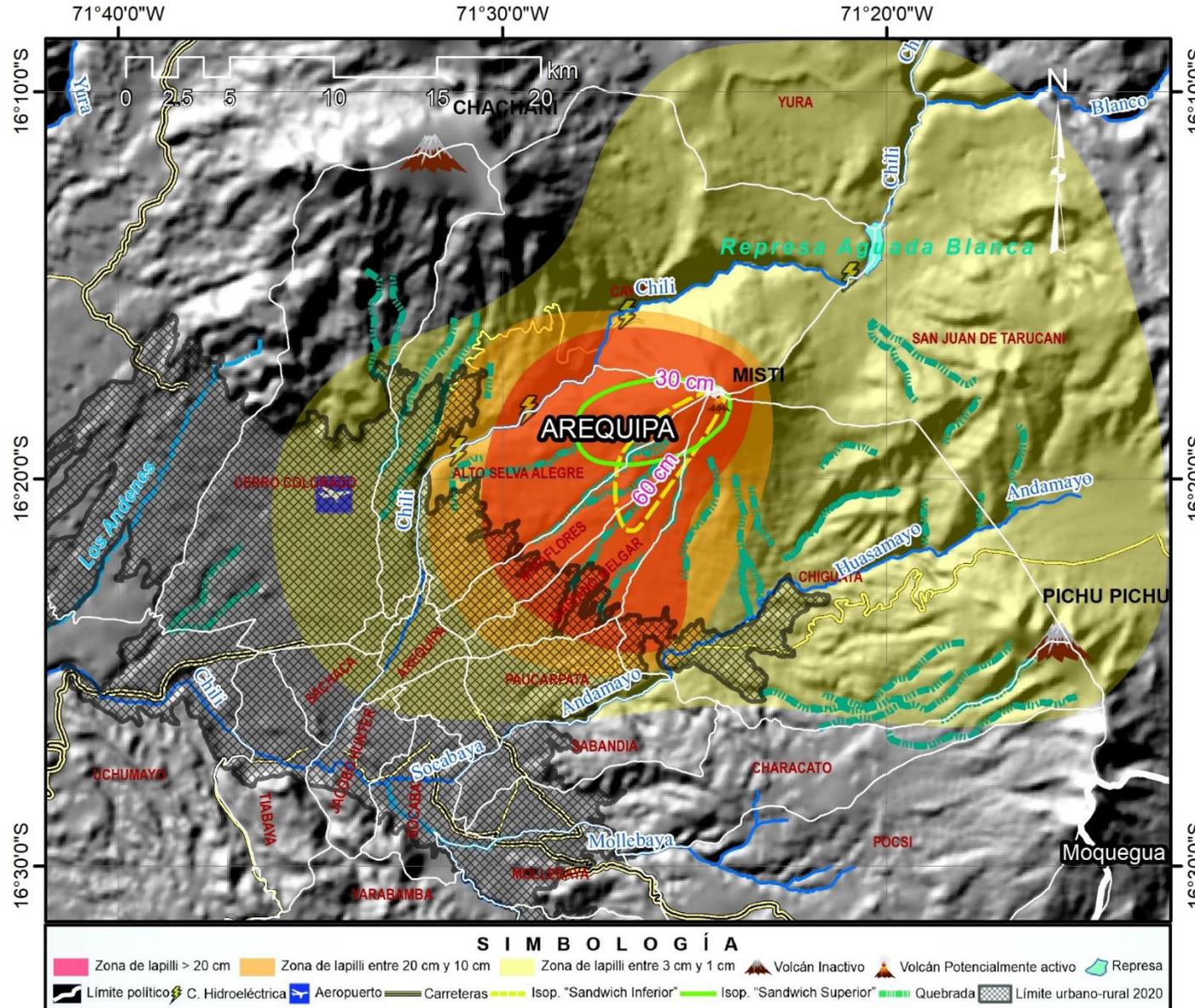


Nota: Se observan principalmente tres zonas: celeste, verde (1 cm de espesor) y amarilla; zonas distales de posibles depósitos del "Sandwich" con espesores de 3 mm hasta 3 cm (borde de la zona amarilla).

**MAPA DE PELIGROS POR CAÍDAS DE TEFRA
PARA ERUPCIONES DE MAGNITUDES SIMILARES AL "SANDWICH" IEV 5-4 (USO ACADÉMICO)**

Figura 65

Mapa de Peligro por caídas de tefra en base a erupciones de IEV 5-4 que dejaron los depósitos del "Sandwich" (uso académico)



Nota: Se observan tres zonas: amarilla, naranja (10 cm de espesor) y roja; zonas proximales de posibles depósitos del "Sandwich" con espesores de 3 cm hasta 20 cm (borde de la zona roja).

Conclusiones

1.

Según el Mapa de Peligros por Caídas de Tefra para Erupciones de Magnitudes Similares al “Sandwich” IEV-5-4, de uso académico, la dispersión de tefras depositaria espesores de hasta 3 mm a 220 km al SW (desde el cráter del Misti) y 294 km al NE (desde el cráter del Misti), abarcando ~208 km de playas (desde Punta de Bombón-Islay hasta Cerro de Arena-Atico-Caravelí en Arequipa), 60 km del océano pacifico, casi la totalidad del lago Titicaca (hasta Achacachi, Bolivia), por el sur hasta Mirave (Tacna) y por el norte hasta Chivay (Caylloma Arequipa). El área afectada sería de 83 754 km².

2.

El depósito del “Sandwich” descrito en anteriores estudios como un solo depósito con dos unidades “Inferior” y “Superior” separados por una capa intermedia de ceniza oscura, se trata en realidad de dos depósitos independientes denominados “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” separados generalmente por “una capa delgada de material fino limoso retrabajado o paleosuelo”, lo cual es respaldado por lo siguiente.

El “Sandwich Inferior” es un depósito de caída de lapilli conformado principalmente por pómez (20%), escorias (67%), “mingling” (1%), líticos cogenéticos (11%) y líticos xenolíticos (1%). Las pómez tienen una ligera concentración de 1 – 2 cm de espesor en el nivel inferior de la capa el cual no es distinguible en afloramientos mayores a 7 km del cráter. Las pómez (59.05 % de SiO₂) y escorias (58.97 % de SiO₂) son de una composición andesítica calcoalcalina (2.1% de K₂O para pómez y 1.86% de K₂O para escorias) de mediana a fuertemente potásico. Las pómez presentan 35.6% de vesículas, 20% de plagioclasas, 2% de anfíboles, 15% de clinopiroxenos y 3% de óxidos de Fe-Ti. Las escorias presentan 37.2% de vesículas, 19% de plagioclasas, 1% de anfíboles, 16% de clinopiroxenos, 5% de óxidos de Fe-Ti y 1% de ortopiroxenos.

El “Sandwich Superior” es un depósito de lapilli conformado principalmente por pómez (13%), escorias (72%), “mingling” (1%), los líticos cogenéticos (11%), líticos xenolíticos o accesorios (2%) y líticos oxidados (1%). Las pómez tienen una ligera concentración de ~1 cm de espesor en el nivel inferior de la capa el cual no es distinguible en afloramientos mayores a 6 km del cráter. Las pómez (60.19 % de SiO₂) y escorias (58.74 % de SiO₂) son de una composición andesítica calcoalcalina (2.28% de K₂O para pómez y 2.08% de K₂O para escorias) de mediana a fuertemente potásico. Las pómez presentan 27.5% de vesículas, 23% de plagioclasas, 1% de anfíboles, 19% de clinopiroxenos y 4% de óxidos de Fe-Ti. Las escorias presentan

32.2% de vesículas, 18% de plagioclasas, 3% de anfíboles, 17% de clinopiroxenos, 4% de óxidos de Fe-Ti. 4% y 1% de ortopiroxenos

3.

En base al mapa de isópacas con 29 puntos de afloramiento para el “Sandwich Inferior”, se estimó un volumen de depósito emplazado por la erupción de 0.061 km^3 , con un área de la isópaca de 8 cm de 197.7 km^2 y una dirección predominante hacia el suroeste desde el cráter del Misti. Los parámetros eruptivos obtenidos de los mapas de isópletas para este depósito son: 26.6 km de altura máxima de la columna eruptiva con una velocidad de 13.3 m/s y tasa de masa eruptiva (MER) de $\sim 1.2 \times 10^8 \text{ kg/s}$. El estilo eruptivo es pliniano con un IEV de 5. La actividad eruptiva tuvo un inicio brusco, sin evento previo, con una culminación gradual que involucro la interacción mecánica entre dos magmas andesíticos, estos magmas en contacto han tenido viscosidades semejantes, lo que permitió el intercambio mecánico de cristales y un estilo de fragmentación magmático.

En base al mapa de isópacas con 23 puntos de afloramiento para el “Sandwich Superior”, se estimó un volumen de depósito emplazado por la erupción de 0.048 km^3 , con un área de la isópaca de 8 cm de 202.07 km^2 y una dirección predominante hacia el suroeste desde el cráter del Misti. Los parámetros eruptivos obtenidos de los mapas de isópletas para este depósito son: 24.7 km de altura máxima de la columna eruptiva con una velocidad de 25.3 m/s y tasa de masa eruptiva (MER) de $\sim 0.9 \times 10^8 \text{ kg/s}$. El estilo eruptivo es pliniano con un IEV de 4. La actividad eruptiva tuvo un inicio brusco, sin evento previo, con una culminación gradual que involucro la interacción mecánica entre dos magmas andesíticos (ligeramente más viscoso al del “Sandwich Inferior”) lo que permitió el intercambio mecánico de cristales y un estilo de fragmentación magmático, que pudo haber involucrado una posible zona hidrotermalizada en el momento de la erupción.

