

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

**FACULTAD DE GEOLOGÍA GEOFÍSICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**“ESTUDIO TEFRO-ESTRATIGRÁFICO DE LOS DEPÓSITOS ASOCIADOS CON LAS
ERUPCIONES RECIENTES DEL VOLCÁN YUCAMANE (Tacna)”**

Tesis presentada por:

**Bach. Jessica Carolina Vela Valdez.
Para optar el título profesional de
Ingeniero Geólogo**

**AREQUIPA - PERÚ
2015**

AGRADECIMIENTOS

Al creador de todas las cosas, el que me ha dado fuerzas para continuar; por ello con toda humildad que de mi corazón puede emanar, dedico primeramente mi trabajo a Dios.

De igual forma, dedico esta tesis a mi madre que ha sabido formarme con buenos hábitos y valores. A mis hermanas que con su optimismo me ayudaron a seguir con mis ideales.

Mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial a mis asesores el Dr. Marco Rivera y el Dr. Pablo Samaniego, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa de la misma, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de estos años.

Quiero agradecer al Ing. Jersy Mariño, a la Ing. Luisa Macedo y a todos mis compañeros del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, por su apoyo, sus enseñanzas y sus consejos.

Gracias a mi asesor de tesis el Ing. Guido Salas de la Universidad Nacional de San Agustín por la revisión detallada de este trabajo.

Agradezco al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico y al Instituto de Investigación por el Desarrollo (IRD, Francia), por la beca que me otorgó durante el período en el cual realice mi tesis.

**ESTUDIO TEFRO-ESTRATIGRÁFICO DE LOS DEPÓSITOS ASOCIADOS CON LAS ERUPCIONES
RECIENTES DEL VOLCÁN YUCAMANE**

(TACNA)

INDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 Ubicación y acceso	3
1.2 Objetivos del estudio	5
1.3 Estudios geológicos previos	5
1.4 Reportes históricos.....	6
1.5 Población	6
1.6 Hidrografía.....	9
1.7 Metodología	12
1.7.1 Recopilación y estudio de material bibliográfico	12
1.7.2 Trabajo de campo.....	12
1.7.3 Trabajo de laboratorio	12
1.7.4 Procesamiento de la información y redacción de la tesis.....	13

CAPITULO II: MARCO GEOLÓGICO

2.1 Estratigrafía Regional	14
Formación Labra (Jurásico Superior).....	14
Formación Hualhuani (Cretáceo Inferior)	15
Formación Toquepala (Cretáceo Superior al Oligoceno Medio).....	15
Grupo Tacaza (Oligoceno Medio al Mioceno Inferior).....	16
Formación Huaylillas (Mioceno Inferior al Mioceno Superior).....	17
Grupo Barroso Mioceno Superior al Pleistoceno.....	18
Depósitos morrénicos y fluvioglaciares.....	19
Depósitos aluviales.....	19
2.2 Estructuras tectónicas regionales y locales.....	20
2.3 Geología del complejo volcánico Yucamane- Calientes	22

CAPÍTULO III: ESTRATIGRAFÍA HOLOCÉNICA

3.1 Secuencia Estratigráfica	26
3.1.1 Edad de los depósitos.....	28
3.2 Descripción estratigráfica de los depósitos de caída de escoria.....	28
3.2.1 Halloween Inferior.....	28
3.2.2 Escoria parda	29
3.2.3 Halloween Superior	31
3.3 Descripción estratigráfica del depósito de caída de lapilli de pómez	32
3.3.1 Secciones y correlación estratigráfica	35

3.4 Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza	39
--	----

CAPITULO IV: GRANULOMETRÍA Y COMPONENTES DEL DEPÓSITO DE CAÍDA DE LAPILLI DE PÓMEZ

4.1 Análisis granulométrico del depósito de caída de lapilli de pómez	42
4.1.1 Método utilizado para el análisis granulométrico	42
4.1.2 Histogramas.....	44
4.1.3 Parámetros estadísticos:	45
4.1.4 Resultados de los parámetros estadísticos en el sector proximal	48
4.1.5 Resultados de los parámetros estadísticos en el sector medial	49
4.1.6 Interpretación de los parámetros estadísticos en el sector proximal y medial.....	50
4.1.7 Diagrama de Walker.....	51
4.2 Análisis de los componentes litológicos.....	52
4.2.1 Características de los componentes litológicos en el sector proximal	53
4.2.2 Características de los componentes litológicos en el sector medial.....	56
4.2.3 Resumen de análisis de los componentes litológicos	59

CAPITULO V: PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DEL DEPÓSITO DE CAÍDA DE LAPILLI DE PÓMEZ

5.1 Ubicación de muestras para estudio petrográfico y geoquímico	61
5.2 Caracterización petrográfica del depósito de caída de lapilli de pómez	61
5.3 Geoquímica	66
5.3.1 Diagramas de Clasificación.....	66
5.3.2 Conclusiones del estudio geoquímico.....	67

CAPITULO VI: DINÁMICA ERUPTIVA EN BASE AL ESTUDIO DEL DEPÓSITO DE CAÍDA DE LAPILLI DE PÓMEZ

6.1 Análisis del depósito de caída de lapilli pómez	68
6.1.1 Mapa de isópacas:.....	68
6.1.2 Estimación del volumen del depósito de caída.....	71
6.1.3 Mapa de isopleas	73
6.1.3.1 Mapa de isopleas de pómez	73
6.1.3.2 Mapa de isopleas de líticos.....	75
6.1.4 Estimación de la altura de la columna	77
6.1.4.1 Modelo de Walker & Croasdale (1971).....	77
6.1.4.2 Método de Carey y Sparks (1986).....	78
6.2 Discusión del modelo eruptivo del depósito de caída de lapilli de pómez	80
6.2.1 VEI y tipo de erupción	81

CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

RESUMEN

Los estudios tefroestratigráficos del volcán Yucamane señalan que durante la época post-glaciár (post-LGM, i.e. < 18-24 ka), se han identificado al menos 4 erupciones explosivas importantes, cuyos depósitos de caída de tefra se encuentran distribuidos en la parte oriental y sur-oriental del edificio.

El depósito más reciente de la última erupción subpliniana aflora muy bien, en la planicie denominada Pampa Cambaya Apache ubicada al oriente del edificio, este depósito aflora hasta el pueblo Hueltajavira. Dos edades $14C$ han sido realizadas en material carbonizado de la base de este depósito y dan valores coherentes de 3085 ± 35 y 3270 ± 50 años. También se considera como parte de la erupción a un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza que se ubica al NE y NW del volcán, el cual en base a su posición estratigráfica y a la composición de la pómez, correspondería al mismo evento eruptivo.

En este estudio se han dividido dos sectores: En el sector proximal, el nivel inferior posee gradación inversa, está compuesto por ceniza fina de color negro con alto contenido de líticos lávicos frescos. El nivel medio es una capa de color gris rojizo debido al elevado contenido de líticos oxidados. El nivel superior presenta abundante pómez. Los balísticos de pómez se encuentran principalmente en este sector y predominan en el tope del depósito.

En el sector medial, el nivel inferior presenta alto contenido de líticos lávicos frescos. El nivel medio presenta un elevado contenido de líticos oxidados. En el nivel superior el contenido de pómez es superior al de líticos.

El depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza al NE del volcán se extiende hasta 5 km desde el cráter del volcán, con un área total de alrededor de $3 \times 10^6 \text{ m}^2$. Al NW, la distancia máxima alcanzada por el flujo es de aproximadamente 3.3 km, con un área total de alrededor de $1.6 \times 10^6 \text{ m}^2$. Este flujo habría sido originado por el colapso de la columna eruptiva en el estadio final de la erupción.

Las pómez del depósito son de composición andesítica (61-62% de SiO_2) pertenecientes a la serie calcoalcalina característico en rocas del Plio-cuaternario de la zona volcánica central de los andes (ZVC) ligados a procesos de subducción.

Se estima que la columna eruptiva de la erupción que emplazó el depósito de caída de lapilli de pómez, tuvo una altura entre 11 y 12 km. El área cubierta por la isópaca de 5 cm (menor espesor identificado) cubre alrededor de 28.6 km^2 . El volumen total estimado para el depósito de caída y el flujo piroclástico de pómez y ceniza es de $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$. De estos datos, deducimos que la erupción fue subpliniana, y alcanzó un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) 3.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Los volcanes Cuaternarios en el sur de Perú se ubican en la Cordillera Occidental de los Andes, formando parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC, De Silva & Francis, 1991). Se ha identificado una docena de volcanes activos o potencialmente activos, que de NO a SE, son: Sara Sara, Solimana, Coropuna, Ampato-Sabancaya, Chachani, Misti, Ubinas, Ticsani, Huaynaputina, Tutupaca, Yucamane y Casiri (Simkin & Siebert, 1994).

El volcán Yucamane (Figura 1.1) constituye el edificio más joven de un complejo volcánico constituido además por un edificio más antiguo, denominado Calientes, ubicado al norte del Yucamane (Rivera y Mariño, 2004; Rivera et al., 2014). El Yucamane forma parte de los siete volcanes activos del arco volcánico peruano.

Este trabajo ha sido desarrollado en el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) y está enmarcado dentro del convenio de cooperación entre el Instituto de Investigación por el Desarrollo (IRD, Francia) y el INGEMMET. Es así que desde el año 2012 se viene estudiando la cronología eruptiva de este centro volcánico, así como la evolución geológica y petrológica de los productos eruptivos con el fin de realizar la evaluación de la amenaza volcánica asociada con este edificio. En base a los estudios de campo, se ha identificado un importante depósito de caída de tefra que aflora en la parte occidental del cono, el cual correspondería a una de las últimas erupciones importantes del volcán Yucamane (Rivera y Mariño, 2004; Rivera et al., 2014).

El estudio de las erupciones recientes del volcán Yucamane es de fundamental importancia para determinar las características propias de estos eventos volcánicos, y así poder evaluar la amenaza volcánica asociada con este volcán.



Figura 1.1: Complejo volcánico Yucamane localizado a 11 km al NE de la ciudad de Candarave.

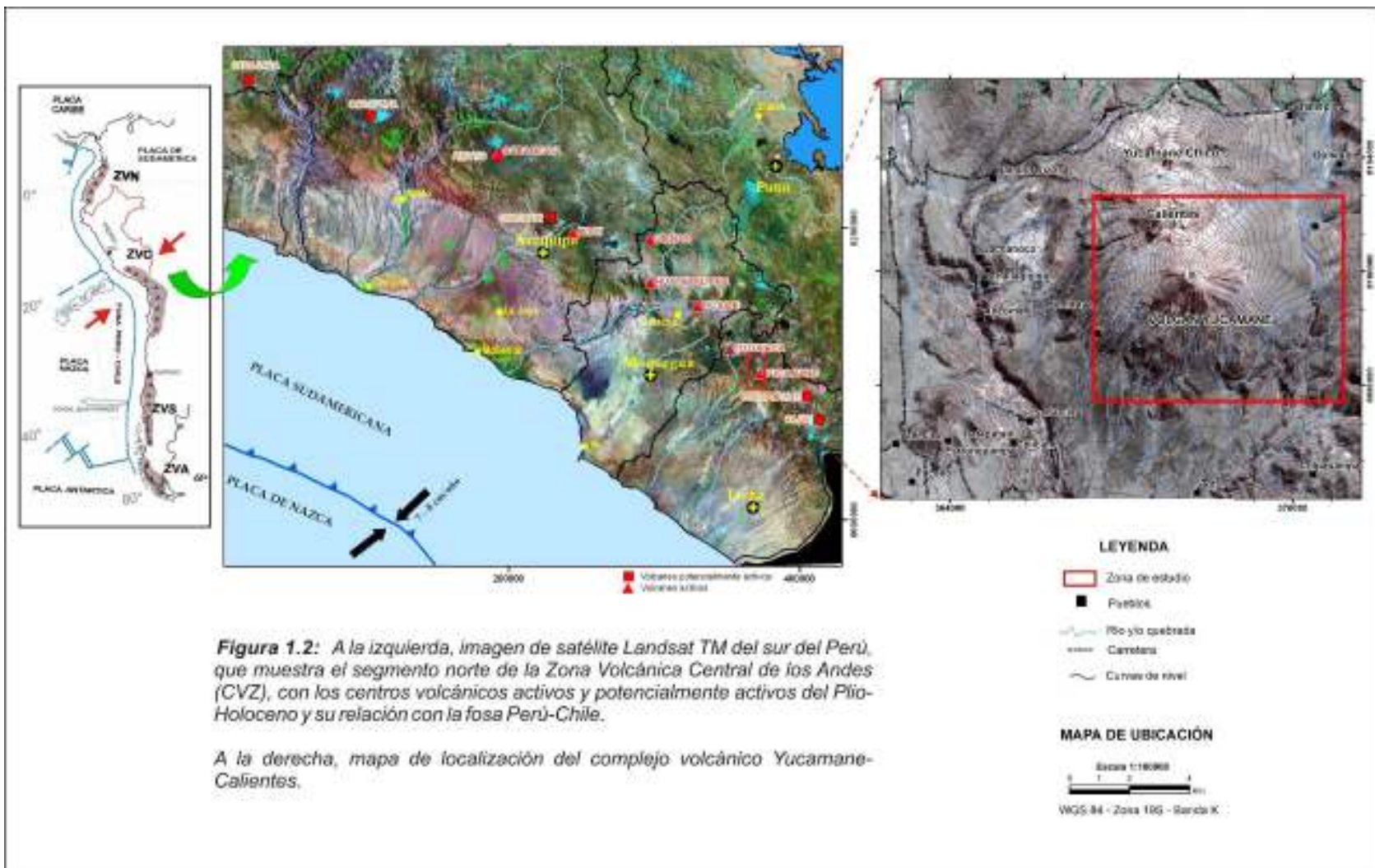
1.1 Ubicación y acceso

El volcán Yucamane (5508 metros sobre el nivel del mar msnm); con coordenadas 8099880N y 372500E (UTM – WGS 84 - Zona 19 Sur - Banda K), se encuentra ubicado en el extremo norte del departamento de Tacna, provincia de Candarave (Figura 1.2).

El acceso al complejo volcánico Yucamane-Calientes se realiza a través de 3 vías principales (Tabla 1.1), las cuales permiten llegar al volcán desde las ciudades de Moquegua y de Tacna.

Carretera	Tiempo	Km
La carretera Tacna-Tarata-Candarave	3h 11mim	191.0
La carretera Tacna-Locumba-Candarave	2h 31mim	171.8
La carretera Binacional Ilo-Moquegua-Desaguadero	3h 54mim	199.0

Tabla 1.1: Accesos al complejo volcánico Yucamane-Calientes.



1.2 Objetivos del estudio

La presente tesis tiene los siguientes objetivos:

1.2.1 Objetivo general

Prevención y mitigación de las amenazas naturales de origen volcánico, en caso de una posible reactivación del volcán Yucamane.

1.2.2 Objetivos específicos

- Cartografiado geológico de la zona de estudio a una escala de 1/25000 para delimitar el depósito de caída de tefra.
- Describir la estratigrafía de los depósitos de caída y la descripción litológica de los productos emitidos.
- Realizar el análisis granulométrico y conteo de los componentes litológicos.
- Estimar los parámetros físicos asociados con la erupción reciente (altura de la columna eruptiva, volumen y magnitud del evento).
- Reconstruir el dinamismo eruptivo.
- Obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo.