4.

El volcán Misti ha tenido por lo menos 11 erupciones plinianas en sus últimos 33.7 ka, las cuales dieron origen a los depósitos del “Sacarosa” (IEV 5), “Fibroso II”, “Blanco”, “Zebra”, “Autopista” (IEV 4), “Espuma Gris”, “Espuma Iridiscente”, “Sandwich Inferior” (IEV 5), “Sandwich Superior” (IEV 4), “Rosado” y “2ka” (IEV 5). De esto, las edades de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” son menores a 33.7 ka y mayores a 2 mil años, teniendo en cuenta que después de ocurrido el evento eruptivo del “Sandwich Inferior” paso un corto periodo geológico para que ocurriese el “Sandwich Superior”.

Recomendaciones

A futuros investigadores de depósitos de caídas piroclásticas que tengan particular interés en cálculos más precisos, que realicen estudios como: el cálculo de densidad por picnómetro mecánico, el análisis de morfología de tefra y de sus vesículas por imágenes del microscopio electrónico de barrido (SEM) o el morfo-granulómetro, para entender mejor el proceso de fragmentación del magma.

A las personas interesadas en ampliar la presente investigación, es posible identificar y ligar lahares y/o corrientes de densidad piroclástica a las erupciones que depositaron las caídas piroclásticas del “Sandwich inferior” y/o “Sandwich Superior”, encontrar esta relación en campo y corroborarla con análisis geoquímicos, petrográficos y estratigráficos; es importante ya que este tipo de productos volcánicos representa un peligro mayor principalmente a zonas proximales (~10 a ~15 km del cráter) al volcán Misti, en las cuales se asientan algunos distritos de la ciudad de Arequipa.

A los investigadores que quieran datar depósitos de caídas piroclásticas. Por ahora el único método confiable para datar aquellos depósitos menores a ~60 mil años es el método radiométrico de ^{14}C . En caso de los depósitos del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior” no ha sido posible su datación debido a que no se ha encontrado material (leña carbonizada) en los afloramientos; sin embargo, eso no descarta encontrar material para la datación en los afloramientos ya localizados o en nuevos afloramientos, lo cual es una tarea larga y poco probable, por tal se recomienda buscar en la parte inferior del depósito (o en el paleosuelo justo debajo) y mejor aún en afloramientos de ubicación en zonas húmedas como bofedales. Por otro lado, si es posible usar un método de datación más reciente, esto ayudara a asumir periodos de recurrencia de erupciones plinianas para el Misti.

A la población, principalmente de Cayma, Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar y Chiguata, se les recomienda tomar conciencia y no descuidarse del peligro latente del volcán y así estar debidamente preparados para evacuar en caso de erupción. Gracias al Observatorio Vulcanológico del INGEMMET esta población y en general toda la ciudad de Arequipa pueden participar de charlas y simulacros, hacer uso de su página web y del “Mapa de Peligros Volcánicos del Misti” para conocer las principales rutas de evacuación y zonas de alto peligro, además pueden monitorear en tiempo real la actividad del volcán Misti.

Se invita a las autoridades, principalmente de los distritos mencionados, utilizar como una herramienta los mapas de peligros para el ordenamiento territorial y la gestión de riesgo de desastre de forma que se pueda evitar la ocupación en zonas de alto peligro.

Referencias Bibliográficas

- Acosta, H.; Alván, A.; Mamani, M.; Oviedo, M. & Rodríguez, J. (2011) - *Geología de los cuadrángulos de Pachía 36-v y Palca 36-x escala 1:50000*. INGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 139, 100 p., 7 mapas.
- Benavente Escobar, C.; Delgado Madera, G.; Fernández Baca, B.-G.; Aguirre Alegre, E. & Laurence, a. (2017) – *Neotectónica, Evolución del Relieve y Peligro Sísmico en la Región de Arequipa*. INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 64, 395 p.
- Biass, S y Bonadonna, C. (2012) - *A fast GIS-based risk assessment for tephra fallout: the example of Cotopaxi volcano, Ecuador Part I: probabilistic hazard assessment*. Nat Hazards (2013) 65:477–495 Springer Science - Business Media B.V. 2012.
- Biass, S.; Bagheri, G.; Bonadonna, C. (2015) - *A Matlab implementation of the Carey and Sparks (1986) model*. <https://vhub.org/resources/3922>.
- Bonadonna, C. & Costa, A. (2012) - *Estimating the volume of tephra deposits: a new simple strategy*. Geology 40(5):415–418
- Bonadonna, C.; and Costa, A. (2013). *Plume height, volume, and classification of explosive volcanic eruptions based on the Weibull function*. Bulletin of Volcanology, 75, 742.
- Bonadonna, C.; Connor, C.B.; Houghton, B.F.; Connor, L.; Byrne, M.; Laing, A.; Hincks, T.K. (2005) - *Probabilistic modeling of tephra dispersal: hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand*. J Geophys Res 110(B03203):1–21.
- Bromley, G.; Thouret, J.-C.; Schimmelpfennig, I.; Mariño, J. & Valdivia, D.; Rademaker, K.; Lopez, S.; & Arnold, Maurice; Aumaître, Georges; Bourlès, Didier; Keddadouche, Karim. (2019) - *In situ cosmogenic ^3He and ^{36}Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru*. Bulletin of Volcanology. 81. 10.1007/s00445-019-1325-6.
- Cacya, L. (2006) - *Volcán Misti: Sedimentología, geoquímica y correlación tefro-estratigráfica del depósito de caída de pómez "Autopista" ~ 14000 años*. Tesis Ingeniero, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 85 p.
- Carey, S. and Bursik, M (2000) – *Volcanic Plumes*. Encyclopedia of Volcanoes. Editor. Sigurdsson, H. foreword by Ballard, R. D. pp 1359.
- Carey, S. and Sparks, R. (1986) - *Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruptions columns*. Bulletin of Volcanology, v. 48. p. 109-126.
- Cas, R.A.F. & Wright, J.V. (1987) - *Volcanic Successions Modern and Ancient*. Allen & Unwin. London, pp. 528.
- Cioni, R.; Bertagnini, A.; Santacroce, R.; Andronico, D. (2008) - *Explosive activity and eruption scenarios at Somma-Vesuvius (Italy): towards a new classification scheme*. J. Volcanol Geotherm Res 178(3):331–346.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013; actualizada). Traducción al castellano de J.C. Gutiérrez-Marco en colaboración con: The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204.
- Constantinescu R. (2012) - *Methods for quantitative volcanic hazard assessment in densely populated areas, with emphasis on pyroclastic flows*. Case study: El Misti and Arequipa, South-western Peru. PhD thesis, Babeş – Bolyai University, Cluj - Napoca, 24p.

Cueva, K.; Mariño, J.; Thouret, J. C.; Japura, S. & Macedo, L. (2018) - *Pueblos enterrados por la erupción de 1600 d.C. del volcán Huaynaputina: geología del sector de Calicanto y Chimpapampa*. En: *Foro Internacional: Los volcanes y su impacto*, 8, Arequipa, PE, 26-27 abril, 2018, Libro de resúmenes. Arequipa: INGEMMET, pp. 96-100.

Cuno, J.J. (2019) - *Estudio de la erupción del volcán Misti ocurrida hace 33,7 mil años AP, que emplazo el depósito "Sacarosa" en la ciudad de Arequipa*. Tesis Ingeniero, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, pp 122 .

Daggitt, M.L.; Mather, T.A.; Pyle, D.M.; Page, S. (2014) – AshCalc: a new tool for the comparison of the exponential, power-law and Weibull models of tephra deposition. *J Appl Volcanol* 3(1):7

Davidson, J. y De Silva, S. (2000) - *Composite volcanoes*. In *Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson, H.; Hughton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H.; Stix, J.; editors). Academic Press, p. 679. San Diego.

De Silva, S.L. and Francis, P.W. (1991) - *Volcanoes of the Central Andes*. Berlin: Springer-Verlag, 216 p.

Fidel, S.L.; Morche, W. & Juárez, S.N. (1997) – *Álbum de mapas de riesgos volcánicos de las principales ciudades del suroeste del Perú*, INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 15, 13 p.

Fierstein, J. and Nathenson, M. (1992) - *Another look at the calculation of fallout tephra volumes*. *Bulletin of Volcanology*, 54, 156-167.

Folk, R.L. and Ward, W.C. (1957) - *A Study in the Significance of Grain-Size Parameters*. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.

Froggatt, P. (1982) - *Review of methods of estimating rhyolitic tephra volumes; Application to the Taupo Volcanic Zone, New Zealand*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 14, p. 301-318.

Guevara, C. (1969) - *Geología del cuadrángulo de Characato*. Serv. de Geol. y Minería, Bol. No. 23.

Harpel, C.J.; Cuno, J.J.; Cueva, K., Japura, S.; Cabrera, M.; Soncco, Y. & Rivera, M. (2018) - *Tefroestratigrafía preliminar de erupciones explosivas del volcán Misti (Arequipa, Perú) desde la "Autopista" y sus implicaciones para los peligros volcánicos*, *Foro Internacional: Los Volcanes y su Impacto*. Arequipa. Perú, 2018, p 2.

Harpel, C.J.; De Silva, S.L. & Salas, G. (2011) - *The 2 ka eruption of Misti volcano, southern Peru – the most recent plinian eruption of Arequipa's iconic volcano*. Boulder, CO: Geological Society of America, 72 p. Special Paper, 484.

Haynes, K.; Barclay J. and Pidgeon N. (2007a) - *Volcanic hazard communication using maps: an evaluation of their effectiveness*. *Bulletin of Volcanology*, 70 2 (2007), pp. 123–138.

Houghton, B. F. and Wilson, C.J.N. (1989) - *A vesicularity index for pyroclastic deposits*. *Bull. Volcanol.* 51, 451–462. doi:10.1007/bf01078811.

Hurst, A. W. (1994) - *ASHFALL, a computer program for estimating volcanic ash fallout: report and users guide*. Institute of Geological & Nuclear Sciences Science Report 94. GNS Science.

Inman, D. (1952) - *Measures for Describing the Size Distribution of Sediments*. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 22, N°3, pp. 125-145.

Japura, S.B. (2018) - *Estudio estratigráfico y sedimentológico del depósito de caída pliniana de la erupción del año 1600 d.C. del volcán Huaynaputina*. Tesis Ingeniero, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, p. 188.

Jenks, W. (1945) – *La Geología de Arequipa y sus alrededores*. Informaciones y Memorias de la Sociedad de Ingenieros del Perú, vol. 46, n. 9, 498-500 p.

Jenks, W.F. (1948) - *Geología de la Hoja de Arequipa al 200,000*. Geología de la carta nacional del Perú. Instituto Geológico del Perú. Boletín N° 9, p 204.

Kosaka, R.; Macedo, L. & Diaz H.G. (2000) - *Mapa de peligro potencial del volcán Misti*. Convenio UNAS y el proyecto PNUD - Gobierno PER 98/018, Arequipa, 106 p.

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, 745–750.

Lefèvre, C. (1979) - *Un exemple de volcanisme de marge active dans les Andes du Pérou (Sud) du Miocène à l'Actuel*. Thèse Université Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier. 555 pp.

Legendre, C. (1999) - *Pétrogenèse du volcan "Misti Moderne" (Sud Pérou): essai de caractérisation de l'évolution pétro-géochimique et chronologique*. Mémoire d'IGAL (Institut Géologique Albert de Lapparent), France, pp. 88.

Legros, F. (2001) - *Tephra stratigraphy of Misti volcano, Peru*. J. South Am. Earth Sci., 14, 15–29.

Lorenz, V. (1987) – *Maars and diatremes of phreatomagmatic origin: a review*. Transactions of the Geological Society of South Africa, 88: 459-470.

Macedo, L. (1994) - *Peligro volcánico potencial del Misti*. Tesis Ingeniero, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 112 p.

Macedo, O.; Taípe, E.; Del caripo, J.; Ticona, J.; Ramos, D.; Puma, N.; Aguilar, V.; Machacca, R.; Torres, J.; Cueva, K.; Cruz J.; Lazarte, I.; Centeno, R.; Miranda, R.; Alvarez, Y.; Masias, P.; Vilca, J.; Apaza, F.; Chijcheapaza, R.; Calderon, J.; Cáceres, J. & Vela, J. (2016) - *EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO EN EL SUR DEL PERÚ, SITUACIÓN DE LA VIGILANCIA ACTUAL Y REQUERIMIENTOS DE MONITOREO EN EL FUTURO*. Informe Técnico IGP, Arequipa – Perú: 75 pp.

Mamani, M.; Wörner, G. & Sempere, T. (2010) - *Geochemical variation 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(1-2): 162-182.

Mariño, J.; Rivera, M.; Cacya, L.; Thouret, J.-C.; Siebe, C.; Tilling, R. & Salas, G. (2006) – *Mapa Geológico del Volcán Misti – Arequipa*. INGEMMET, escala 1:32000.

Mariño, J.; Rivera, M.; Cacya, L.; Thouret, J.-C.; Macedo, L.; Salas, G.; Siebe, C.; Tilling, R., Sheridan, M.; Chávez, A. & Zuñiga, S. (2011) – *Mapa de Peligros del Volcán Misti*

Mariño, J.; Rivera, M.; Thouret, J.-C. & Macedo, L. (2016) - *Geología y evaluación de peligros volcánicos del volcán Misti*, INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 60, 170 p.

Mastin, L.G.; Guffanti, M.; Servranckx, R.; Webley, P.; Barsotti, S.; Dean, K.; Durant, A.; Ewert, J.W.; Neri, A.; Rose, W. I.; Schneider, D.; Siebert, L.; Stunder, B.; Swanson, G.; Tupper, A.; Volentik, A. & Waythomas, C.F. (2010) - *A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 186. 10-21. 10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.

Mendivil, S. (1965) - *Geología de los cuadrángulos de Maure y Antajave (Hojas 35-x, 35-y)*. Comisión Carta Geológica Nacional, Boletín, 10, 99 p., 2 mapas.

Mering, C.; Callot, Y. & Kemmouche, A. (1996) - *Analysis and mapping of natural landscapes from satellite images using morphological filters*. Microscopy Microanalysis Microstructures. 7. 323-330.

Murcia, H.F.; Borrero, C.A.; Pardo, N.; Alvarado, G.E.; Arnosio, M. & Scolamacchia, T. (2013) - *DEPÓSITOS VOLCANICLÁSTICOS: TÉRMINOS Y CONCEPTOS PARA UNA CLASIFICACIÓN EN ESPAÑOL*. Revista Geológica de América Central, 48: 15-39.

Navarro, P. (2000) - *Cartografía geológica, historia eruptiva y evaluación de las amenazas volcánicas del estratovolcán Misti*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 198 p.

Newell, N. (1949) - *Geology of the Titicaca Region, Peru and Bolivia*. Geological Society of America memoir, 36, 111 p. Boulder, Colorado.

Newhall, C. G. and Self, S. (1982). *The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism*. J. Geophys. Res. 87, 1231–1238.

Palacios, O. (1994) - *Geología del cuadrángulo de Chulca y Cayarani 30-q, 30-r - [Boletín A 51]*. INGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, n° 51, 74 p.

Palacios, O.; Chacón, N.; Sánchez, A.; Canchaya, S., Aranda, A. (1995) – *Geología del Perú*. INGEMMET, Boletines, Serie A: Carta Geológica Nacional, v. 55, 177 p.

Paquereau, P.; Fornari, M.; Roperch, P., Thouret, J.C.; Macedo O. (2007) - *Paleomagnetic, magnetic fabric properties, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, of Neogene–Quaternary ignimbrites in the Arequipa area, Southern Peru*. Bulletin of Volcanology, Bull Volcanol, 70: 977–997.

Paquereau, 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(3-4): 251-275.

Prata, A.J. & Grant, I.F. (2001) - *Retrieval of microphysical and morphological properties of volcanic ash plumes from satellite data: Application to Mt Ruapehu, New Zealand*. Q. J. R. Meteorol. Soc., 127 (2001), pp. 2153-2179, 10.1002/qj.49712757615

Pyle, D.M. (1989) - *The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits*. Papers 51:1-15.

Pyle, D.M. (1995) - *Assessment of the minimum volume of tephra fall deposits*. J Volcanol Geotherm Res 69(379–382):1995

Pyle, D.M. (2000) – *Sizes of Volcanic Eruptions*. Encyclopedia of Volcanoes. Editor. Sigurdsson, H. foreword by Ballard, R. D. pp 1359.

Rivera, M. (2009) - *Estudio de productos emitidos por el volcán Misti durante los últimos 10,000 años*. Informe técnico, Geología Ambiental, INGEMMET, 39 p.

Rivera, M.; Thouret, J.C.; Mariño, J.; Berolatti, R. & Fuentes, J. (2010) - *Characteristics and management of the 2006- 2008 volcanic crisis at the Ubinas volcano (Peru)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 198(1-2): 19-34.

Romero, J.E.; Bustillos, J.E. & Viramonte, J.G. (2015) – *Pyroclastic Flow*. Journal of Geology - ISSN:0719-0565; 5 (1), 1-33.

Sarna-Wojcicki A.; Shipley, S; Wait R; Dzurisin, D; Wood, S. (1981) - *Areal distribution, thickness, mass, volume, and grain size or air fall ash from the six eruptions of 1980*. In Lipman P. W. y Mullineaux D. R. Eds 1980 eruptions of Mount St Helens, Washington, Geological Survey Professional Paper, v. 1250, p. 577-628.

Scollo, S.; Del Carlo, P. and Coltelli, M. (2007) - *Tephra fallout of 2001 Etna flank eruption: Analysis of the deposit and plume dispersion*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 160, 147–164.

Sébrier, M. & Soler, P. (1991) - *Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from late Oligocene time to the Present*. Special Paper of the Geological Society of America. 265. 259-278.

Self, S. & Sparks, R.S.J. (1978) - *Characteristics of widespread pyroclastic deposits formed by the interaction of silicic magma and water*. Bull Volcanol 41, 196. <https://doi.org/10.1007/BF02597223>

Segura, A. (2016) - *Erupción subpliniana de abril de 2015 del volcán Calbuco, Andes del Sur: génesis, dinámica y parámetros físicos de la columna eruptiva y depósitos piroclásticos de caída asociados*. Tesis de pregrado. Universidad de Chile, Chile. p. 111.

Settle, M. (1978) - *Volcanic eruption clouds and the thermal power output of explosive eruptions*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 3 (1978), pp. 309-324.

Siebert, L.; Simkin, T. and Kimberly, P. (2011) - *Volcanoes of the World*. University of California Press and Smithsonian Institution, Berkley, California, 3rd ed. 568 pp.

Simkin, T. & Siebert, L. (1994) - *Volcanoes of the world: a regional directory, gazetteer, and chronology of volcanism during the last 10,000 years*. 2^a. ed. Tucson, AR: Geoscience Press, 349 p.

Sparks, R.S.J. (1986) - *The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns*. Bulletin of Volcanology 48 (1), 3-15.

Sparks, R.S.J. (1997) - Causes and consequences of pressurisation in lava dome eruptions. Earth and Planetary Science Letters 150 (3-4), 177-189.