1.3 Estudios geológicos previos

- En el 2004, Marco Rivera y Jersy Mariño realizaron la Geología, petrología y evaluación preliminar de las amenazas volcánicas del volcán Yucamane (Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v. 98-2004 p. 7-27), este trabajo describe las fases de construcción del volcán Yucamane, su comportamiento y la descripción de las amenazas potenciales que se ciernen sobre los poblados y obras de infraestructura localizados a menos de 9 km al sur, y suroeste del Yucamane.
- En el 2001, Lionel Fidel y Alfredo Huamaní realizaron el mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Yucamane (Serie C, INGEMMET, 158 p.): Este estudio hace referencia a los principales elementos probables de amenaza volcánica como son: flujos de lava, flujos piroclásticos y caídas de tefra, así como el riesgo geológico de la zona, representado sobre un mapa de amenaza volcánicas.
- De la Cruz N & de la Cruz O. (2000). Mapa Geológico del Cuadrángulo de Tarata, a escala 1:50,000, INGEMMET, se expone la geología del cuadrángulo de Tarata, comprendiendo los aspectos fisiográficos, estratigráficos y estructurales, además de algunas consideraciones sobre la geología económica del área.

1.4 Reportes históricos

Los reportes de la actividad de este volcán en los últimos siglos son escasos y contradictorios, reportándose el siguiente evento:

Dean Valdivia, en el libro “Fragmentos para la Historia de Arequipa” (Folletín de “El Deber”, Arequipa, 1874, p. 109-111), considera a Candarave como anexo de Ilabaya, erigido en curato en 1776 por el Monseñor Abad Yllana, quién lo describe así: “Es frío y produce alfalfa. A su cabeza se halla el volcán Yucamane, que humea y reventó en parte en 1787”. Sin embargo, en el campo no se distinguen depósitos asociados a dicha erupción.

1.5 Población

En un radio de 14 km del volcán Yucamane se encuentran asentados 3 centros poblados urbanos (Tabla 1.2) y 26 pueblos rurales (Tabla 1.3), estos pueblos se encuentran ubicados en el distrito y provincia de Candarave (Figura 1.3). Según el censo de 2007 el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), muestra que en total hay una población de 2699 habitantes.

CENTRO POBLADO URBANO	POBLACIÓN NOMINANTEMENTE CENSADA	VIVIENDAS PARTICULARES	DISTANCIA AL VOLCÁN (km)
Candarave	1248	514	11.3
Santa Cruz	416	166	9.6
San Pedro	267	144	9.8
TOTAL	1931	824	

Tabla 1.2: Población urbana de la provincia y distrito de Candarave. Basado en: XI censo de población y VI censo de vivienda, 2007. Censos Nacionales.

CENTRO POBLADO RURAL	POBLACIÓN NOMINANTEMENTE CENSADA	VIVIENDAS PARTICULARES	DISTANCIA AL VOLCÁN (km)
Ancoaque	6	2	9.2
Challepiña	5	2	6.7
Quisquire	3	1	6.6
Coline	3	1	4.8
San Lorenzo	3	1	7.5
Jachahoco	7	3	7.3
Challagipiña	1	1	7.1
Ancoma	-	1	7.4
Humiraya	1	1	4.3
Chillihuani	5	1	3.7
San Luis	2	1	7.5
Estronepampa	3	1	11.0
Chilcane	5	2	8.4
Pallata	0	3	9.5

Callerao	64	37	9.6
Yucamani	179	84	9.0
Cacahuarani	-	1	10.0
Totora	123	61	7.5
Cocachi	6	4	11.5
Patapatani	120	79	10.0
Esperanza	8	5	12.0
Talaca	94	75	12.5
Laurahuani	-	1	13.0
Mullini	59	29	13.0
La victoria	69	25	14.0
Vallecito	2	1	12.0
TOTAL	768	423	

Tabla 1.3: Población rural de la provincia y distrito de Candarave. Basado en: XI censo de población y VI censo de vivienda, 2007. Censos Nacionales.



Figura 1.3: Ubicación de centros poblados rurales y urbanos del distrito de Candarave.

1.6 Hidrografía

El complejo volcánico Yucamane se encuentra dentro de la cuenca del río Locumba. Esta cuenca se encuentra ubicada en la parte sur del Perú, políticamente se localiza entre los departamentos de Moquegua y Tacna, y geográficamente se encuentra entre las siguientes coordenadas (UTM - WGS 84 - Zona 19 Sur - Banda K):

8 011 800 N	266 000 E
8 146 000 N	386 000 E

El río Locumba, cuenta con un caudal capaz de abastecer a todos los poblados existentes en su cuenca. La cuenca del río Locumba se ha separado en doce subcuencas (Figura 1.4):

- | | |
|----------------------------|--------------------------------|
| - Subcuenca Callazas | - Subcuenca Suches |
| - Subcuenca Aricota | - Subcuenca Cinto |
| - Subcuenca Ite | - Subcuenca Locumba |
| - Subcuenca Quebrada Honda | - Subcuenca Salado |
| - Subcuenca Santallana | - Subcuenca Tacalaya – Ilabaya |
| - Subcuenca Vizcachas | - Subcuenca Quebradilla |

En caso de una futura reactivación del volcán Yucamane, las subcuencas que se verían afectadas son: Callazas, Aricota, Vizcachas, Suches, Salado, Tacalaya-Ilabaya (Cotrina et al., 2009). Todas estas subcuencas están muy cerca al volcán Yucamane.

La cuenca del río Locumba presenta un área aproximada de 6493.8 km² y su perímetro total es de 469.2 km, tiene una forma alargada con pendientes pronunciadas.

La precipitación media anual de la cuenca del río Locumba es 144.6 mm. En el mapa de Isoyetas (Figura 1.5) se puede observar que las lluvias se concentran en el sector de Candarave, mientras que en los sectores de Huaytire y Vizcachas no hay concentración de lluvias, pero tienen la mayor precipitación promedio anual (Cotrina et al., 2009).

La escorrentía superficial de la cuenca se ha calculado de acuerdo a la suma de los caudales de los ríos Tacalaya, Calientes, Callazas y Salado, cuyas uniones forman el río Locumba. El río Locumba tiene una escorrentía tomada en la estación Limnimétrica de Puente Viejo de 2694 m³/s, lo que equivale a 13.3 mm/año (Cotrina et al., 2009).

Dentro de los análisis realizados por el INGEMMET en la cuenca del río Locumba se detectó la presencia de arsénico y boro, los cuales son contaminantes. Estos elementos se detectaron en las quebradas Azufre Chico, Azufre Grande, Tacalaya y Calientes. Esta contaminación natural se encuentra asociada solamente a acuíferos profundos, en la subcuenca del Callazas y Calientes se ha detectado que el contenido de arsénico es más elevado (Cotrina et al., 2009).

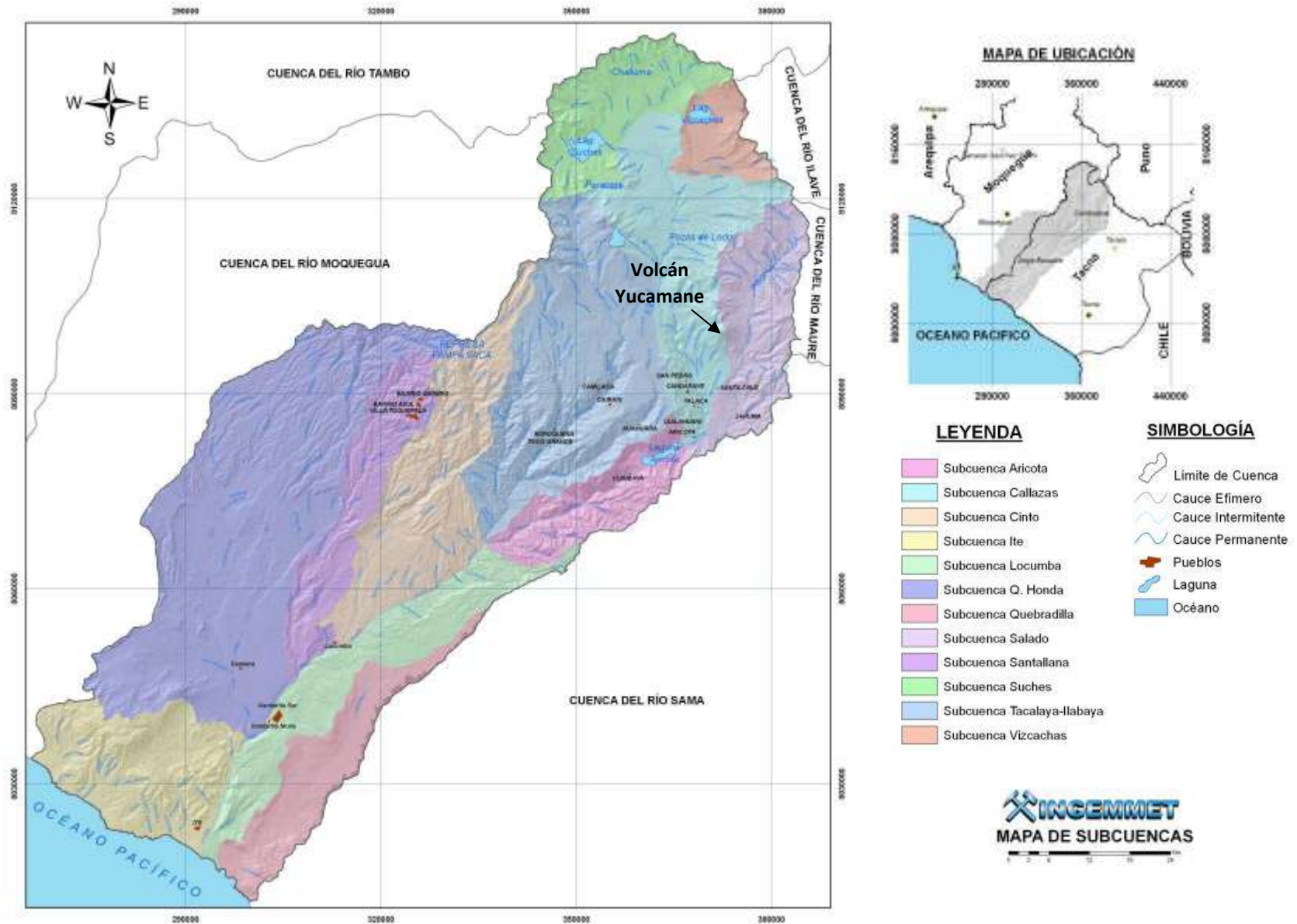
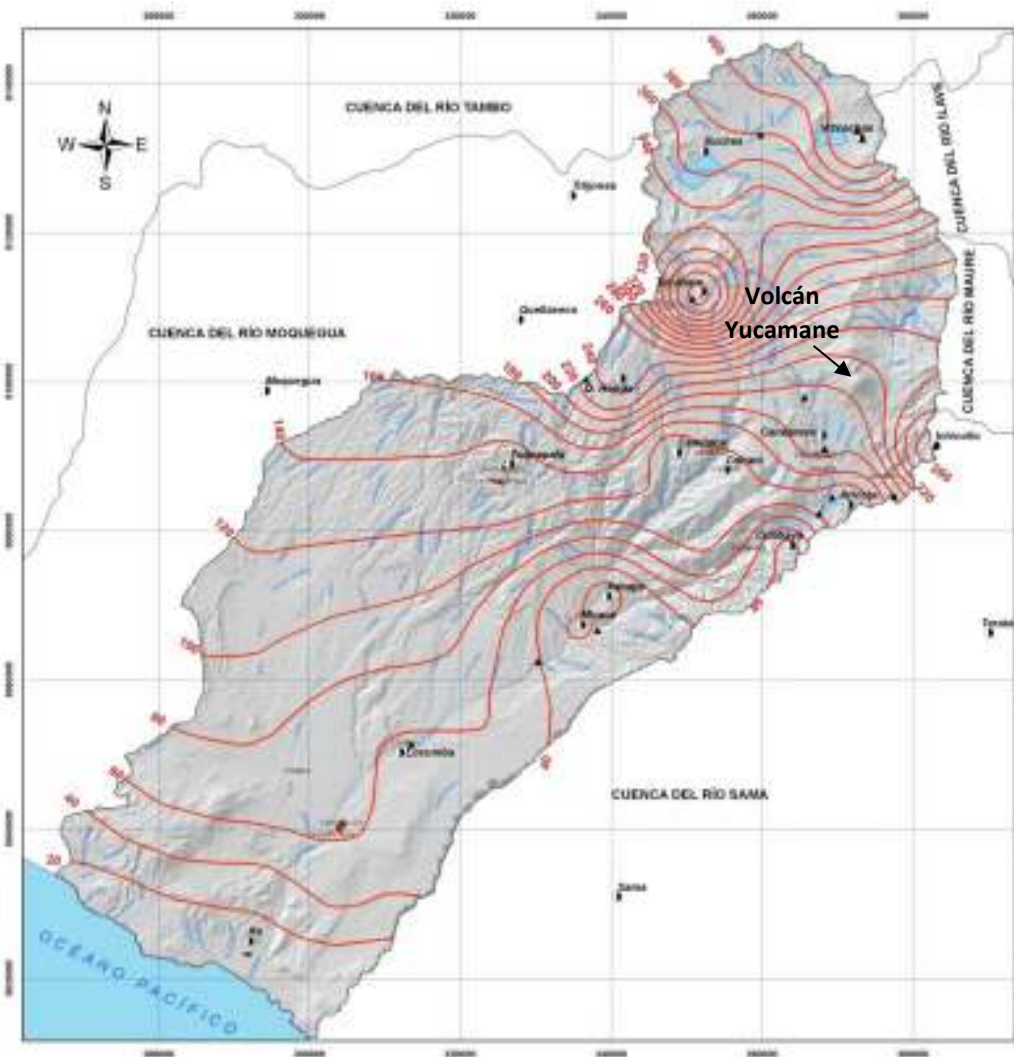


Figura 1.4: Mapa de subcuencas de la cuenca del río Locumba (Cotrina et al., 2009).



LEYENDA

- ▲ Estación de Aforo
- Estación Pluviométrica
- 120 Isoyeta

SIMBOLOGÍA

- Limite de Cuenca
- ~ Cauce Efímero
- ~ Cauce Intermitente
- ~ Cauce Permanente
- pueblos
- Laguna
- Océano



Figura 1.5: Mapa de Isoyetas de la cuenca del río Locumba (Cotrina et al., 2009).

1.7 Metodología

1.7.1 Recopilación y estudio de material bibliográfico

- Recopilación y consulta de bibliografía vulcanológica y publicaciones de estudios realizados sobre el área de interés.
- Acopio de planos geológicos, a escala 1/100 000, del cuadrángulo de Tarata (hoja 35-v, Carta Geológica Nacional, INGEMMET).
- Para el estudio geológico se utilizaron imágenes ASTER e imágenes LANDSAT-TM. Para el procesamiento de imágenes satelitales, así como también la digitalización de mapas tanto geológico, geomorfológico y estructural elaborado en el presente estudio, se utilizó el programa Arcgis 10.1
- Para el tratamiento de los datos se utilizó el programa Excel y para la elaboración de los diagramas y gráficos para la geoquímica se utilizó el IGPET.
- Por último se desarrolló la redacción y correcciones de la tesis.

1.7.2 Trabajo de campo

El trabajo de campo se dividió en 4 campañas de 10 días cada una, financiado por el INGEMMET. Las salidas al campo se realizaron en noviembre del 2013, abril, junio y setiembre del 2014.

El trabajo de campo consistió en:

- Cartografiado geológico de la zona de estudio a una escala de 1/25000 para delimitar el depósito de caída de tefra y el depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza.
- Identificar los afloramientos de caída de lapilli de pómez que aparecen en cortes de las quebradas y carreteras, también se realizaron calicatas al norte, sur, este y oeste del volcán.
- Descripción detallada de las secciones tefro-estratigráficas de los niveles del depósito de caída.
- Medición de espesores en cada calicata y afloramientos del depósito.
- Medición de MP y ML: Se anotaron las dimensiones de los fragmentos de pómez (MP) y líticos (ML) más grandes; para ello se recolectaron los cinco fragmentos más grandes y se tomó nota de los diámetros mayores.
- Toma de muestras: Las muestras se tomaron donde las pómez se encuentran bien preservadas para llevar a cabo su análisis ya sea químico, petrográfico y granulométrico.