Stern, C. (2004) - *Active Andean volcanism: Its geologic and tectonic setting*. Revista Geológica de Chile. 31. 161-206.

Stewart, W.; Everden, J.; and Snelling, N. (1974) – *Age Determinations from Andean Peru: A Reconnaissance Survey*. Geological Society of American Bulletin. v. 85, p. 1107-1116.

Suni, J. (1999) - *Estudio geológico y vulcanológico del volcán Misti y sus alrededores*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, 179 p.

Tepley, F.J.; Salas, G. & De Silva, S.L. (2007) - *Recharge as an eruption trigger revealed at El Misti, southern Peru [abs.]: Eos (Transactions, American Geophysical Union)*, v. 88, no. 52, abstract v41D-0813.

Thouret, J.C.; Finizola, A.; Fornari, M.; Legeley-Padovani, A.; Suni, J. & Frechen, M. (2001) - Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1593-1610.

Thouret, J.C.; Jicha, B.R.; Paquette, J.L. & Cubukcu, E.H. (2016) - *A 25 myr chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: implications for the volcanic history of the Central Andes*. Journal of the Geological Society, 173, pp. 734-756.

Torres, P.; Alván, A. & Acosta, H. (2008) - *The Proterozoic basement of the Arequipa massif, southern Peru: Lithologic domains and tectonics*. En: International Symposium on Andean Geodynamics, 7. Nice, 2008. Extended abstracts. Paris: IRD Éditions, p. 549-552.

Torres, R. (2001) - *Vulnerabilidad estructural de edificaciones de uso general ante eventos eruptivos del volcán Galeras en su zona de influencia*. INGEOMINAS. Pasto, 122p.

Vargas, L. (1970) - *Geología del cuadrángulo de Arequipa 33-s* - [Boletín A 24]. INGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, n° 24, 64 p.

Vernon, R.H.; Etheridge, M.A.; Wall, V. L. (1988) - *Shape and microstructure of microgranitoid enclaves: indicators of magma mingling and flow*. Lithos 22: 1-11.

Walker, G.P.L. (1971) - *Grain -size characteristics of Pyroclastic deposits*. Journal of Geology, 1971, vol. 79, p 696-714.

Walker, G.P.L. (1973). *"Explosive volcanic eruptions — a new classification scheme"*. Geologische Rundschau. 62 (2): 431–446.

Walker, G.P.L. (1980) - *The Taupo pumice: Product of the most powerful known (ultraplinian) eruption*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 8, p. 69–94.

Walker, G.P.L. (1981) - *Plinian eruptions and their products*. Bulletin of Volcanology, v. 44, no. 2, p. 223–240.

Wilson, J. y García. W. (1962) - *Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca*. Com. Carta Geol. Nac., Bol. No. 4.

Wilson, L. and Walker, G.P.L. (1987) - *Explosive volcanic eruptions—VI. Ejecta dispersal in plinian eruptions: The control of eruption con-ditions and atmospheric properties*, Geophys. J. R. Astron. Soc.,89, 657–679.

Wilson, L.; Sparks, R.S.J.; Huang, T.C. and Watkins, N.D. (1978) - *The control of volcanic column heights by eruption energetics and dynamics*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 83 (B4), 1829-1836.

Wohletz, K.H.; Sheridan, M.F. & Brown, K. (1989) - *Particle size distribution and the sequential fragmentation/transport theory applied to volcanic ash*. J. Geophys. Res. 94: 15, 703-15, 721.

Anexos

Anexo I: Tabla de población según el INEI desde el 2007 al 2015 para los distritos de la provincial de Arequipa,

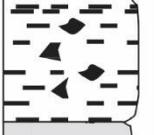
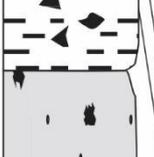
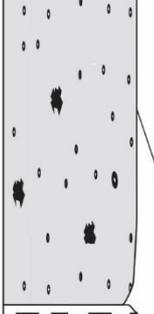
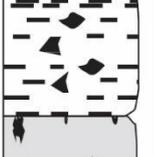
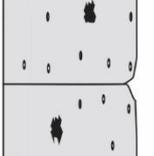
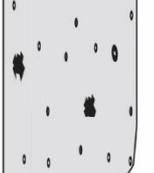
DEPARTAMENTO, PROVINCIA Y DISTRITO	AÑO								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Dep. Arequipa	1,180,683	1,192,932	1,205,317	1,218,168	1,231,553	1,245,251	1,259,162	1,273,180	1,287,205
Provincia Arequipa	885,102	894,937	904,846	915,074	925,667	936,464	947,384	958,351	969,284
Dist. Arequipa	63,577	62,362	61,146	59,947	58,768	57,597	56,430	55,264	54,095
Dist. Alto Selva Alegre	74,385	75,396	76,395	77,404	78,425	79,444	80,453	81,445	82,412
Dist. Cayma	76,261	78,107	79,972	81,875	83,820	85,794	87,788	89,793	91,802
Dist. Cerro Colorado	114,997	118,832	122,728	126,738	130,876	135,101	139,408	143,772	148,164
Dist. Characato	6,831	7,104	7,385	7,676	7,979	8,292	8,615	8,947	9,288
Dist. Chiguata	2,754	2,779	2,802	2,826	2,850	2,874	2,896	2,919	2,940
Dist. Jacobo Hunter	47,318	47,475	47,617	47,758	47,898	48,029	48,147	48,247	48,326
Dist. La Joya	24,674	25,326	25,988	26,664	27,358	28,065	28,781	29,505	30,233
Dist. Mariano Melgar	53,606	53,525	53,428	53,326	53,225	53,112	52,985	52,837	52,667
Dist. Miraflores	52,234	51,814	51,380	50,946	50,514	50,075	49,625	49,160	48,677
Dist. Mollebaya	1,435	1,485	1,535	1,587	1,641	1,696	1,751	1,809	1,868
Dist. Paucarpata	123,772	123,942	124,094	124,240	124,384	124,513	124,622	124,701	124,755
Distrito Pocsi	622	612	603	594	584	574	565	556	547
Distrito Polobaya	1,489	1,488	1,486	1,485	1,484	1,483	1,481	1,479	1,477
Distrito Quequeña	1,248	1,264	1,280	1,296	1,312	1,329	1,344	1,361	1,376
Dist. Sabandía	3,788	3,832	3,876	3,920	3,964	4,009	4,053	4,095	4,136
Dist. Sachaca	17,959	18,167	18,370	18,576	18,783	18,989	19,191	19,390	19,581
Dist. San Juan de Sigwas	1,325	1,350	1,375	1,402	1,428	1,455	1,481	1,508	1,535
Dist. San Juan de Tarucani	2,237	2,230	2,223	2,216	2,209	2,202	2,195	2,187	2,179
Dist. Santa Isabel de Sigwas	1,289	1,286	1,284	1,281	1,278	1,276	1,272	1,268	1,264
Dist. Santa Rita de Sigwas	4,544	4,667	4,791	4,918	5,049	5,183	5,318	5,454	5,592
Dist. Socabaya	60,717	62,713	64,753	66,851	69,014	71,230	73,493	75,797	78,135
Dist. Tiabaya	15,095	15,064	15,028	14,992	14,955	14,916	14,873	14,823	14,768
Dist. Uchumayo	10,911	11,099	11,285	11,475	11,668	11,861	12,054	12,246	12,436
Distrito VITOR	2,788	2,730	2,673	2,616	2,561	2,506	2,452	2,399	2,345
Dist. Yanahuara	23,427	23,691	23,950	24,211	24,474	24,735	24,992	25,242	25,483
Dist. Yarabamba	1,092	1,097	1,101	1,105	1,109	1,113	1,117	1,121	1,125
Dist. Yura	16,179	17,128	18,127	19,183	20,298	21,474	22,710	24,007	25,367
Dist. J.L. Bustamante y R.	78,548	78,372	78,171	77,966	77,759	77,537	77,292	77,019	76,711

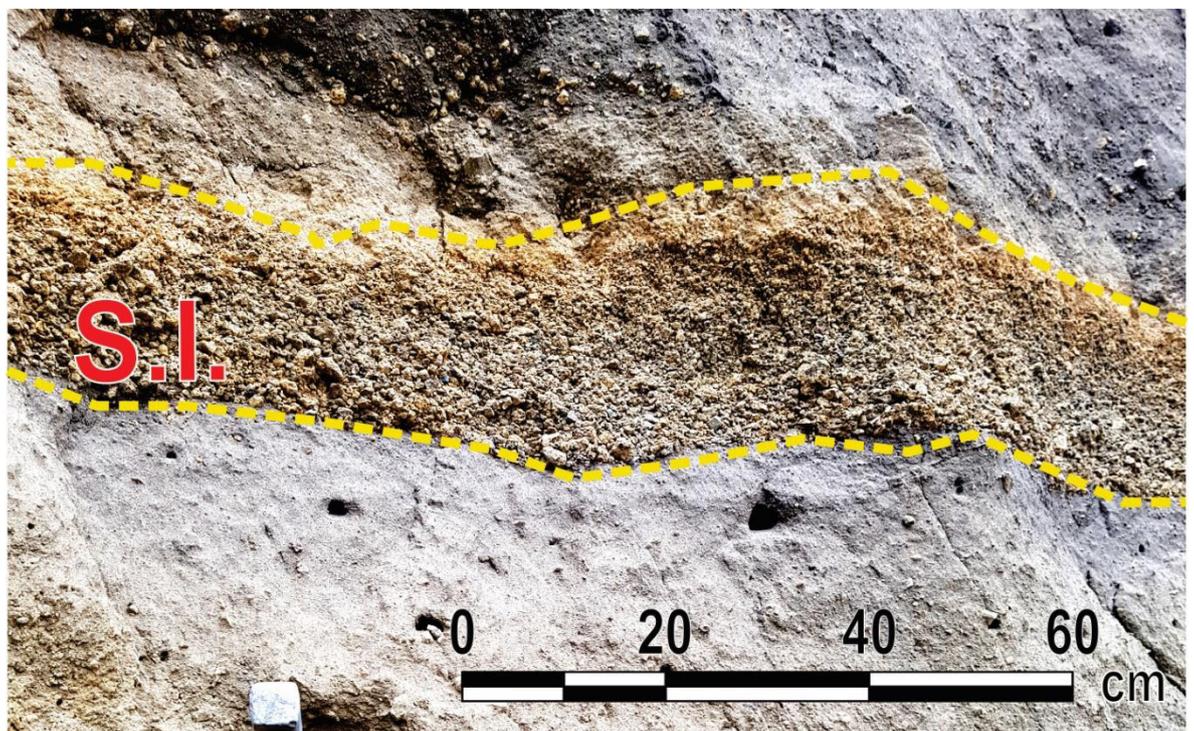
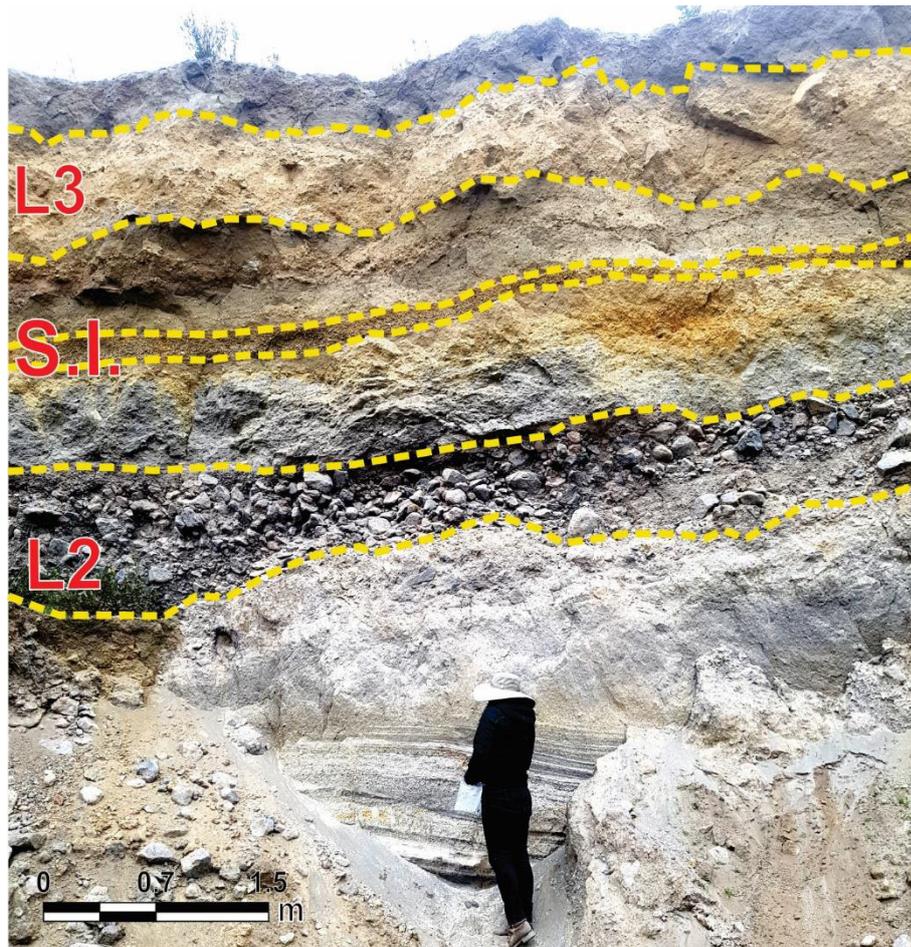
Anexo II: Principales columnas estratigráficas elaboradas en base a datos de campo y fotos asociadas.

Columna estratigráfica lado sur de carretera a Chiguata
(entre Agua Dulce y La Calera)

Coordenadas UTM: N 8184951 E 240322 h: 3230 msnm

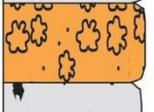
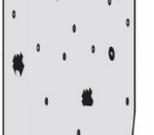
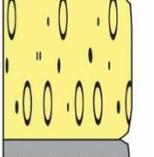
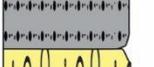
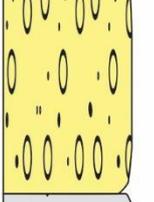
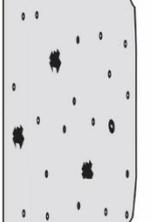
PTO. 82

ESPESOR (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
		Suelo actual.
		Suelo gris oscuro.
		Lahar color rojizo masivo con líticos decimétricos a centimétricos.
		Suelo pardo marrón.
0.22		Depósito de caída "Sandwich Inferior", presenta dos tipos de pómez, blancos (5%) concentrados en la base y pómez marrones (95%) predominantes. Las pómez marrones (de hasta 2.5cm) tienen 25% de vesículas y 3% de cristales de anfíboles, algunas escorias (muy escasas) presentan "mingling" en bandas muy finas color blanquecinos. Los pómez blancos tienen un 5% de vesículas con 6% de cristales de plagioclasa, 2% de piroxenos y 1% de anfíboles. Los líticos (representan el 15% con respecto a las pómez) son de un solo tipo gris oscuro (~1 cm).
0.40		Suelo de material fino limoso de color gris oscuro.
0.80		Depósito lahárlico.
2.50		Depósito aluvial.
0.80		Depósito de lahar, dividido en dos partes. La parte inferior (20 cm) de color blanco presenta pequeños líticos grises oscuros, la parte superior (60 cm) de color marrón oscuro presenta líticos de hasta 20 cm en una matriz masiva.
0.80		Depósito aluvial gris claro.
1.60		Depósito fluvial, presenta arrastre de pómez subredondeados en láminas intercaladas con limos grises oscuros.



Columna estratigráfica en una Cantera en la Reserva Chilina
 Coordenadas UTM: N 8192320 E 229911 h: 2632 msnm

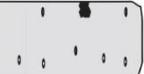
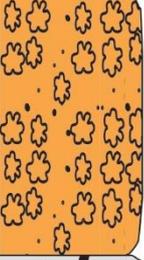
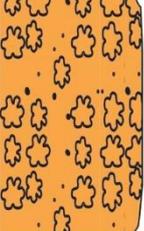
PTO. 85,86

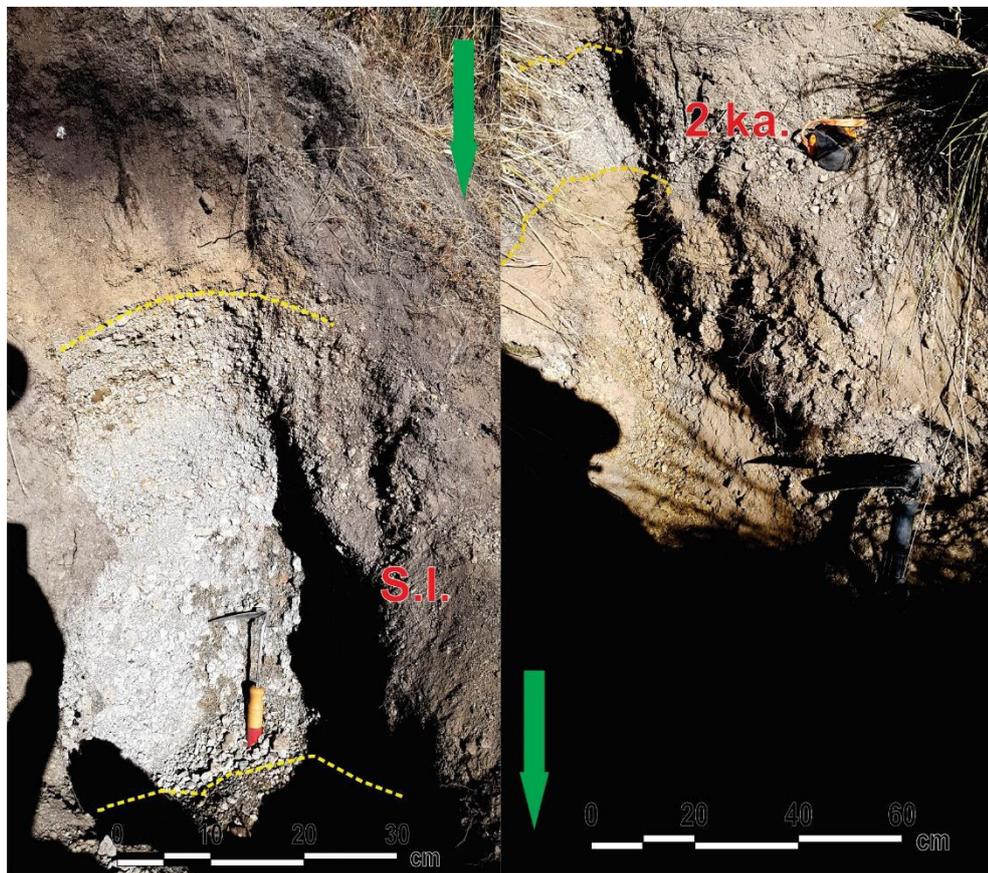
ESPESOR (m)	LITOLÓGÍA	DESCRIPCIÓN
0.10		Suelo actual con vegetación al tope.
0.12		Depósito de caída "2 ka", niveles de líticos concentrados en la parte media y superior de color gris oscuro alternados por niveles de pómez blancos y marrones con mingling y escasos líticos.
0.15		Suelo fino marrón claro.
0.15		Posible depósito de caída "Rosado", presenta hidrotermalización.
0.30		Suelo fino gris oscuro con escasos pómez retrabajados.
0.08		Depósito de caída "Sandwich Superior", presentan pómez marrones oscuros (~3 cm) con, 10% de vesículas y 1-2 % de cristales de piroxenos; y pómez blancos grisáceos escasos.
0.10		Depósito de caída "Sandwich Inferior", presentan pómez blancas retrabajadas subredondeadas escasas y escorias predominantes. Líticos (25% con respecto a pómez y escorias) menores a 1 cm y de color gris oscuro.
0.15		Suelo gris oscuro limoso con escasos pómez.
0.22		Depósito de caída "Autopista superior", tiene una concentración de líticos en la parte media de la capa. Pómez blancos concentrados en la base (96%) con algunos rosados (40% rosados y 60% blancos) de un promedio de 4 cm. Los líticos (35% con respecto a las pómez) son escasos y menores a 1cm con una concentración mayor en la parte superior de la capa.
0.10		Material muy fino gris oscuro negro con escasos pómez (<1%) muy pequeños blancos, probablemente este material sea ceniza.
0.32		Depósito de caída "Autopista inferior", pómez blancos predominantes (~4cm) algunos rosados mayormente en el tope, 30 % de vesículas con cristales de anfóboles (1%) y piroxenos (5%). Líticos (5% con respecto a las pómez) menores a 1cm grises oscuros.
0.36		Suelo pardo marrón limoso con escasos pómez blancos y un nivel de pómez en el medio pequeños retrabajados.