1.7.3 Trabajo de laboratorio

En el trabajo de laboratorio se desarrolló lo siguiente:

- El tamizado de las muestras de lapilli de pómez se realizó en las el OVI (Observatorio Vulcanológico del INGEMMET). Se usaron las mallas de 31.5, 16, 8, 4, 2, 1,0.5, 0.125, 0.063 y 0.032 mm, bajo la norma ASTM (American Society for Testing and Materials, 2003). Esta información fue utilizada para la elaboración de los histogramas.

- El análisis granulométrico y el conteo de los componentes (pómez, líticos y cristales) de las muestras de lapilli pómez se realizó en las instalaciones del OVI (Observatorio Vulcanológico del INGEMMET).
- Se hizo la selección de las mejores muestras de pómez, las cuales fueron enviadas al laboratorio “Dominios Oceánicos”, Universidad de Bretaña Occidental (Brest, Francia), para los análisis geoquímicos de elementos mayores y trazas mediante el método de ICP-AES. Los análisis químicos fueron financiados por el IRD.
- Las secciones delgadas fueron elaboradas por el INGEMMET. El estudio petrográfico de las secciones delgadas fue realizado en un microscopio de marca LABOMED Lx 400P en el OVI (Observatorio Vulcanológico del INGEMMET).

1.7.4 Procesamiento de la información y redacción de la tesis

En la etapa final del trabajo se realizaron tanto las secciones estratigráficas, la correlación de columnas estratigráficas, histogramas granulométricos, gráficos de porcentajes de los componentes litológicos y gráficos de análisis químicos. Se realizó un mapa de isópacas y dos mapas de isopletas, estos mapas permitieron hacer la estimación de la altura de la columna eruptiva y el volumen de material emplazado. Finalmente se redactó la tesis.

CAPITULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 Estratigrafía Regional

En áreas cercanas al volcán Yucamane, las rocas más antiguas son areniscas, lutitas del Jurásico superior al Cretáceo inferior (Grupo Yura). A continuación se encuentra una secuencia de lavas andesíticas a dacíticas y riolíticas, con algunos niveles de sedimentos, depositados durante el Cretáceo superior (Formación Toquepala). Sobreyaciendo a esta formación se encuentra una secuencia de lavas andesíticas intercalada con flujos piroclásticos (Grupo Tacaza). A este grupo le siguen las ignimbritas riódacíticas del Mioceno (Formación Huaylillas). Las rocas más modernas en el área están representadas por derrames y piroclastos principalmente andesíticos del Grupo Barroso.

Formación Labra (Jurásico Superior; Js-la)

Esta formación aflora a 11 km al Sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes, en la margen derecha e izquierda del río Callazas.

Esta formación está constituida por areniscas, areniscas cuarcíticas y cuarcitas de color gris claro a pardusco (Figura 2.1), las cuales muestran frecuentemente colores amarillo rojizos a rosado parduscos debido al intemperismo. Estos sedimentos son de grano fino a medio, con óxidos de hierro en manchas diseminadas. Estas rocas se encuentran formando capas de grosor variable y generalmente presentan estratificación cruzada, las cuales están intercaladas con paquetes gruesos de lutitas y limolitas de color verde amarillento a marrón violáceo, que hacia la base son de color gris oscuro. Hacia el techo se observan algunos niveles de calizas de color marrón grisáceo cuya extensión es muy reducida y no cartografiable. Es posible que pertenezca a la formación Gramadal.

En las lutitas de esta formación se han encontrado especímenes de *Posidonia escuttiana Douglas* y ammonites de los géneros *Reineckeia* y *Perisphinctes*, en base a los cuales se le asigna una edad Jurásico superior (Wilson y Garcia et al., 1962), la misma edad consideramos para los afloramientos del área de Tarata.



Figura 2.1: Afloramiento de areniscas de la formación Labra a 11 km al Sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes, en la margen izquierda del río Callazas.

Formación Hualhuani (Cretáceo Inferior; Ki-hu)

Esta formación aflora a 5 km al Sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

En el sector de Yucamane, esta formación está constituida por estratos de areniscas gris blanquecinas, cuarcitas blancas y areniscas gris marrón de grano grueso a fino, intercaladas con lutitas carbonosas gris a gris oscuro y marrón ocre rojizo. Esta secuencia se encuentra formando un monoclinal de afloramiento reducido.

Las cuarcitas de la formación Hualhuani yacen en conformidad sobre las lutitas y areniscas de la formación Labra del Jurásico superior. En base a su posición estratigráfica suprayacente, se les ha asignado una edad del Calloviano y en base a su litología se le asigna una edad Cretácio inferior (Wilson y Garcia et al., 1962), la misma que consideramos para el área del cuadrángulo de Tarata. Así, estos sedimentos serían correlacionables con los horizontes arenosos superiores de la formación Yura del área de Arequipa (Jenks, 1948).

Formación Toquepala (Cretáceo Superior al Oligoceno Medio; KsP-to)

Esta formación aflora a 17 km al Sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Esta formación fue datada entre 91-30 Ma, por lo cual se considera que está comprendido entre el Cretáceo superior al Oligoceno Medio (Mamani et al., 2009).

Litológicamente, esta Formación está compuesta por flujos de lava andesíticos y depósitos piroclásticos de composición andesítica, dacítica y riolítica, con algunas intercalaciones lenticulares de rocas sedimentarias cuyo espesor total se estima en 720 m (Figura 2.2).

La formación Toquepala suprayace sobre una discordancia angular a la formación Hualhuani. El miembro inferior de la formación Toquepala esta constituida en casi todo su espesor por una intercalación de derrames andesíticos y flujos piroclásticos, son de colores verde, violeta y beige, de textura mayormente porfirítica. El miembro superior es de naturaleza andesítica y riolítica; se compone de una alternancia de brechas, aglomerados y flujos de lava de textura porfirítica con algunas intercalaciones lenticulares de areniscas, areniscas calcáreas y lutitas.

Los límites de los miembros inferior y superior en la mayoría de los casos es aproximado, ya que es difícil seguir a través del área de estudio horizontes que puedan constituir niveles guías, debido a que las formaciones volcánicas varían en espesor y características litológicas de acuerdo con la distancia al centro de emisión. Por otro lado, los horizontes que se han tomado como tope y base de los miembros han sufrido deformaciones y metamorfismo de contacto por la acción de las intrusiones granodioríticas y dioríticas.



Figura 2.2: Afloramiento de lavas con intercalaciones de rocas sedimentarias de la formación Toquepala, en la laguna Aricota a 17 km al Sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

Grupo Tacaza (Oligoceno Medio al Mioceno Inferior; P-ta)

Este grupo aflora a 4 km al Sur y a 10 km al suroeste del volcán Yucamane. Las dataciones realizadas determinaron una edad comprendida entre 30 y 24 Ma, por lo cual se considera que el grupo Tacaza está comprendido entre el Oligoceno Medio al Mioceno Inferior (Klinck et al., 1986; Wasteneys et al., 1990; Sandeman et al., 1995; Fornari et al., 2002; Mamani et al., 2004).

Este grupo consiste en una secuencia de lavas andesíticas y depósitos de flujos piroclásticos soldados o consolidados (ignimbritas) de composiciones riolíticas, dacíticas y andesíticas (Figura 2.3). Superficialmente ofrecen diferentes matices producto de la erosión y meteorización;

resaltando los colores rojizos, marrón y pardo. Las ignimbritas que conforman este grupo se presentan en bancos gruesos 450 m y con fracturas verticales.

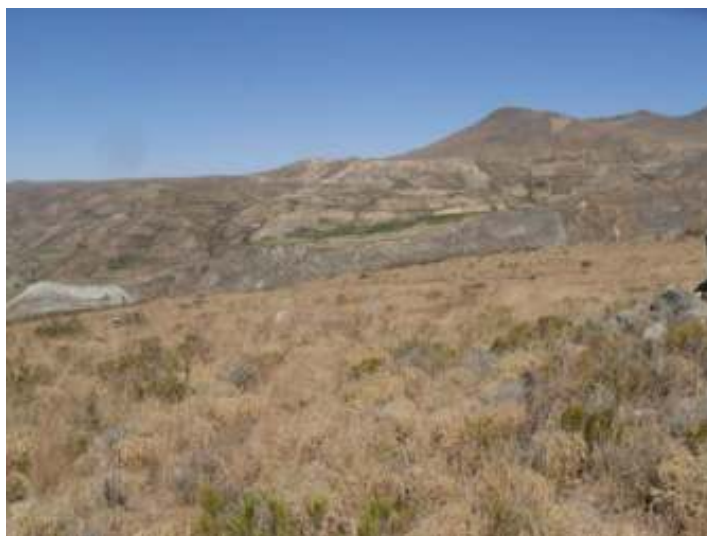


Figura 2.3: Afloramiento de lavas y flujos piroclásticos del Grupo Tacaza, en el cerro Estrone a 10 km al suroeste del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

Formación Huaylillas (Mioceno Inferior al Mioceno Superior; Nm-hu)

Esta formación aflora entre 6 y 9 km al Este, Oeste y Sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes. En esta zona, los depósitos ignimbríticos han sido datados por el método K-Ar en 21.6 ± 0.7 Ma (Tosdal et al., 1981) y 18.9 ± 0.3 (Quang et al., 2005). Esta formación está constituida por ignimbritas riódacíticas de color blanco rosáceo (Figura 2.4), muy porfiríticas en la parte inferior dando la impresión de una lava o un cuerpo subvolcánico, dispuestas en capas cuyo grosor total máximo no excede los 600 m.

Los afloramientos están muy bien expuestos, formando superficies semiplanas y acantilados en el corte de los ríos. En la carretera Cairani-Candarave, las tobas masivas fuertemente soldadas contienen biotita oxidada. La formación Huaylillas reposa en discordancia angular directamente sobre las rocas del grupo Tacaza.

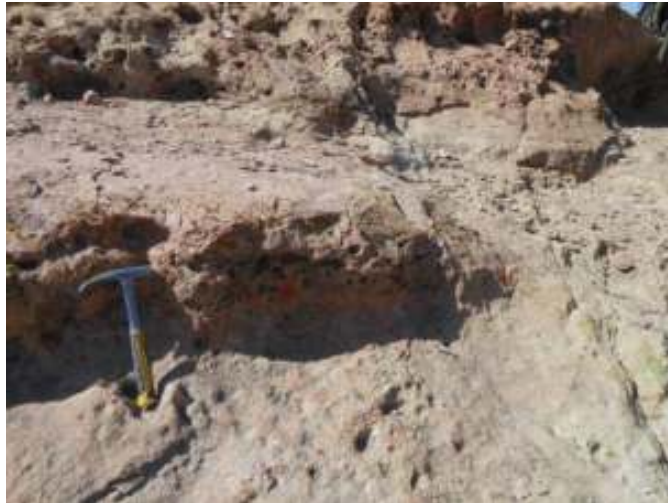


Figura 2.4: Ignimbritas riolíticas de color rosáceo tenue Formación Huaylillas emplazadas en el pueblo de Jirata.

Grupo Barroso (Mioceno Superior al Pleistoceno; N-le, N-na y N-sa)

Este grupo comprende a los aparatos edificios volcánicos que presentan un alto grado de erosión glaciaria producto de las glaciaciones cuaternarias, que rodean el área del volcán Yucamane y son los sistemas volcánicos Nazaparco al noroeste, San Pedro al noreste y Lopez Extraña al este (Figura 2.5). Dataciones radiométricas para el volcán Nazaparco (Tosdal et al., 1981; INGEMMET, 1993), dan edades K/Ar de 6.23 ± 0.1 Ma.

El miembro inferior se desarrolló entre los 9 y 4 Ma (Mioceno Superior-Plioceno Inferior, Thouret et al., 2008), está constituido predominantemente por lavas andesíticas de textura porfírica y colores gris oscuro, azulado o marrón rojizo, los fenocristales son ferromagnesianos (horblenda) que alcanzan hasta 1 cm de tamaño. La roca es compacta con inclinaciones de 15° a 45° .

El miembro superior se generó entre los 3 y 1 Ma (Plioceno Superior-Pleistoceno, Thouret et al., 2008), se caracteriza por presentar estrato-volcanes y complejos dómicos, los cuales se encuentran erosionados producto de la acción glaciaria y de la alteración hidrotermal, y que además muestran un amplio rango de composición desde andesitas máficas a riolitas.

El Grupo Barroso descansa sobre una discordancia angular sobre las formaciones Huaylillas, mientras que hacia la parte superior está cubierto en forma parcial por depósitos morrénicos y fluvio-glaciares del Pleistoceno.



Figura 2.5: *Volcán Lopez extraña al este del complejo volcánico Yucamane-Calientes.*

Depósitos morrénicos y fluvio-glaciares (H-mo, Qh-fl)

Los depósitos morrénicos (Figura 2.6) y fluvio-glaciares ocupan grandes extensiones. Las morrenas bien conservadas se han reconocido en diferentes sectores, generalmente adosando a los flancos de los edificios volcánicos, así como en las cabeceras y laderas de valles glaciares. El material que compone estas morrenas consiste predominantemente de fragmentos gruesos y angulosos mezclados con una masa areno-arcillosa. El material fluvio-glacial generalmente rellena las depresiones intermontañosas. Litológicamente se componen de conglomerados y gravas de rocas volcánicas que se intercalan con arenas y arcillas, presentando una estratificación en bancos gruesos.



Figura 2.6: *Morrenas en el flanco occidental del volcán Yucamane.*

Depósitos aluviales (Qh-al)

El material de estas terrazas se compone de cantos gruesos, gravas, arenas y arcillas, estratificadas en capas lenticulares y con inclusiones suaves en el sentido de la corriente. El área de las terrazas es generalmente utilizada como terrenos de cultivo. Los ríos tributarios al desembocar en los

valles principales han constituido pequeños conos de eyección cuyas dimensiones varían de acuerdo a la importancia de dichos tributarios.

2.2 Estructuras tectónicas regionales y locales

El análisis estructural está basado en los trabajos de Morche *et al.* (1994); Martínez *et al.* (2003); Sempere *et al.* (2008); y Benavente *et al.* (2010). Este estudio se realizó en una zona comprendida entre la laguna Suches al Norte y la laguna Aricota al Sur (Figura 2.7).

En la zona de estudio se han identificado 2 sistemas de fallas y/o lineamientos principales: Un sistema de falla de orientación NO-SE y un sistema de fallas NE-SO (Figura 2.7). Estos sistemas de fallas y lineamientos están controlados por la convergencia oblicua entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana (Mering *et al.*, 1996).

El sistema de fallas NO-SE, se encuentra cortando rocas del sustrato emplazados en el Cretáceo (Formación Toquepala) y en el Mioceno (Formación Huaylillas). La principal estructura regional asociada al fallamiento andino es el sistema de fallas Incapuquio, las cuales tienen un rumbo preferencial N 40°-60°O, son estructuras de carácter regional, siendo reconocida su traza desde Chile (Sistema de Fallas Domeyko), con más de 200 kilómetros de longitud (Tacna, Moquegua, Arequipa). Esta falla es de tipo transcurrente sinistral (Acosta *et al.*, 2012). Otros lineamientos importantes son los que se encuentran en los valles de los ríos Callazas y Tacalaya. Sobre este sistema se consideran fallamientos recientes cuyos ejemplos se observan en la falla Yucamane, Yucamane Chico y Mal Paso.

En el área de la laguna Suches, Benavente *et al.* (2010) observan fallas normales con una dirección promedio N140° y buzamientos opuestos formando estructuras extensionales de tipo grabens. Las fallas normales con buzamiento hacia el Suroeste tienen una longitud que varían entre 1 a 5 km y presentan saltos de falla de hasta 5 metros de altura afectando lavas andesíticas. Estas fallas afectan depósitos aluviales y fluvio-glaciares. En los alrededores de la laguna Vilacota se pone en evidencia la presencia de fallas normales con componente sinistral con una dirección promedio N165° y buzamientos mayormente hacia el Suroeste, la zona donde las fallas tienen su mayor expresión morfológica es al Noreste de la laguna.