Columna estratigráfica en
 Coordenadas UTM: N 8190265 E 238923 h: 3267 msnm

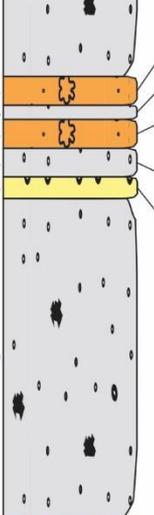
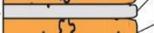
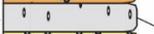
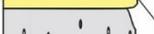
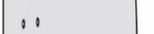
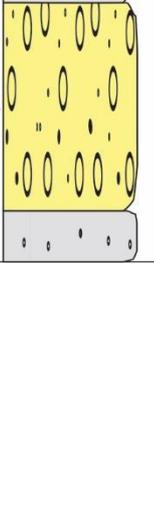
PTO. 114

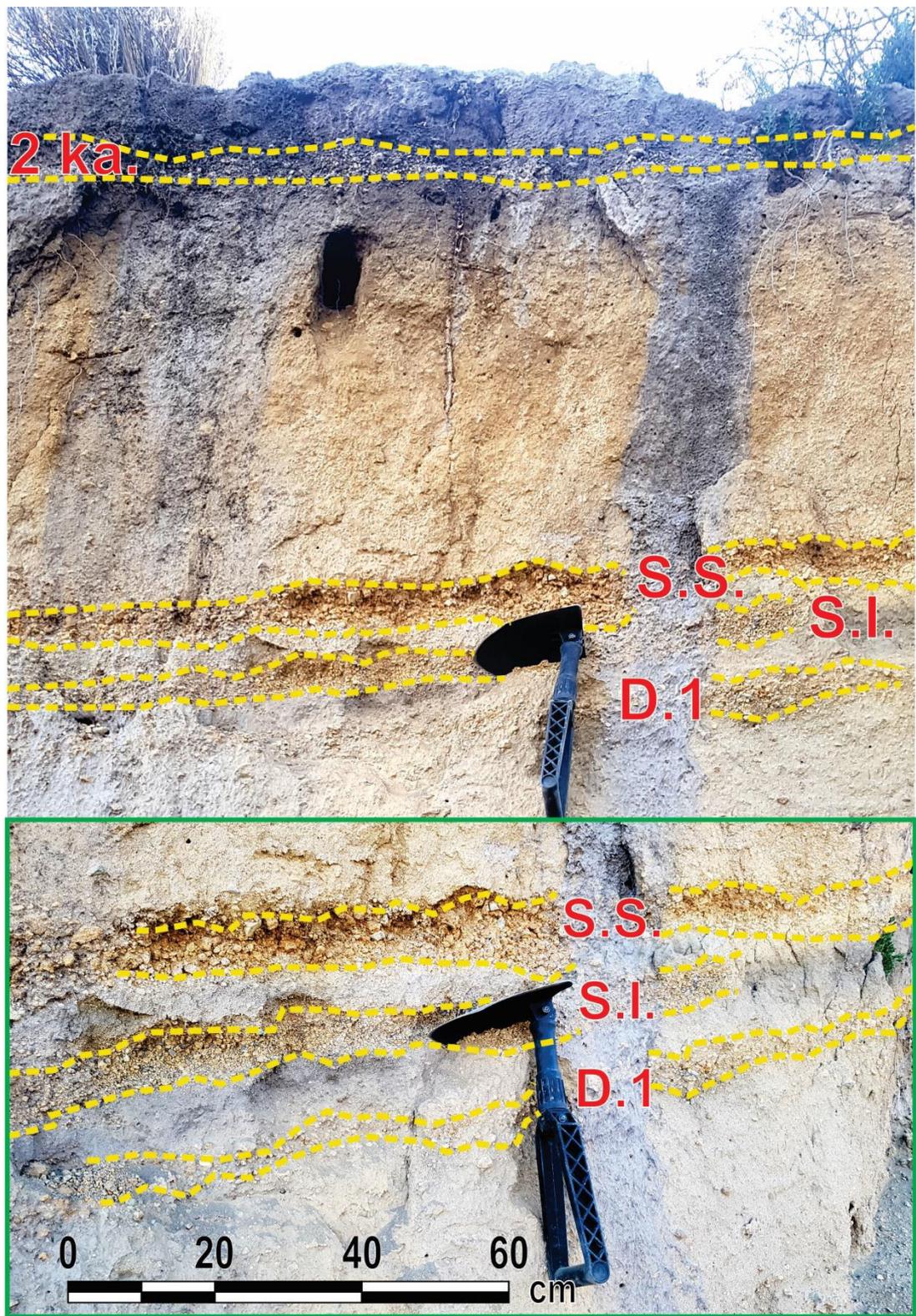
ESPESOR (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
0.20		Suelo actual gris oscuro con ceniza negra probablemente del "siglo XV" en la parte inferior.
0.22		Suelo pardo.
0.68		Depósito de caída "2 ka", presenta 6 niveles, un nivel diferente a los ya conocidos presentes en otros afloramientos.
0.20		Suelo pardo oscuro.
0.64		Depósito de caída "Sandwich Inferior".
0.10		



Columna estratigráfica en
 Coordenadas UTM: N 8199792 E 234126 h: 3582 msnm

PTO. 115,116

ESPESOR (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
0.17		Suelo actual.
0.09		Depósito de caída "2 ka".
0.84		Suelo.
0.08		Depósito de caída "Sandwich Superior" climatizado.
0.04		Suelo limoso de color marrón.
0.08		Depósito de caída "Sandwich Inferior" climatizado, pómez blancos delezna- bles con textura microvesicular.
0.08		Suelo.
0.06		Suelo.
0.89		Depósito de caída de pómez re TRABAJADO y climatizado.
0.58		Suelo de color marrón con pómez blancos escasos re TRABAJADOS.
		Depósito de caída "Autopista".
		Suelo.



Anexo III: Tablas del tamizado realizado en los laboratorios del INGEMMET.

Weight bulk		260,3			242,6			406,4			338,3			402,0		
Muestra		MIS-18-30			MIS-18-31			MIS-18-08P2			MIS-18-17			MIS-18-01A		
Malla		W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)
Sieve (mm)	Phi															
31,5	-5	0,00	0,00	0,00	22,94	9,47	9,47	73,28	18,07	18,07		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22,4	-4,5	5,96	2,29	2,29	28,60	11,81	21,28	308,44	76,04	94,11	36,53	10,79	10,79	11,07	2,76	2,76
16	-4	15,39	5,92	8,21	24,57	10,14	31,42	12,17	3,00	97,11	64,96	19,19	29,98	71,77	17,89	20,65
11,2	-3,5	20,46	7,87	16,09	36,02	14,87	46,29	5,81	1,43	98,54	57,82	17,08	47,06	47,09	11,74	32,39
8	-3	38,24	14,71	30,80	33,29	13,74	60,03	0,41	0,10	98,64	38,72	11,44	58,50	43,36	10,81	43,19
5,6	-2,5	49,47	19,03	49,83	20,09	8,29	68,32	0,15	0,04	98,68	36,33	10,73	69,24	41,75	10,41	53,60
4	-2	33,65	12,95	62,78	13,38	5,52	73,85	0,08	0,02	98,70	25,11	7,42	76,66	37,51	9,35	62,95
2,8	-1,5	34,00	13,08	75,86	6,84	2,82	76,67	0,18	0,04	98,75	22,92	6,77	83,43	37,55	9,36	72,31
2	-1	23,09	8,88	84,74	4,39	1,81	78,48	0,17	0,04	98,79	16,92	5,00	88,43	27,12	6,76	79,07
1,4	-0,5	16,64	6,40	91,14	3,33	1,37	79,86	0,23	0,06	98,84	13,62	4,02	92,45	25,00	6,23	85,30
1	0	9,35	3,60	94,74	2,27	0,94	80,79	0,32	0,08	98,92	9,21	2,72	95,17	20,42	5,09	90,39
0,71	0,5		0,00	94,74		0,00	80,79		0,00	98,92		0,00	95,17	18,01	4,49	94,88
0,5	1	10,31	3,97	98,71	5,39	2,22	83,02	0,98	0,24	99,16	12,22	3,61	98,78	12,02	3,00	97,88
0,25	2	2,63	1,01	99,72	7,13	2,94	85,96	0,95	0,23	99,40	2,39	0,71	99,49	5,99	1,49	99,37
0,125	3	0,44	0,17	99,89	10,23	4,22	90,18	0,87	0,21	99,61	0,91	0,27	99,75	1,26	0,31	99,68
0,063	4	0,17	0,07	99,95	11,38	4,70	94,88	0,99	0,24	99,86	0,52	0,15	99,91	0,57	0,14	99,83
<0.063	5	0,12	0,05	100,00	12,40	5,12	100,00	0,58	0,14	100,00	0,31	0,09	100,00	0,70	0,17	100,00
Total		259,92	100,00		242,25	100,00		405,61	100,00		338,49	100,00		401,19	100,00	

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE PELIGROS DE CAÍDAS DEL VOLCÁN MISTI

Weight bulk		498,2			442,5			404,6			429,9			422,0			463,6		
Muestra		MIS-18-12			MIS-18-13			MIS-19-04			MIS-18-67			MIS-18-43			MIS-18-36		
Malla	Phi	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)	W (g)	Wt (%)	Wt acumulado (%)
31,5	-5	0,00	0,00	0,00	24,02	5,46	5,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22,4	-4,5	38,16	7,69	7,69	48,17	10,94	16,40	0,00	0,00	0,00	28,76	6,71	6,71	9,42	2,24	2,24	30,55	6,60	6,60
16	-4	36,75	7,40	15,09	51,20	11,63	28,03	7,09	1,76	1,76	18,81	4,39	11,09	3,98	0,95	3,18	87,37	18,88	25,49
11,2	-3,5	47,54	9,58	24,67	60,93	13,84	41,87	31,70	7,88	9,64	39,89	9,30	20,40	7,35	1,75	4,93	74,30	16,06	41,54
8	-3	56,13	11,31	35,98	55,75	12,66	54,53	71,63	17,80	27,44	44,65	10,41	30,81	16,36	3,89	8,82	68,46	14,80	56,34
5,6	-2,5	39,73	8,00	43,98	41,86	9,51	64,04	69,49	17,27	44,71	46,72	10,90	41,71	23,64	5,62	14,43	58,63	12,67	69,01
4	-2	42,22	8,51	52,49	27,06	6,15	70,19	56,15	13,95	58,66	41,55	9,69	51,40	36,80	8,74	23,18	37,08	8,01	77,03
2,8	-1,5	40,52	8,16	60,66	18,07	4,10	74,29	51,97	12,92	71,58	35,28	8,23	59,62	47,68	11,33	34,50	28,42	6,14	83,17
2	-1	38,69	7,80	68,45	12,66	2,88	77,17	35,67	8,86	80,44	25,15	5,87	65,49	46,79	11,12	45,62	17,46	3,77	86,94
1,4	-0,5	42,05	8,47	76,92	10,80	2,45	79,62	27,66	6,87	87,32	20,32	4,74	70,23	52,15	12,39	58,01	12,61	2,73	89,67
1	0	37,48	7,55	84,47	8,53	1,94	81,56	17,17	4,27	91,59	13,94	3,25	73,48	47,07	11,18	69,19	9,12	1,97	91,64
0,71	0,5	35,01	7,05	91,53	9,06	2,06	83,62	11,41	2,84	94,42	13,18	3,07	76,55	36,80	8,74	77,94	8,31	1,80	93,43
0,5	1	23,70	4,78	96,30	9,32	2,12	85,73	7,31	1,82	96,24	14,78	3,45	80,00	19,73	4,69	82,62	7,79	1,68	95,12
0,25	2	11,57	2,33	98,63	18,59	4,22	89,96	5,35	1,33	97,57	23,89	5,57	85,57	17,66	4,20	86,82	8,12	1,75	96,87
0,125	3	3,02	0,61	99,24	13,91	3,16	93,12	3,05	0,76	98,33	18,80	4,38	89,96	22,02	5,23	92,05	5,13	1,11	97,98
0,063	4	1,49	0,30	99,54	14,32	3,25	96,37	3,38	0,84	99,16	20,38	4,75	94,71	18,77	4,46	96,51	4,02	0,87	98,85
<0.063	5	2,27	0,46	100,00	15,98	3,63	100,00	3,36	0,84	100,00	22,68	5,29	100,00	14,69	3,49	100,00	5,32	1,15	100,00
Total		496,33	100,00		440,23	100,00		402,39	100,00		428,78	100,00		420,91	100,00		462,69	100,00	

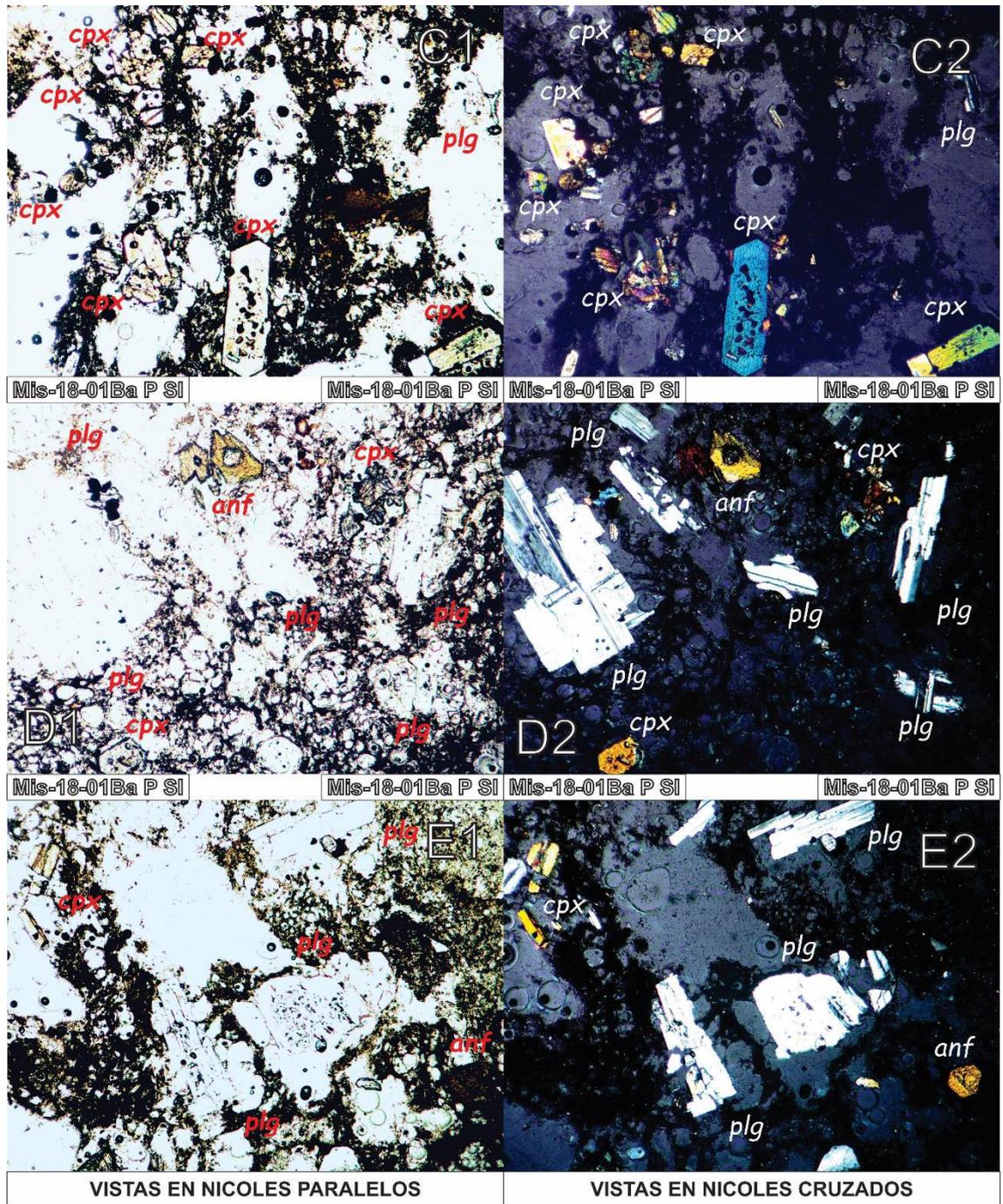
Anexo IV: Base de datos histórico meteorológicas del SENAMHI (<https://web2.senamhi.gob.pe/?p=data-historica>), de las estaciones Chiguata, Las Salinas y la Pampilla.

Glosario: S.D.: sin datos; NW: noroeste; SW: sur oeste; W: oeste; D.: dirección; V.: velocidad; P: precipitación; H: horas; 7: a las 7 horas; 19: a las 19 horas; C: error desconocido.