Las fallas transversales orientadas en el sistema NE-SO se encuentran a lo largo de los principales ríos (Curibaya y Huanuara). La falla Calientes coincide con el cauce del río Calientes observándose una importante actividad geotermal a lo largo de este lineamiento. Al sur de Candarave y en la margen izquierda del Río Callazas se encuentran fallas normales con fuerte buzamiento hacia el este, produciendo el hundimiento de los bloques orientales, estas fallas presentan escarpas pronunciadas.

2.3 Geología del complejo volcánico Yucamane-Calientes

El volcán Yucamane es el edificio más reciente del complejo volcánico Yucamane-Calientes que tiene una orientación aproximada N-S (Fig.2.8). El volcán Yucamane presenta una forma cónica, definiendo una diferencia de elevaciones entre su base y la cumbre de 1 200 m, y cubriendo una superficie aproximada de 20 km². En su cima se distinguen dos cráteres uno de 900 m de diámetro y otro de menor tamaño, de 400 m de diámetro y de 200 m de profundidad. Por su parte, el volcán Calientes es un volcán parcialmente destruido, que conserva sólo su extremo occidental, en forma de una cicatriz de caldera de avalancha, dentro del cual se ha emplazado un complejo de domos de lava denominado “Calientes”.

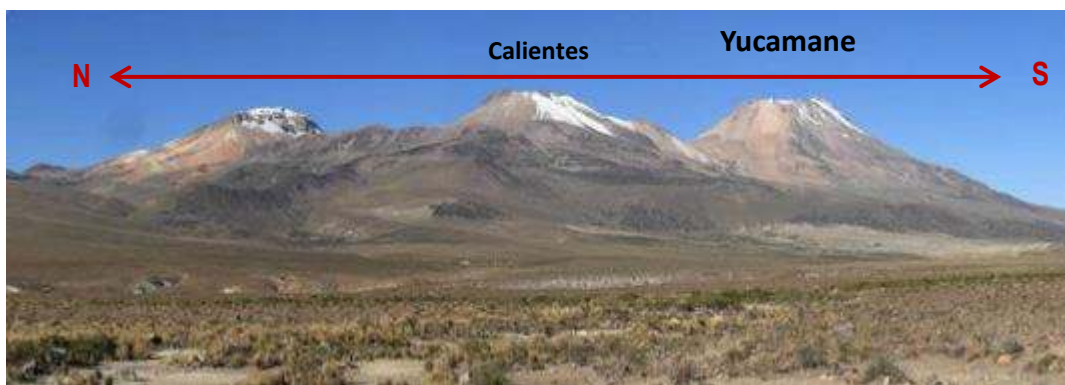


Figura 2.8: Flanco oeste del Complejo Volcánico Yucamane-Calientes. En el extremo derecho el volcán Yucamane y a su izquierda el volcán Calientes.

En base a los estudios geológicos, estratigráficos, dataciones radiométricas (⁴⁰K/⁴⁰Ar, ¹⁴C) e interpretación de imágenes satelitales Landsat TM y ASTER, Rivera et al. (2014) proponen la siguiente evolución crono-estratigráfica. Sobre los remanentes de un antiguo edificio volcánico de edad Mio-Pliocénica (Yucamane Chico) y posterior a una secuencia ignimbrítica importante (ignimbrita “Calientes”), datada en 540 ka (France, 1985), se construyó el **volcán Calientes**, el cual presenta tres etapas evolutivas. La etapa más antigua se denomina “Calientes I” (Figura 2.9), en la cual se emplazaron lavas andesíticas y dacíticas (58 – 65 wt.% SiO₂) visibles en la base del volcán. Estas lavas muestran pendientes poco pronunciadas (<20°) y rellenan una antigua caldera de colapso asociada probablemente con la ignimbrita antes mencionada. La etapa “Calientes II” se caracteriza por el emplazamiento de lavas andesíticas y dacíticas (60-64 wt.% SiO₂) de la cima del volcán que cubren las lavas anteriormente descritas. Estas lavas muestran pendientes pronunciadas (<45°). Posteriormente, ocurrió el colapso del flanco sur que probablemente generó el depósito de avalanchas de escombros que se aprecia a 8-10 km al sur de dicho volcán, en el sector de Santa Cruz. La última etapa, denominada “Calientes III” fue posterior al colapso sectorial y se caracterizó por la formación de un complejo de domos dacíticos (64 wt.% SiO₂) localizados en el sector sur-oriental del edificio. En base a la poca erosión que caracteriza este complejo de domos, se considera que se emplazaron posterior al último máximo glacial (LGM, <18-15 ka).

Por su parte, el **volcán Yucamane** se ha construido al menos en tres etapas evolutivas. La etapa “Yucamane I” constituye el periodo inicial de construcción del edificio, en el cual se emplazaron flujos de lavas de composición andesítica y andesítica básica (55-62 wt.% SiO₂). Estas lavas presentan suaves pendientes (<15°) y descansan sobre la secuencia ignimbrítica de composición dacítica de más de 100 m de espesor denominada ignimbrita “Calientes”. En una fase evolutiva posterior denominada “Yucamane II” se produjo el crecimiento y colapso de domos que emplazaron al menos cinco depósitos de flujo de bloques y ceniza, visibles hasta a 9 km en el flanco sur y sureste del volcán (Quebrada Honda). Entre ellos, en una primera etapa generó un depósito de blast que aflora en la base de la secuencia de flujos de bloques y ceniza visible en el sector oeste y suroeste del volcán (Figura 2.10), datada por el método ¹⁴C en 36450 ± 270 años AP.



Figura 2.10: Depósito Blast a 9 km al SW del volcán Yucamane.

Una tercera etapa, denominada “Yucamane III”, se caracterizó por el emplazamiento de flujos de lavas dacíticas y andesíticas (59 – 65 wt.% de SiO₂) que conforman el edificio superior del volcán y que se consideran del Pleistoceno Superior-Holoceno (Figura 2.11). Los flujos de lava superpuestos presentan en general pendientes muy inclinadas (>40°).



Figura 2.11: Flujos de lava dacíticas y andesíticas “Yucamane III” en el cono superior del volcán Yucamane.

Después del emplazamiento de dichas lavas, la actividad eruptiva del Yucamane fue caracterizada por erupciones explosivas de baja magnitud que depositaron varias capas de caídas de tefras (Figura 2.12 a y b). Estas erupciones formaron el cráter actual.



Figura 2.12: a) Depósito de caída de escoria a 4 km al sureste del cráter del volcán Yucamane. b) Depósito de caída de lapilli de pómez a 3.5 km al sureste del cráter del volcán Yucamane.

CAPÍTULO III

ESTRATIGRAFÍA HOLOCÉNICA

3.1 Secuencia Estratigráfica

Los depósitos más recientes de la última erupción del volcán Yucamane afloran muy bien en la planicie denominada Pampa Cambaya Apache ubicada al oriente del edificio, entre el flanco del volcán y el valle del río Salado, estos depósitos afloran hasta el pueblo Hueltajavira. Se han identificado al menos 4 erupciones explosivas importantes, en orden cronológico se emplazaron los siguientes depósitos:

- a) Una secuencia de tres depósitos delgados de caída de escorias que tienen entre 20 a 4 cm de espesor. Esta secuencia está formada por los siguientes depósitos: Halloween inferior (I), Escoria Parda (II) y Halloween superior (III). El depósito Halloween inferior y Escoria parda (Figura 3.1 a) se emplazaron hasta 8 km al sureste del cráter. El depósito Halloween superior (Figura 3.1 b) se emplazó solo hasta 3 km al sureste del cráter.
- b) Cubriendo a los tres depósitos de caída de escoria se encuentra un depósito de caída de lapilli de pómez (Figura 3.1 b), tuvo una dispersión lobular cuyo eje está dirigido hacia el sureste del cráter, alcanzando una distancia de 7.5 km.
- c) Un flujo de pómez y ceniza (Figura 3.2) asociado al depósito de caída de lapilli de pómez, emplazados en el flanco NE y al NW del volcán y se extiende hasta 5 km de distancia.



Figura 3.1: a) Depósito de caída Halloween Inferior y Escoria parda 6 km al sureste del cráter. b) Depósito de caída Halloween Superior y depósito de caída de lapilli de pómez 3 km al sureste del cráter.



Figura 3.2: Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza a 4km al NE del cráter.

3.1.1 Edad de los depósitos

En base a la historia eruptiva del Yucamane, este tipo de erupciones se han repetido al menos 4 veces en la historia reciente (últimos miles de años del volcán), siendo la última ocasión hace 3000 años aproximadamente.

En base a muestras de carbón encontrado en la base del depósito de caída de lapilli pómez, se dataron dos edades de $14C$ y dan valores de 3085 ± 35 y 3270 ± 50 años. Por lo tanto, la secuencia de los tres depósitos de caída de escoria y el depósito de caída de lapilli de pómez son depósitos post glaciares (< 10 ka) (Rivera et al., 2014) es decir estos eventos son Holocenos, más precisamente entre 10 y 3 ka.

3.2 Descripción estratigráfica de los depósitos de caída de escoria

3.2.1 Halloween Inferior

Este depósito se reconoció en 7 afloramientos ubicados entre 4 km y 6.5 km del cráter del volcán. Tiene un espesor máximo de 14 cm (a una distancia de 4 km) y se adelgaza hasta 4 cm (a 6.5 km del cráter). Está compuesto por escoria de tonos rojizos y líticos lávicos frescos (Figura 3.3). La escoria constituye el 80 vol. % del depósito y los líticos lávicos frescos se encuentran en un 20 vol. %. Esta roca es vesiculada y presenta cristales de plagioclasa (15 vol. %), anfíboles (8 vol. %) y biotita (<3 vol. %). Los líticos lávicos frescos son angulosos, densos y afaníticos. El máximo tamaño de líticos es de 2 cm de diámetro y el tamaño máximo de escoria se encuentra entre 2 y 3 cm. Presenta moderada gradación inversa y buen sorteo.



Figura 3.3: Sección del depósito de caída Halloween Inferior a 5 km al sureste del cráter.

Debido al escaso número de punto de medida de los espesores, no fue posible realizar un mapa de isópacas detallado, sin embargo procedimos a graficar los espesores medidos con el fin de tener una idea del eje de dispersión de esta caída (Figura 3.4). En este mapa, el eje de dispersión estaría orientado en dirección sureste. La isópaca de 5 cm estaría ubicada a 6.5 km del cráter, mientras que la de 10 cm a 5.4 km y la de 15 cm a 4 km.

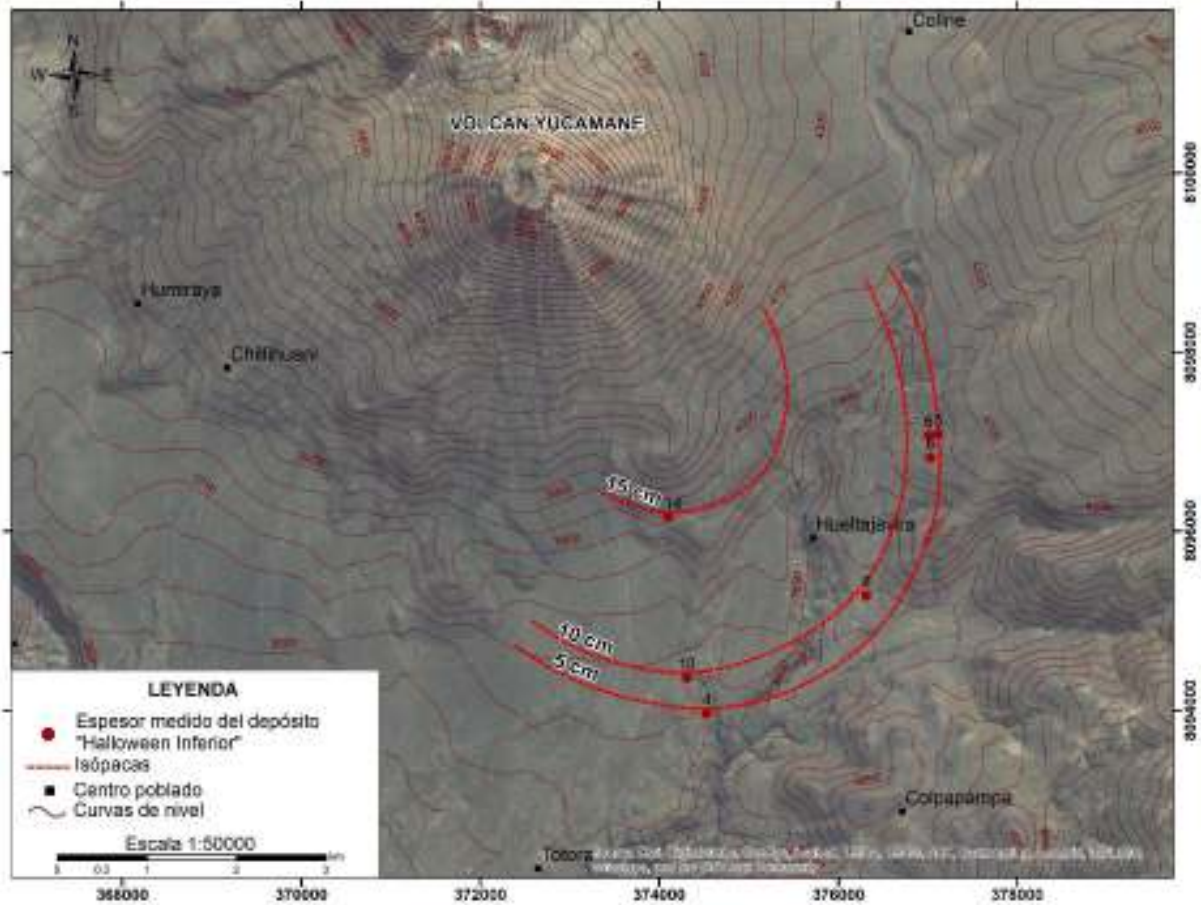


Figura 3.4: Mapa de isópachas del depósito Halloween inferior donde se muestra la variación del espesor con la distancia.

3.2.2 Escoria parda

Este depósito se reconoció en 7 afloramientos ubicados entre 3.7 km y 6 km del cráter del volcán. El espesor máximo observado es de 20 cm y se adelgaza hasta 4 cm. El depósito de caída de escoria parda está compuesto por escoria de tonos amarillentos y líticos lávicos frescos (Figura 3.5). La escoria constituye el 70 vol. % del depósito y los líticos lávicos frescos se encuentran en un 30 vol. %. Esta roca es vesiculada y presenta cristales de plagioclasa (10-15 vol. %), anfíboles (<5 vol. %) y biotita (<3 vol. %). Los líticos lávicos frescos son angulosos, densos y afaníticos. La base y tope del depósito se encuentra enriquecido de líticos lávicos frescos. El máximo tamaño de líticos se encuentra entre 1-2 cm de diámetro, mientras que el tamaño máximo de escoria se encuentra entre 2-3 cm. Presenta moderada gradación inversa y buen sorteo.

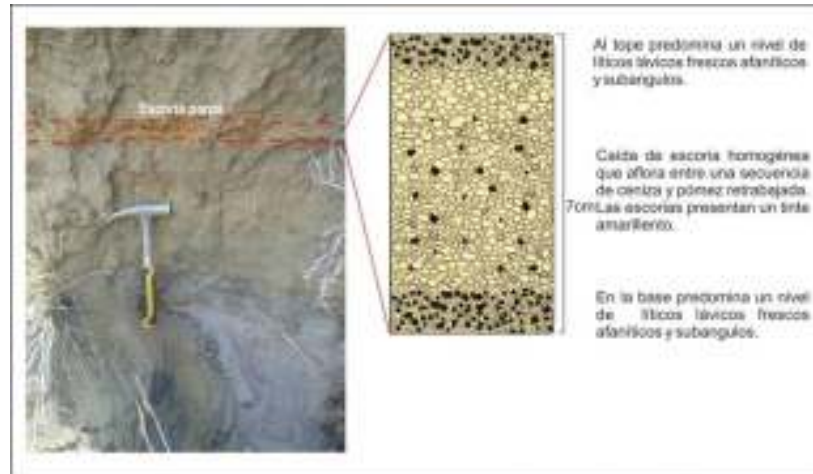


Figura 3.5: Sección del depósito de caída de escoria parda a 4 km al sureste del cráter.

En base a los datos de espesor recolectados, se puede inferir que el eje de dispersión estuvo orientado hacia el sureste (Figura 3.6). La isópaca de 5 cm pasaría a 6 km del cráter, la de 10 cm a 5.8 km, la de 15 cm a 4.5 km, la de 20 cm a 3.7 km.

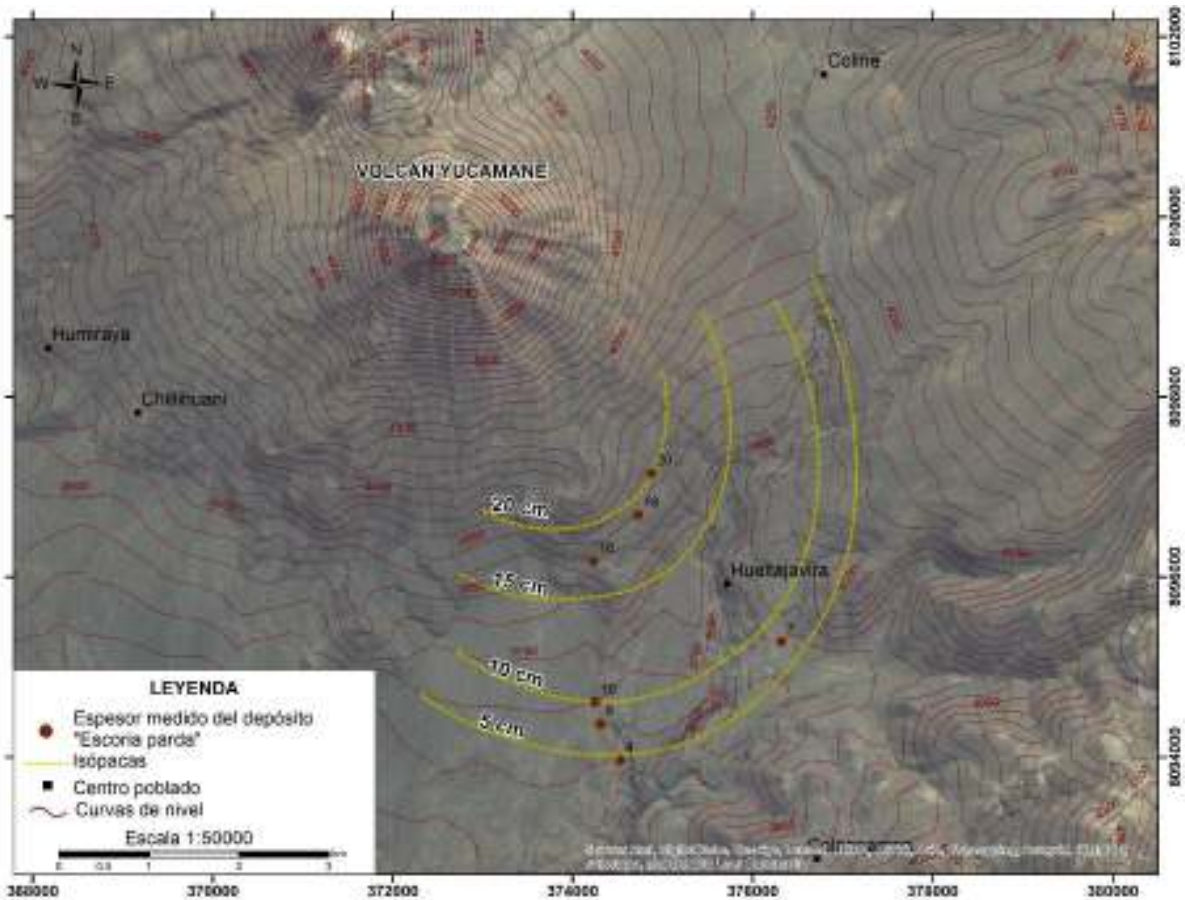


Figura 3.6: Mapa de isópacas del depósito Escoria parda donde se muestra la variación del espesor con la distancia.

3.2.3 Halloween Superior

Este depósito se reconoció solamente en 5 afloramientos ubicados entre de 3 a 4 km al sureste del volcán Yucamane. Este depósito alcanza un espesor máximo de 22 cm y un espesor mínimo de 15 cm. El depósito de caída denominado "Halloween Superior" está compuesto por escoria y líticos lávicos frescos (Figura 3.7). El componente más abundante en este depósito corresponde a una escoria (70 vol. %), seguido de los líticos lávicos frescos (30 vol. %). La escoria presenta vesículas esféricas, es de color anaranjado, presenta cristales de plagioclasa (15-20 vol. %), anfíboles (6 vol. %) y biotita (<3 vol. %). Los líticos lávicos frescos son angulosos, densos y afaníticos. El tope del depósito se encuentra enriquecido de líticos lávicos frescos. El máximo tamaño de líticos es de 3 cm de diámetro, mientras que el tamaño máximo de escoria es de 2 cm. Presenta moderada gradación inversa y buen sorteo.

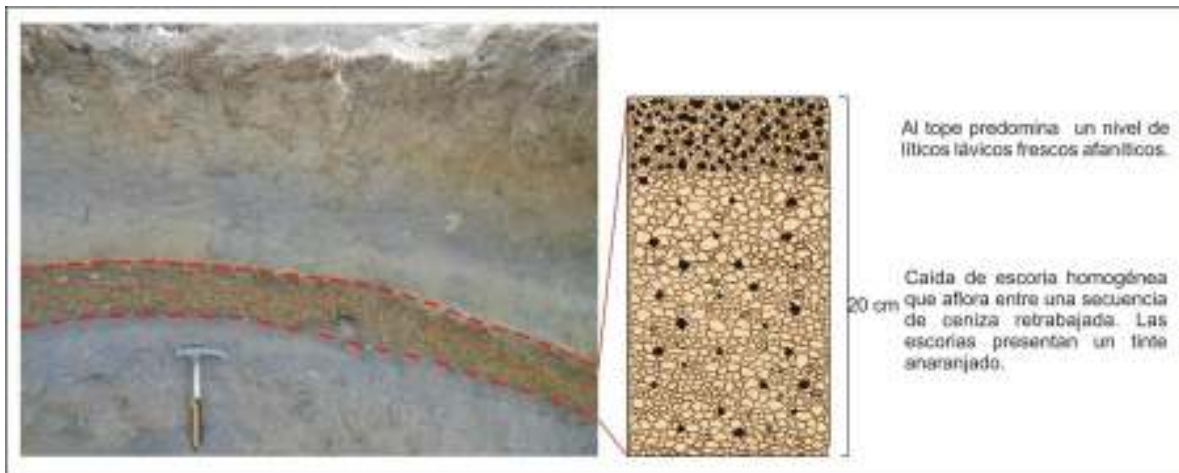


Figura 3.7: Sección del depósito de caída Halloween superior a 3.5 km al sureste del cráter.

La isópaca de 20 cm pasa a 3.5 km del cráter y la de 15 cm a 4 km, las dos isópacas (Figura 3.8) se encuentran al sureste del cráter.

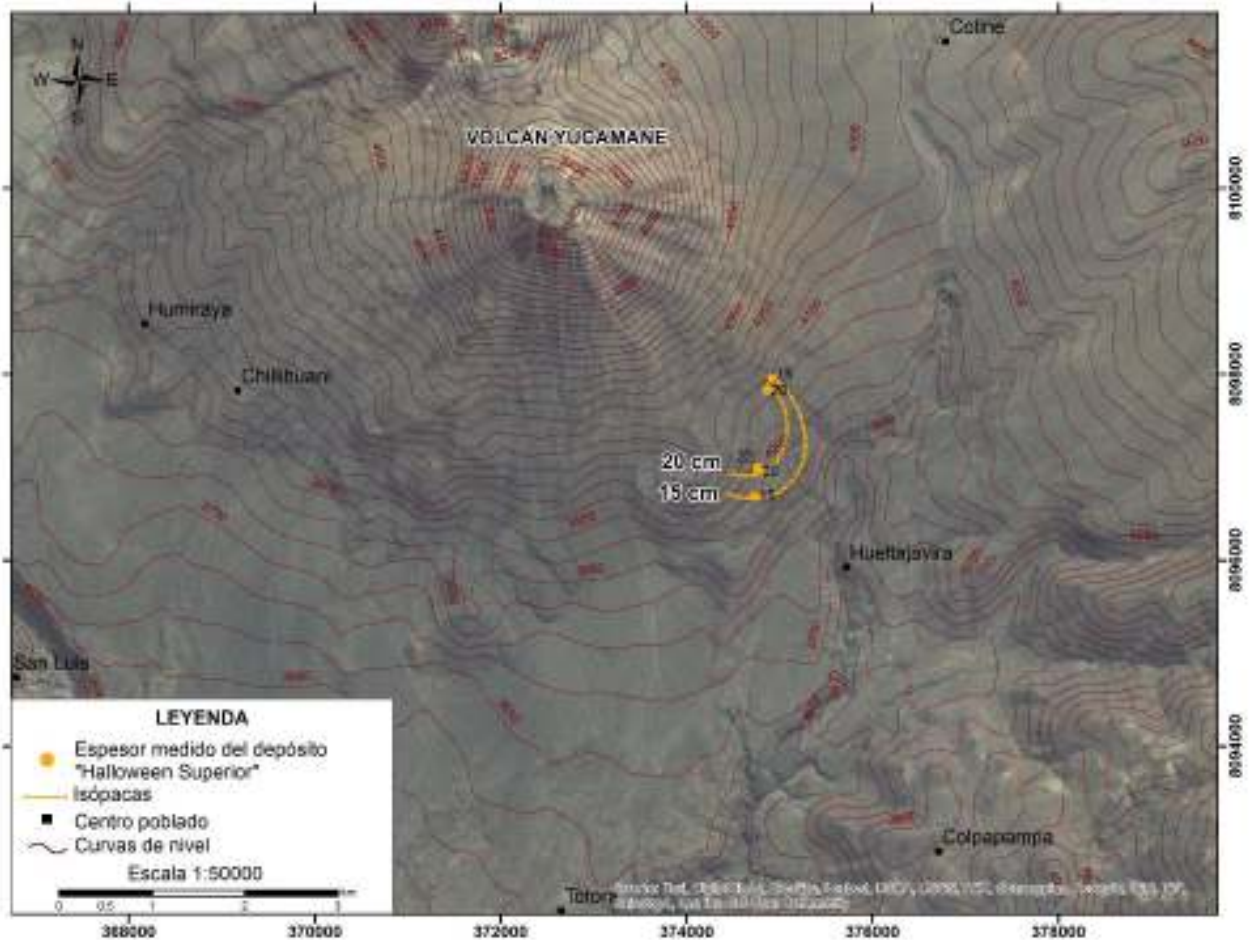


Figura.3.8: Mapa de isópachas del depósito Halloween superior.

3.3 Descripción estratigráfica del depósito de caída de lapilli de pómez

En base a la observaciones de campo, en este trabajo consideramos tres sectores: proximal (0-4.5 km del viento), medial (4.5-7.5 km) y distal (> 7.5 km, Figura 3.9). No fue posible estudiar en detalle el sector distal debido a que no se han encontrado afloramientos ya que estos han sido mayoritariamente erosionados.



Figura 3.9: Límites de los sectores proximal, medial y distal del depósito.

La descripción estratigráfica de las secciones se realizó a través de calicatas (Figura 3.10 a y b) y en cortes de carretera o quebradas (Figura 3.11 a y b).

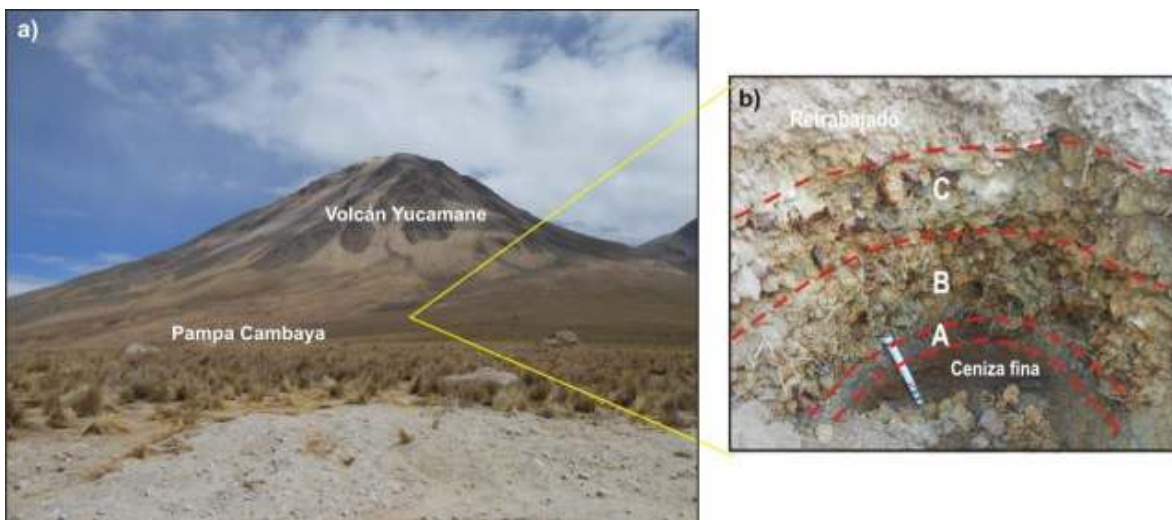


Figura 3.10 a) Depósito de caída al pie del flanco este del estratovolcán Yucamane. b) Calicata en el depósito de caída a 2 km del cráter, donde se muestran los 3 niveles.



Figura 3.11 a) Vista panorámica del depósito de caída en una quebrada a 5.5 km al sureste del cráter. b) Niveles del depósito de caída visto en una quebrada.