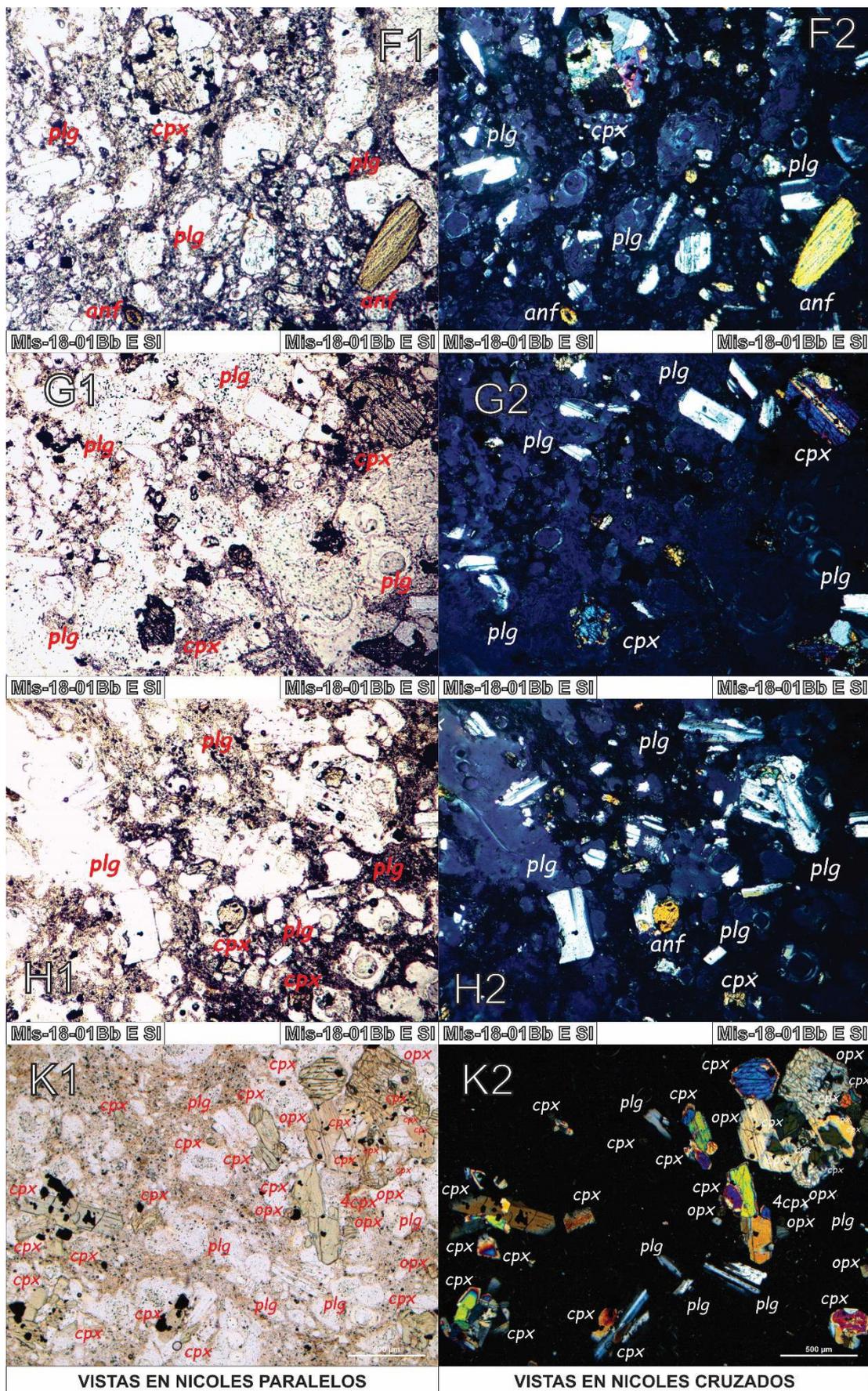
ESTACIÓN CHIGUATA													
2008		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)		139.20	77.10	10.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.40
2009		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)		9.90	108.10	19.50	8.80	0.00	0.00	0.40	0.00	0.20	0.00	0.80	0.00
2010		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)		10.50	32.40	8.60	3.40	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.60
2011		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)		73.10	160.40	5.90	7.20	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.90
2012		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)		162.10	230.70	78.00	28.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.60
2013		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)	7	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
	19	61.50	100.50	63.50	0.00	5.40	1.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.90
D. DEL VIENTO 13h		S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	W	W	W	W	W	W	W
V. DEL VIENTO 13H (m/s)		S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	5.40	5.94	5.87	5.80	5.68	5.73	6.06
2014		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)	7	12.70	0.00	1.20	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	19	54.70	0.80	6.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D. DEL VIENTO 13H		W	W	W	W	W	S.D.	W	W	S.D.	S.D.	W	W
V. DEL VIENTO 13H (m/s)		5.81	5.79	5.87	4.96	4.65	4.69	5.14	5.00	6.00	S.D.	6.72	10.38
2015		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)	7	3.20	46.20	36.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	19	8.60	58.20	81.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D. DEL VIENTO 13H		W	W	W	W	W	S.D.	S.D.	W	W	W	W	W
V. DEL VIENTO 13H (m/s)		11.90	9.14	8.71	7.14	S.D.	S.D.	S.D.	3.19	3.13	3.50	3.33	3.52
2016		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)	7	0.00	10.50	3.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	19	0.00	55.10	3.60	7.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D. DEL VIENTO 13H		W	W	W	W	W	W	S.D.	W	W	W	S.D.	S.D.
V. DEL VIENTO 13H (m/s)		5.29	4.74	4.94	4.67	4.60	4.10	S.D.	4.13	4.27	4.23	S.D.	S.D.
2017		En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm/mes)	7	S.D.	S.D.	S.D.	0.00	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.60	7.60
	19	S.D.	S.D.	S.D.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	18.10
D. DEL VIENTO 13H		S.D.	S.D.	S.D.	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	NW
V. DEL VIENTO 13H (m/s)		S.D.	S.D.	S.D.	7.03	7.74	7.40	7.29	7.87	7.80	8.58	8.93	7.93

Anexo V: Vistas en nicols paralelos y nicols cruzados de secciones delgadas de muestras del “Sandwich Inferior” y “Sandwich Superior”.

Pómez “Sandwich Inferior”



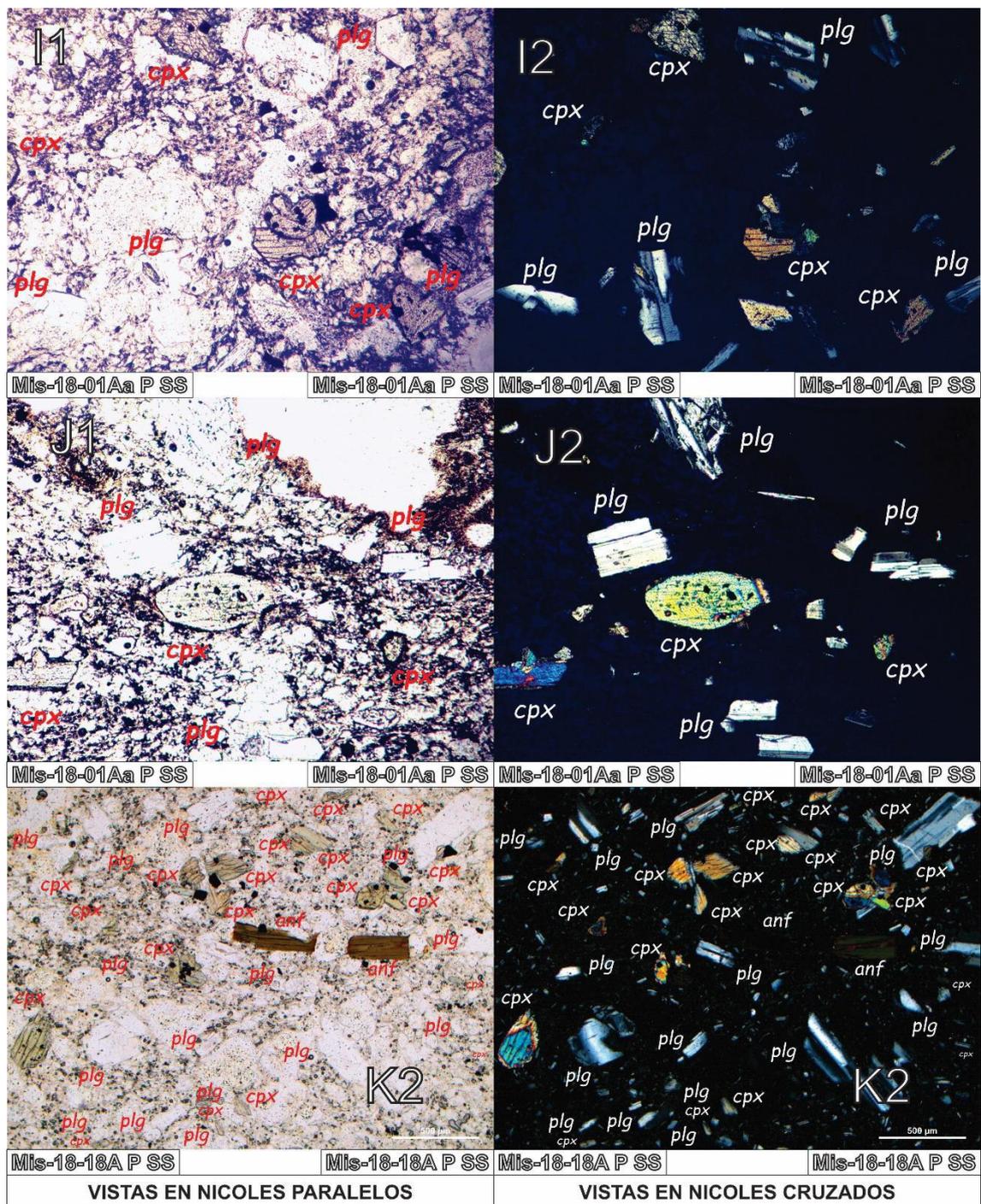
Escoria "Sandwich Inferior"



VISTAS EN NICOLES PARALELOS

VISTAS EN NICOLES CRUZADOS

Pómez “Sandwich Superior”



Escoria "Sandwich Superior"