En el sector proximal y medial se identificaron tres diferentes niveles, los cuales se representan con las letras A, B y C (Figura 3.12). A continuación se describen los tres niveles:

- **Nivel A (Nivel inferior):** Este nivel tiene un espesor máximo de 6 cm en el sector proximal y se reduce gradualmente a 1 cm en el sector medial. Está compuesto por ceniza fina de color negro, con alto contenido de líticos lávicos frescos (90-100%), el ML (máximo tamaño de líticos) es de 0.5 y 1 cm para el sector proximal y 0.5 cm para el sector medial. Presenta gradación inversa y un buen sorteo.
- **Nivel B (Nivel medio):** En el sector proximal tiene un espesor máximo de 28 cm y disminuye gradualmente hasta 12 cm. En el sector medial el espesor máximo es de 9 cm y se reduce hasta los 6 cm. La pómez es angulosa a subangulosa, muy vesiculada, y de color gris verdosa, aunque presenta una pátina de oxidación (color amarillo-ocre) debido a la erosión, tiene una textura porfirítica con grandes fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Los cristales de plagioclasa miden hasta 5 mm, los cristales de anfíboles y biotita miden hasta 3 mm. Los líticos son de tres clases: a) líticos lávicos frescos, de color gris oscuro, densos y afaníticos; b) abundantes líticos lávicos oxidados, de color marrón a rojizos y densos; c) líticos hidrotermalizados muy alterados y de color blanquecino. En la zona proximal el ML (máximo tamaño de líticos) es de 5-6 cm de diámetro y el MP (máximo tamaño de pómez) es de 4-5 cm. En la zona medial el ML es de 2-3 cm y el MP es de 2 cm. La variación del tamaño de grano es granocreciente de la base al techo del depósito, es decir presenta gradación inversa y tienen buen sorteo.
- **Nivel C (Nivel superior):** En el sector proximal tiene un espesor máximo de 21 cm y se reduce gradualmente hasta 10 cm. En el sector medial el espesor es de 9-10. Las pómezes son de color verdoso, muy vesiculadas, las vesículas son milimétricas y contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. En esta capa los líticos (oxidados y lávicos) se encuentran en menor cantidad que en el nivel B, pero es abundante en el contenido de pómez. En la zona proximal el ML es de 4-5 cm y el MP es de 5-6 cm. En la zona medial el ML es de 1-2 cm y el MP es de 3-4 cm. Los balísticos de pómez se encuentran en el sector proximal, son de color verde claro y tienen diámetros de 12 a 15 cm y se ubican generalmente en el límite superior de este nivel. Los fragmentos balísticos presentan

crisales de plagioclasa que miden hasta 1 cm, los anfíboles y biotitas miden hasta 0.5 cm. Este nivel no presenta gradación y tiene buen sorteo.

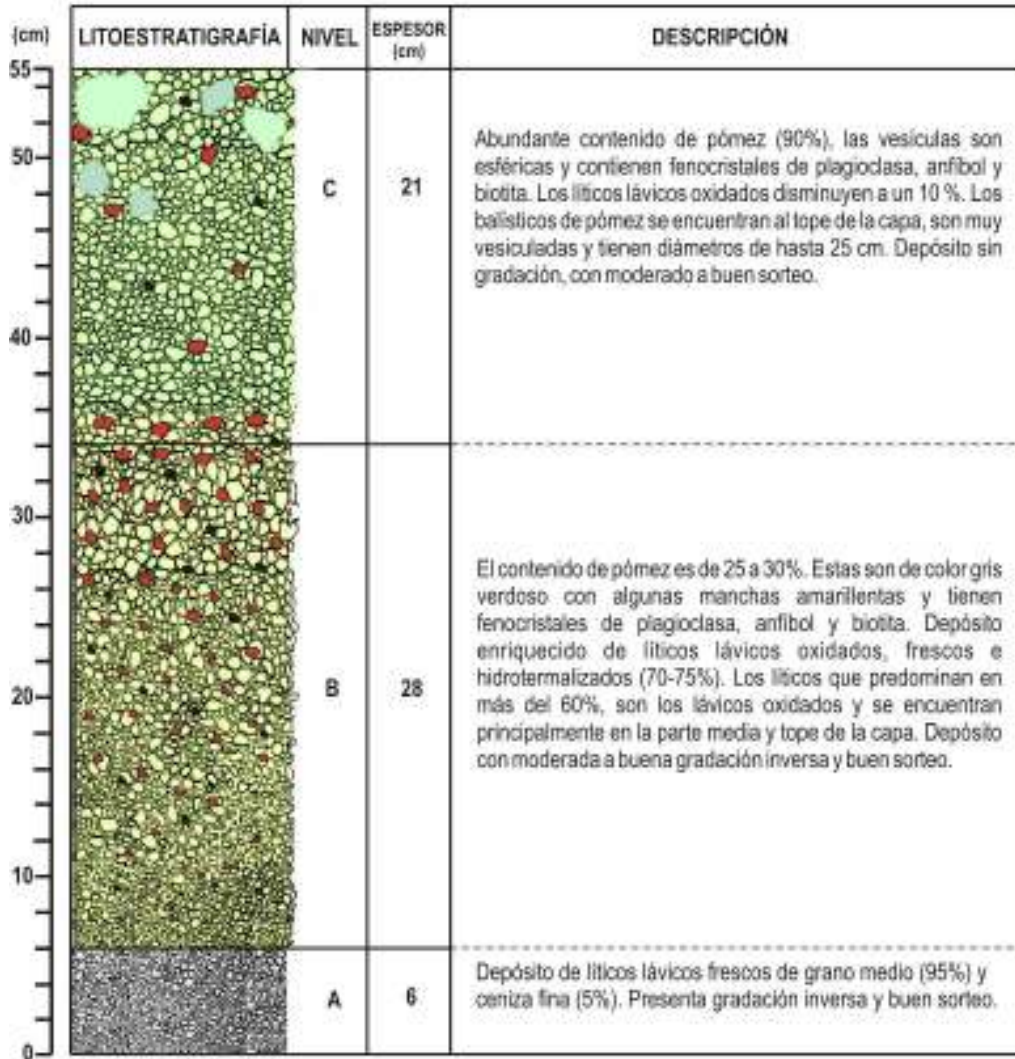


Figura 3.12: Sección modelo del depósito de caída de lapilli de pómez a 2.5 km al este del cráter.

3.3.1 Secciones y correlación estratigráfica

La ubicación de las secciones más representativas se encuentra en la figura 3.13. En la zona proximal se realizó la descripción tefroestratigráfica de 9 secciones y 4 secciones en la zona medial.

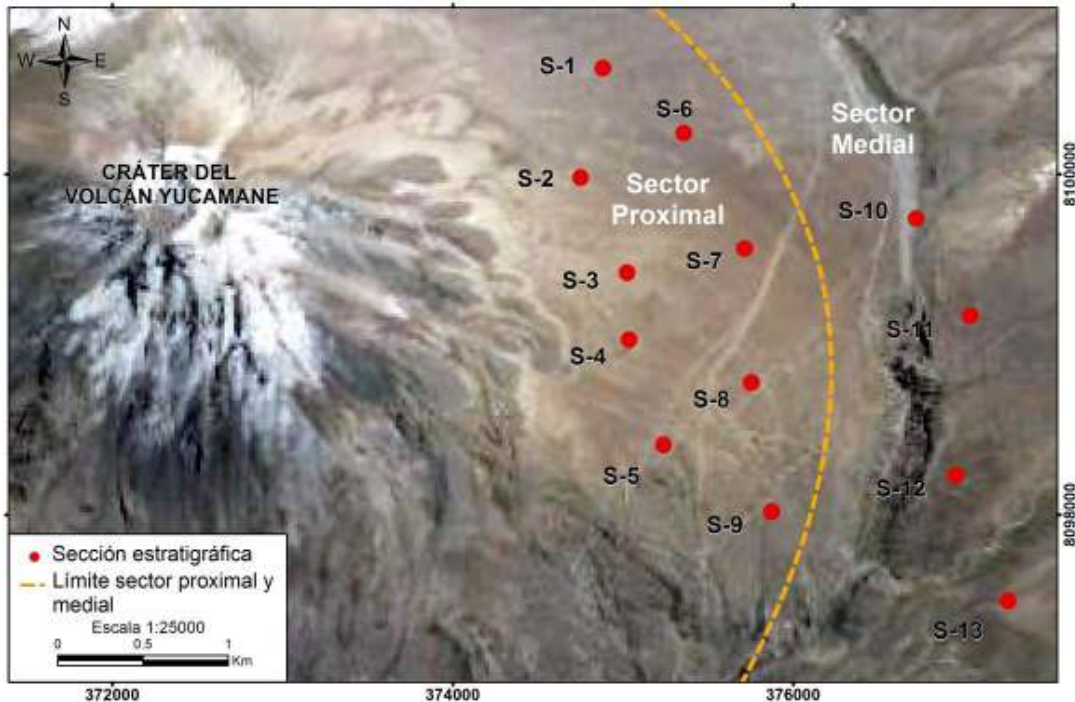


Figura 3.13: Ubicación de las secciones en el sector proximal y medial del depósito.

La descripción de todas las secciones del sector proximal y medial se encuentra en el Anexo A.

En el sector proximal se correlacionaron 9 secciones (S-1 a S-9) y en el sector medial se correlacionó 4 secciones (S-10 a S-13, figuras 3.14 y 3.15). En el sector proximal las unidades A, B y C son horizontes que por su amplia distribución y posición estratigráfica, permitió realizar las correlaciones estratigráficas con mayor certidumbre sin embargo en la zona medial, algunas unidades no se encuentran presentes (Unidad B).

La unidad A: Presenta una proporción de líticos muy relevantes, en la zona proximal en dirección sureste alcanza espesores hasta de 6 cm, sin embargo en la zona medial este nivel es muy delgado, alcanzando 1 cm de espesor.

La unidad B: Tiene el mayor espesor en el depósito y presenta un elevado contenido de líticos oxidados especialmente al tope de este nivel. En algunas secciones del sector medial la unidad B no se encuentra (S-10 y S-13), por lo que se infiere que el evento eruptivo que dio lugar a esta unidad se originó en el sector proximal y parte del sector medial.

La unidad C: Se encuentra en el sector proximal y medial del depósito alcanzando su mayor espesor en la S-2. En el sector proximal, la unidad C presenta balísticos de pómez (S-1, S-2, S-3, S-6) alcanzando distancias de 3 hasta 3.5 km pero en el sector medial los balísticos no están presentes, lo que quiere decir que las trayectorias balísticas solo se dieron en el sector proximal.

SECTOR PROXIMAL

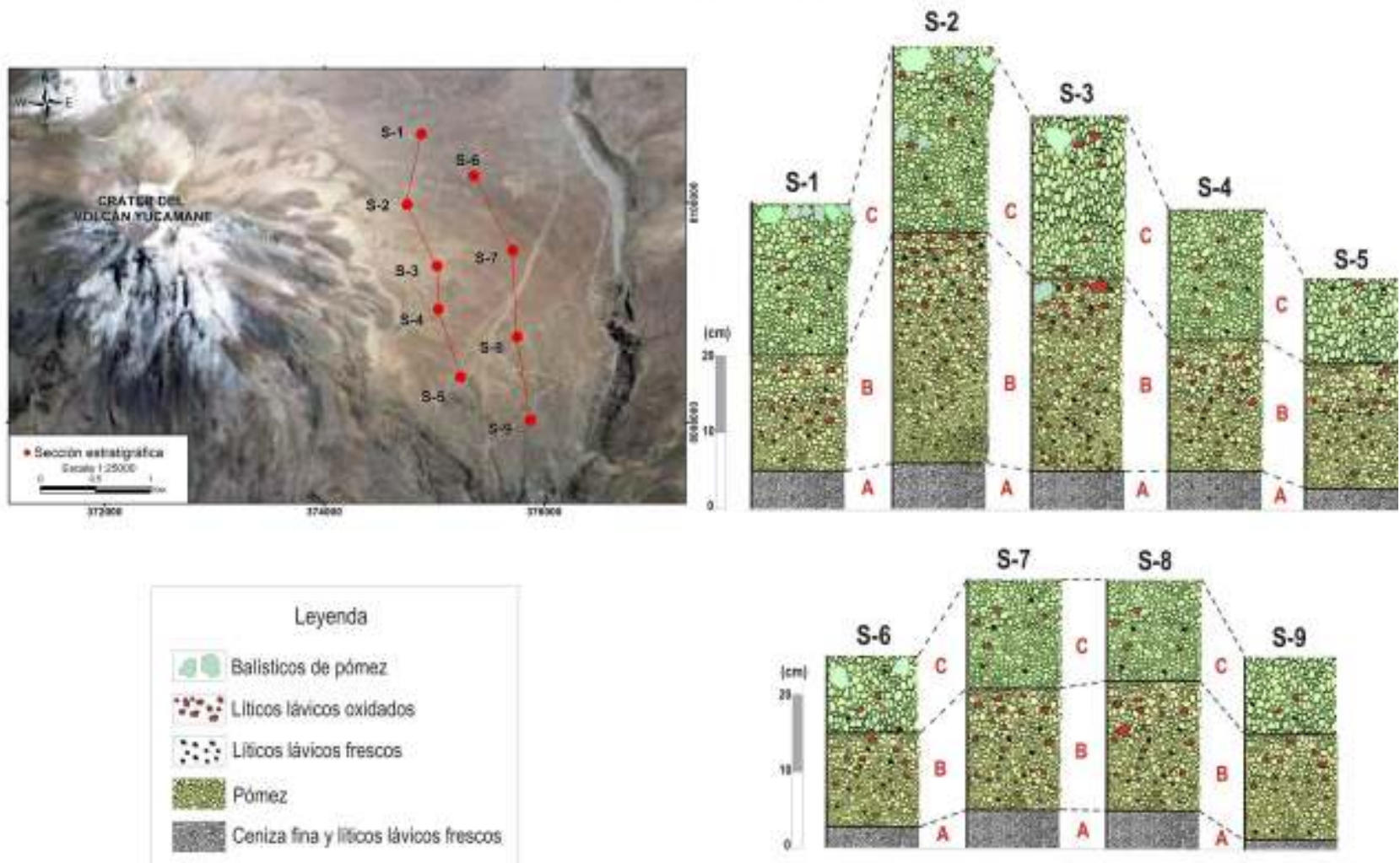


Figura 3.14: Correlación estratigráfica del depósito de caída de lapilli de pómez en el sector proximal.

SECTOR MEDIAL

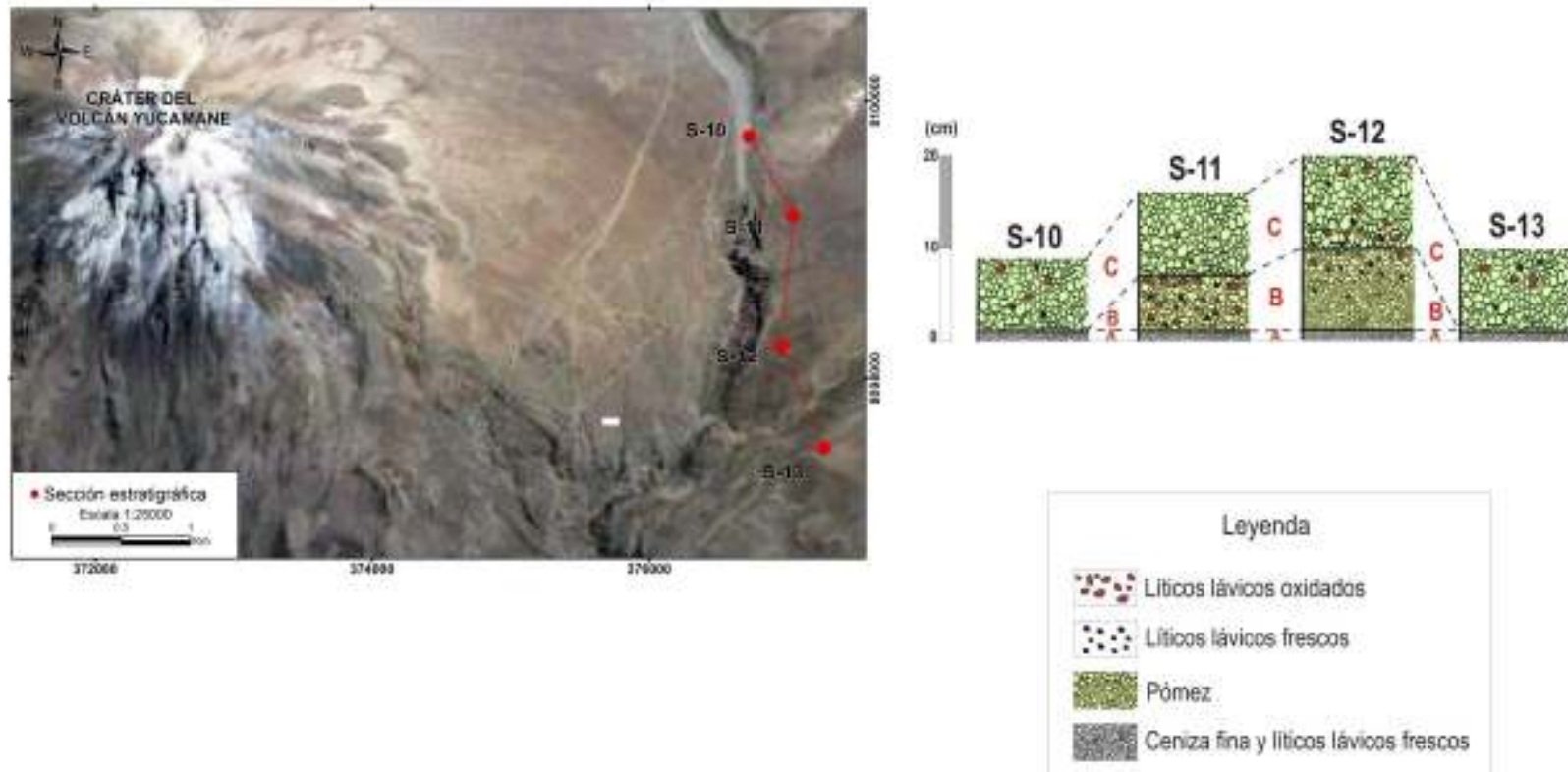


Figura 3.15: Correlación estratigráfica del depósito de caída de lapilli de pómez en el sector medial.

3.4 Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza

En el flanco NE del volcán (Figura 3.16) se ha identificado un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza, que se extiende hasta 5 km de distancia, con un área total de alrededor de $3 \times 10^6 \text{ m}^2$. El depósito tiene espesores comprendidos entre 15 cm y 6 m, los espesores son más importantes al alejarse del cráter debido a la disminución de la pendiente.

El depósito presenta gradación normal de líticos y gradación inversa de pómez acompañado por un cambio de coloración desde la base al tope del depósito (Figura 3.17 a y b). Está constituido por pómez (20-30 vol. %), líticos lávicos frescos (10-15 vol. %), lávicos oxidados (< 5 vol. %), líticos hidrotermalizados (<1 vol. %) y la matriz se encuentra entre 40-50 vol. %. Las pómez tienen 4-5 cm de diámetro, son de color gris claro a verdosas y tienen textura porfirítica con abundantes vesículas, tienen forma subredondeada a redondeada, y contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Se distinguen tres tipos de líticos: líticos lávicos frescos, líticos oxidados e hidrotermalizado. Los líticos lávicos frescos son de color gris oscuro, densos, afaníticos y algunos líticos tienen textura porfirítica, presentan por lo general formas angulosas a subangulosas. Los líticos oxidados se encuentran en menor proporción respecto a los demás componentes (<5%), son líticos densos de color rojizo a marrón, tienen forma subangulosa a subredondeada. Los líticos hidrotermalizados son escasos (<1%), son de tonos amarillentos a blanquecinos y son muy deleznable. La matriz del depósito es de grano fino a medio con minerales sueltos (plagioclasa, anfíboles y biotita). El depósito se encuentra mal sorteado.

Hacia el tope del depósito las pómez tienen diámetros desde 5 cm hasta bombas de 1 m. Las bombas son de color gris verdosas y presentan textura en corteza de pan (Figura 3.18 a) y coliflor (Figura 3.18 b), son vesiculadas y algo fibrosas, presentan una asociación mineral compuesta de plagioclasas, anfíbol y biotita.



Figura 3.16: Flanco oriental, vista al NE del volcán Yucamane, pampa cubierta por flujo piroclástico de pómez y ceniza rico en bombas.

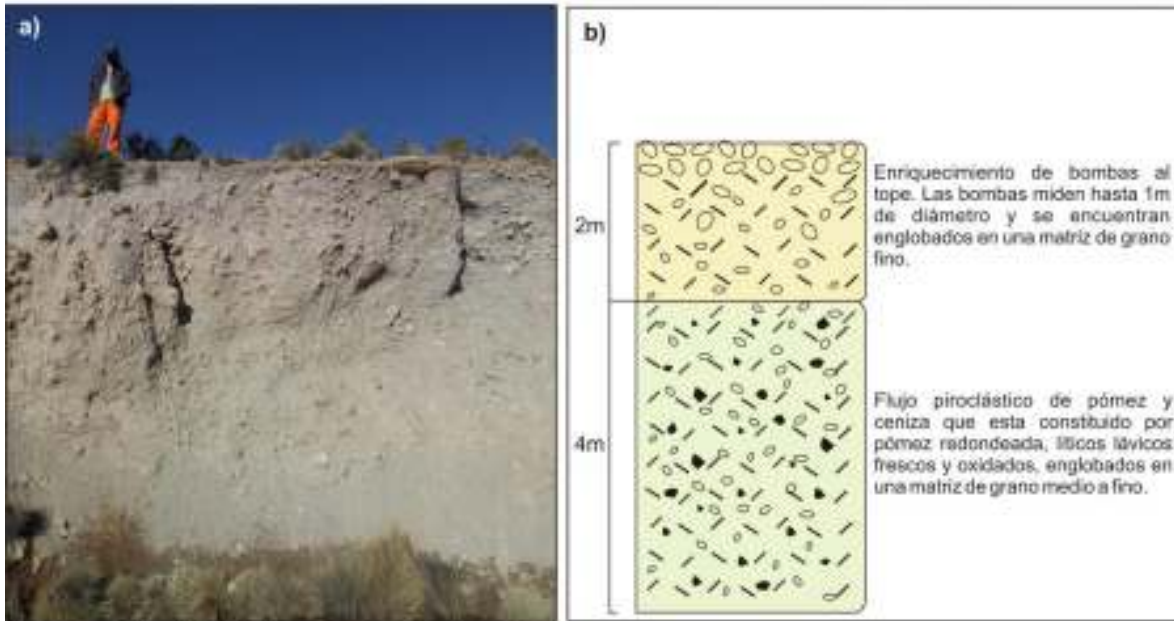


Figura 3.17: a) Foto tomada a 4.8 km al NE del cráter. b) Sección estratigráfica del depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza.

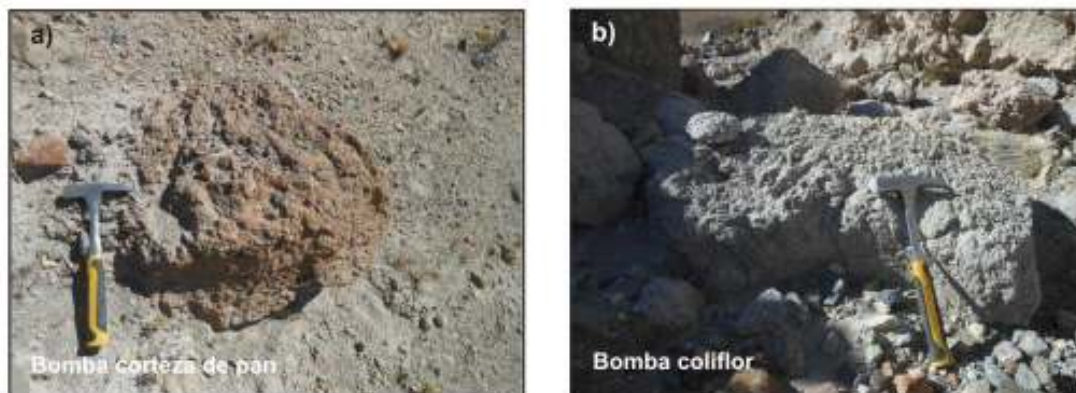


Figura 3.18: a) Bomba "corteza de pan", b) Bomba "coliflor" al tope del depósito.

El flujo piroclástico de pómez y ceniza también aflora en el flanco occidental del volcán Yucamane (Figura 3.19 a), cubriendo un área total de aproximadamente de $1.6 \times 10^6 \text{ m}^2$. La distancia máxima alcanzada por el flujo piroclástico en esta zona es de aproximadamente 3.3 km desde el viento, los espesores se encuentran entre 60 cm hasta 2 m. Está compuesto de líticos lávicos frescos 20-30 vol. %, líticos lávicos oxidados 20 vol. %, pómez 10-20 vol. % y matriz 20-30 vol. % (Figura 3.19 b y c). Otra característica es la presencia de bloques de lava de hasta 40 cm de diámetro, se encuentra en un 10 vol. %. La pómez es de color verdosa, pero predominan las de color amarillo debido al fuerte intemperismo. Los líticos lávicos son porfiríticos y contienen cristales de hasta 3mm de diámetro. El depósito presenta mal sorteo. La matriz es de grano medio

a grueso. En el tope del flujo solo están presentes algunas bombas de pómez dispersas en la superficie.

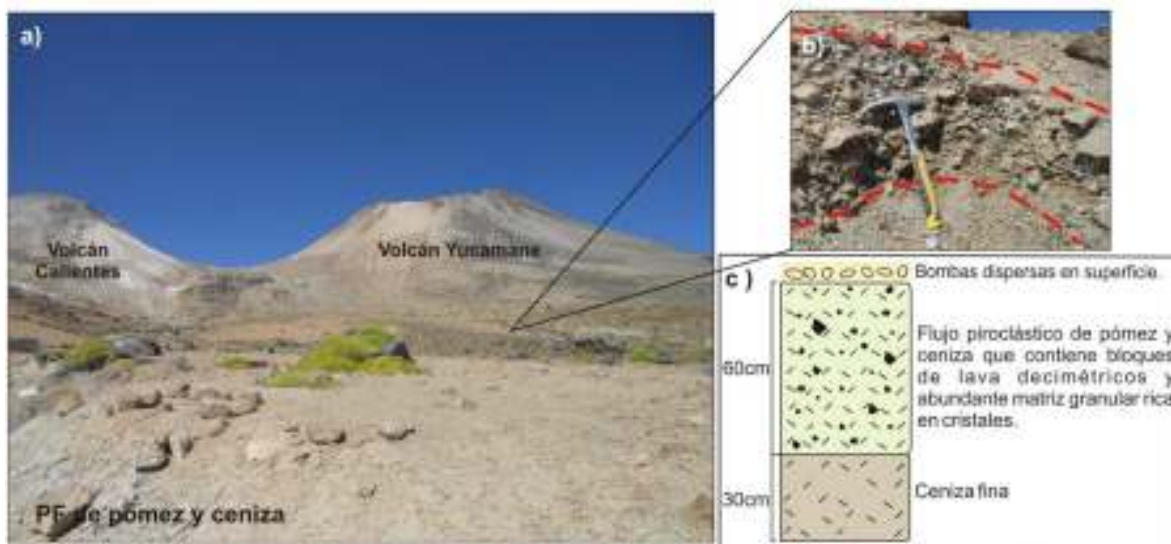


Figura 3.19: a) Flanco occidental del volcán Yucamane. b) Vista del flujo piroclástico de pómez en el flanco occidental. c) Sección estratigráfica del depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza en el flanco occidental.

CAPITULO IV

GRANULOMETRÍA Y COMPONENTES DEL DEPÓSITO DE CAÍDA DE LAPILLI DE PÓMEZ

4.1 Análisis granulométrico del depósito de caída de lapilli de pómez

El análisis granulométrico se realizó en el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI). Este análisis se realizó con el fin de caracterizar los depósitos y estudiar el modo de emplazamiento y sus relaciones con el dinamismo eruptivo, a partir de las características sedimentológicas del depósito. Los parámetros granulométricos empleados son los de Inman (1952) y Folk - Ward (1957), usados para depósitos sedimentarios.

4.1.1 Método utilizado para el análisis granulométrico

El cribado es el método granulométrico utilizado que consiste en hacer pasar una muestra de tefra a través de una serie de mallas o tamices con diferente diámetro de abertura que van desde 5ϕ (31.5 mm) hasta 5ϕ (0.032 mm). El análisis ha sido realizado en base a dieciséis muestras (Figura 4.1), cada una (previamente pesadas), diez muestras ubicadas en el sector proximal (Yu-Jv-30, Yu-Jv-51, Yu-Jv-53, Yu-Jv-58, Yu-Jv-31, Yu-Jv-55, Yu-Jv-20, Yu-Jv-08, Yu-Jv-21, Yu-Jv-28) y seis muestras ubicadas en el sector medial (Yu-Jv-45, Yu-Jv-12, Yu-Jv-63, Yu-Jv-66, Yu-Jv-65, Yu-Jv-46). No se utilizó equipo de rotación para no fracturar las tefras al momento del tamizado.

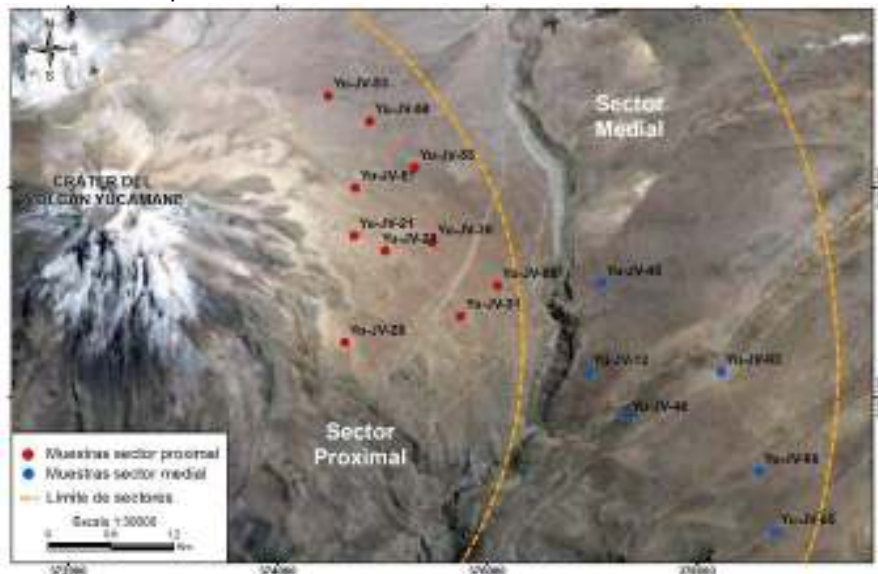


Figura 4.1: Ubicación de la muestras utilizadas para el estudio granulométrico.

Las proporciones retenidas en cada malla, representan un porcentaje del total de la muestra y la apertura del tamiz el tamaño de cada fracción. Se obtiene así, la relación porcentaje en peso versus diámetro de las partículas. Los resultados del tamizado se hallan en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3. A partir de estos datos se realiza el análisis estadístico.

SECTOR PROXIMAL																
Malla		Yu-Jv-30			Yu-Jv-51			Yu-Jv-53			Yu-Jv-58			Yu-Jv-31		
		Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.
(mm)	Phi (Ø)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)
31.5	-5	136.84	27.48	27.48	395.87	13.96	13.96	346.99	15.49	15.49	47.02	9.40	9.40	0.00	0.00	0.00
16	-4	183.90	36.93	64.41	1128.59	39.79	53.74	632.62	28.25	43.74	164.05	32.78	42.18	211.87	38.24	38.24
8	-3	93.74	18.83	83.24	746.26	26.31	80.05	585.89	26.16	69.90	125.58	25.10	67.28	184.83	33.36	71.59
4	-2	40.43	8.12	91.36	221.88	7.82	87.87	221.35	9.88	79.78	65.11	13.01	80.29	79.17	14.29	85.88
2	-1	18.73	3.76	95.12	132.44	4.67	92.54	132.35	5.91	85.69	41.44	8.28	88.57	39.69	7.16	93.05
1	0	13.22	2.65	97.77	106.32	3.75	96.29	111.84	4.99	90.68	26.56	5.31	93.88	19.32	3.49	96.53
0.5	1	7.23	1.45	99.22	90.62	3.19	99.48	95.41	4.26	94.94	21.96	4.39	98.27	14.24	2.57	99.10
0.25	2	2.91	0.58	99.81	13.93	0.49	99.97	75.29	3.36	98.31	6.82	1.36	99.63	4.03	0.73	99.83
0.125	3	0.75	0.15	99.96	0.64	0.02	99.99	33.46	1.49	99.80	1.60	0.32	99.95	0.85	0.15	99.98
0.063	4	0.20	0.04	100.00	0.17	0.01	100.00	3.42	0.15	99.95	0.26	0.05	100.00	0.09	0.02	100.00
0.032	5							1.08	0.05	100.00						

Tabla 4.1: Pesos parciales y porcentajes acumulados, para el análisis granulométrico del depósito de lapilli de pómez en el sector proximal.

SECTOR PROXIMAL																
Malla		Yu-Jv-55			Yu-Jv-20			Yu-Jv-08			Yu-Jv-21			Yu-Jv-28		
		Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.
(mm)	Phi (Ø)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)
31.5	-5	85.40	16.50	16.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.34	3.76	3.76
16	-4	120.70	23.32	39.81	144.88	21.76	21.76	202.48	25.14	25.14	119.29	20.92	20.92	134.81	22.67	26.43
8	-3	132.43	25.58	65.39	256.31	38.50	60.27	237.67	29.50	54.64	190.65	33.44	54.36	150.25	25.27	51.70
4	-2	85.59	16.53	81.93	134.76	20.24	80.51	172.02	21.35	75.99	129.00	22.62	76.98	110.77	18.63	70.33
2	-1	40.70	7.86	89.79	64.79	9.73	90.25	93.85	11.65	87.64	63.93	11.21	88.19	83.63	14.07	84.40
1	0	32.58	6.29	96.08	29.67	4.46	94.70	54.86	6.81	94.45	28.76	5.04	93.23	46.13	7.76	92.16
0.5	1	15.52	3.00	99.08	26.56	3.99	98.69	35.86	4.45	98.91	27.69	4.86	98.09	32.03	5.39	97.55
0.25	2	3.83	0.74	99.82	7.09	1.07	99.76	6.09	0.76	99.66	4.99	0.88	98.97	11.25	1.89	99.44
0.125	3	0.86	0.17	99.98	1.35	0.20	99.96	2.28	0.28	99.94	3.96	0.69	99.66	2.79	0.47	99.91
0.063	4	0.08	0.02	100.00	0.26	0.04	100.00	0.45	0.06	100.00	1.52	0.27	99.93	0.48	0.08	99.99
0.032	5										0.42	0.07	100.00	0.07	0.01	100.00

Tabla 4.2: Pesos parciales y porcentajes acumulados, para el análisis granulométrico del depósito de lapilli de pómez en el sector proximal.

SECTOR MEDIAL																			
Malla		Yu-Jv-45			Yu-Jv-12			Yu-Jv-63			Yu-Jv-66			Yu-Jv-65			Yu-Jv-46		
		Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.
(mm)	Phi (Ø)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)
31.5	-5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	-4	115.5	25.4	25.4	68.8	13.3	13.3	129.2	11.8	11.8	100.2	9.9	9.9	90.4	9.6	9.6	63.4	11.0	11.0
8	-3	140.3	30.9	56.3	155.8	30.1	43.3	313.9	28.6	40.4	295.3	29.1	39.0	272.8	29.1	38.7	147.5	25.6	36.6
4	-2	100.2	22.1	78.4	135.7	26.2	69.5	298.2	27.2	67.6	278.1	27.4	66.3	258.2	27.5	66.2	164.6	28.6	65.2
2	-1	50.8	11.2	89.6	84.0	16.2	85.7	207.3	18.9	86.6	187.4	18.5	84.8	180.1	19.2	85.4	95.8	16.6	81.8
1	0	20.7	4.5	94.1	35.3	6.8	92.5	87.3	8.0	94.5	77.2	7.6	92.4	86.2	9.2	94.6	43.0	7.5	89.3
0.5	1	15.9	3.5	97.6	23.2	4.5	97.0	49.3	4.5	99.0	59.1	5.8	98.2	40.7	4.3	98.9	22.4	3.9	93.2
0.25	2	6.2	1.4	99.0	11.4	2.2	99.2	9.0	0.8	99.9	15.5	1.5	99.8	8.7	0.9	99.8	16.7	2.9	96.1
0.125	3	2.3	0.5	99.5	3.3	0.6	99.8	1.3	0.1	100.0	2.1	0.2	100.0	1.1	0.1	100.0	13.3	2.3	98.4
0.063	4	2.1	0.5	100.0	0.8	0.1	100.0	0.3	0.0	100.0	0.3	0.0	100.0	0.4	0.0	100.0	8.6	1.5	99.9
0.032	5	0.1	0.0	100.0	0.2	0.0	100.0										0.5	0.1	100.0

Tabla 4.3: Pesos parciales y porcentajes acumulados, para el análisis granulométrico del depósito de lapilli de pómez en el sector medial.

4.1.2 Histogramas

Para el análisis estadístico previamente se convierten los diámetros de las partículas expresados en milímetros (mm) a unidades phi; la escala phi fue definida por Krumbein en 1934 como el logaritmo negativo de base 2 del tamaño de grano en milímetros:

$\Phi = -\log_2 N$, donde: N = tamaño de grano en mm ó la apertura de cada malla en mm.

Los datos obtenidos en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 han sido representados gráficamente en histogramas para visualizar de una manera simple la distribución granulométrica, esto se realizó utilizando una aplicación SFT Kware (Figura 4.2 y 4.3) de acuerdo con la teoría de fragmentación y transporte secuencial (Sequential Fragmentation Theory, 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 de los eventos eruptivos a partir de la granulometría (Wohletz et al., 1989). En las abscisas van los diámetros de las partículas expresados en unidades phi (Φ); en las ordenadas van los pesos expresados en porcentajes (%).

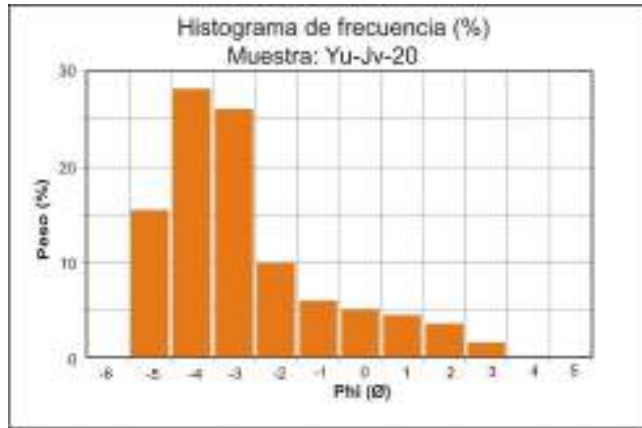


Figura 4.2: Histograma de frecuencias (Folk e Inman).

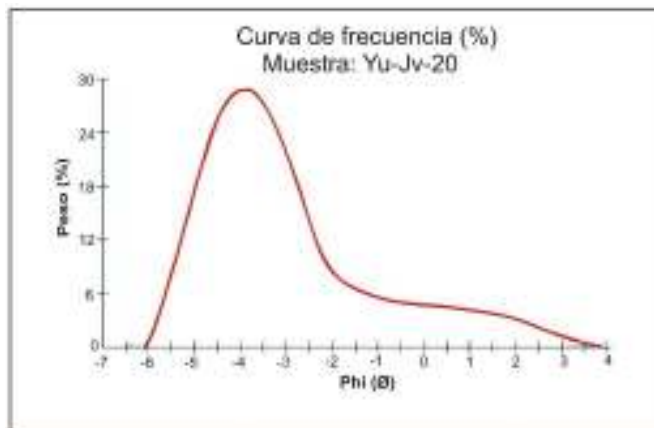


Figura 4.3: Curva de frecuencias (Folk e Inman).

4.1.3 Parámetros estadísticos:

Después de obtener los histogramas de frecuencia con sus respectivas curvas, se obtuvo también parámetros estadísticos de distribución como la mediana (Md), media (Mz), desviación estándar ($\sigma\emptyset$), asimetría (SkI) y kurtosis (KG).

A continuación se presenta una descripción de los parámetros estadísticos:

Mediana (Md). Según Inman (1952), es el diámetro correspondiente al 50% de la curva acumulativa, el punto medio de la distribución o el tamaño de grano para el que el 50% de la muestra es más fina y el 50 % más gruesa (Figura 4.4).

$$Md \emptyset = \emptyset 50.$$

Media (Mz). Según Folk y Ward (1957), es el tamaño promedio-aritmético, de la distribución (Figura 4.4). Para el cálculo de la media se utiliza la siguiente fórmula: $Mz = (\emptyset 16 + \emptyset 50 + \emptyset 84) / 3$

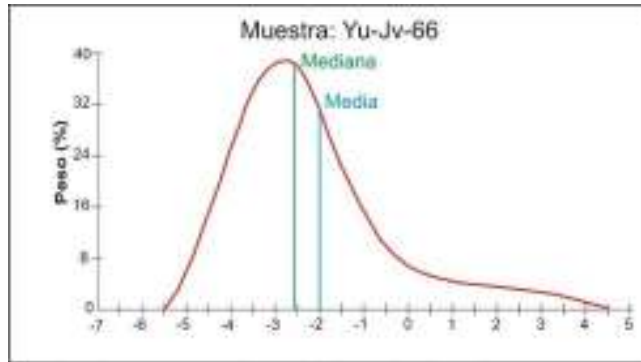


Figura 4.4: Mediana y Media en la muestra Yu-JV-66.

Desviación estándar gráfica ($\sigma\phi$). Definido según Inman (1952), corresponde al coeficiente de la dispersión o sorteo, refleja la variación del tamaño de grano. Su valor se relaciona a la medida de la distribución, cuanto mayor es este coeficiente, mayor es la gama de tamaños de grano; un sedimento con $\sigma\phi$ pequeño, se dice estar bien sorteado, mientras un sedimento con un $\sigma\phi$ grande está mal sorteado. Para el cálculo de la desviación estándar se utiliza la siguiente fórmula:

$$\sigma\phi = (\phi_{84} - \phi_{16}) / 2.$$

Los grados de sorteo en base al valor de $\sigma\phi$ definido según Inman (1952) son los siguientes:

Clasificación $\sigma\phi$	Depósitos piroclásticos
0-1	muy bien sorteado
1-2	bien sorteado
2-4	mal sorteado
>4	muy mal sorteado

Asimetría (SkI). Este parámetro mide la desigualdad de la curva de frecuencia, la cual se establece graficando tamaño de grano (phi) y frecuencia de ocurrencia en la muestra. Un valor positivo indica el desvanecimiento de la curva a la derecha de la media con un exceso de partículas finas, un valor negativo indica un desvanecimiento de la curva a la izquierda de la media con un exceso de gruesos (Figura 4.5 a y b), se interpreta con base en los siguientes intervalos:

Clasificación	Asimetría
-1,00 a -0,31	Asimetría muy negativa
-0,30 a -0,11	Asimetría negativa
-0,10 a 0,09	Cercanamente simétrica
0,10 a 0,29	Asimetría positiva
0,30 a 0,99	Asimetría muy positiva

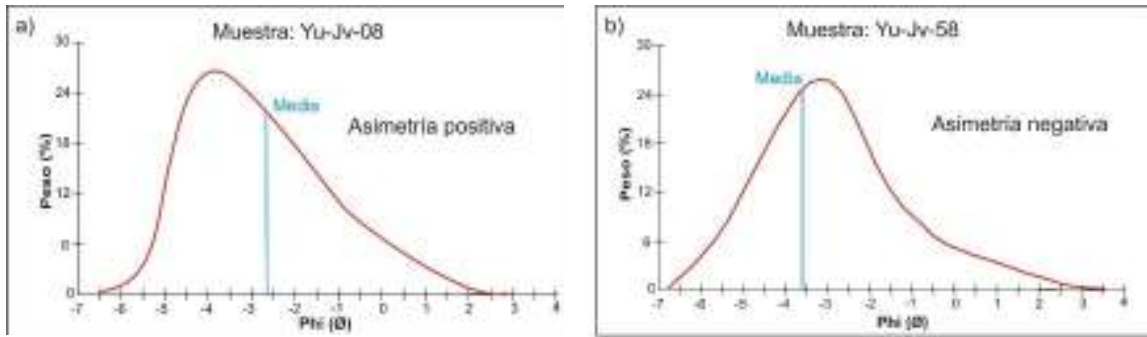


Figura 4.5: a) Asimetría positiva en la muestra Yu-Jv-08, b) Asimetría negativa en la muestra Yu-Jv-58.

Kurtosis (KG). Corresponde a la medida de la desviación simétrica de una curva normal. Se establece haciendo una comparación entre el calibrado en las colas de la distribución y el calibrado en la porción central de la misma. Las curvas se denominan como: Leptocúrticas o puntiaguda si la porción central de la curva es mejor seleccionada, si ocurre lo contrario la curva es platicúrtica o achatada. Una kurtosis con valor de 1 indica que la curva tiene distribución log-normal; una aproximación a esta distribución da como resultado una curva mesocúrtica (Figura 4.6).

$$K_g = (\Phi 5 - \Phi 95) / 2,44 (\Phi 75 - \Phi 25)$$

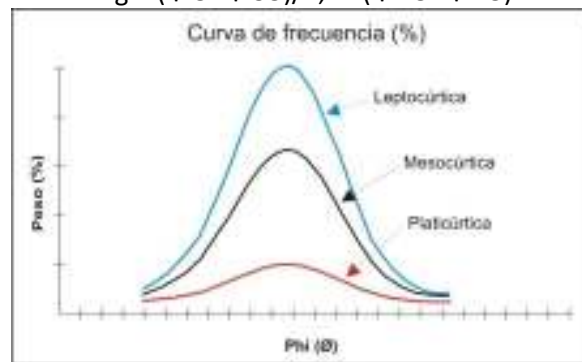


Figura 4.6: Tipos de kurtosis (KG) en las curvas de frecuencia.

Los siguientes valores son los descriptores propuestos por Folk and Ward (1957) en Pierson and Scott para los diferentes grados de agudeza.

Clasificación	Kurtosis
<0,67	Muy platicúrtica
0,67 – 0,89	Platicúrtica
0,90- 1,09	Mesocúrtica
1,10 – 1,49	Leptocúrtica
1,50 – 2,99	Muy leptocúrtica
>3,00	Extremadamente leptocúrtica

4.1.4 Resultados de los parámetros estadísticos en el sector proximal

Mediante los resultados de los parámetros estadísticos obtenidos (Tabla 4.4) se puede evaluar las características de generación y emplazamiento de las muestras. Todas las gráficas de los histogramas y curvas de frecuencia se muestran en el anexo B.

MUESTRA	MEDIANA (Md)	MEDIA (Mz)	DESVIACIÓN ESTANDAR ($\sigma\phi$)	ASIMETRÍA (Skl)	KURTOSIS (K _G)
Yu-Jv-21	-3.99	-4.45	1.88	-0.08	1.31
Yu-Jv-51	-3.87	-4.15	1.73	-0.19	2.34
Yu-Jv-20	-3.70	-3.85	1.65	-0.09	1.23
Yu-Jv-30	-3.66	-3.75	1.60	-0.12	1.15
Yu-Jv-55	-3.60	-3.75	1.50	-0.04	1.83
Yu-Jv-58	-3.33	-3.70	1.85	-0.27	1.02
Yu-Jv-53	-3.00	-3.35	1.36	0.09	1.45
Yu-Jv-28	-2.99	-3.20	1.39	-0.25	1.27
Yu-Jv-31	-2.89	-3.20	1.35	-0.15	1.15
Yu-Jv-08	-3.10	-2.67	1.80	0.18	0.96

Tabla 4.4: Parámetros estadísticos en el sector proximal.

A continuación se describen algunas muestras que representan las tendencias generales de los parámetros estadísticos para el sector proximal.

La muestra **Yu-Jv-21** presenta una curva de frecuencia con tendencia unimodal (Figura 4.7 a y b), con un promedio de grano $Mz = -3.99$ phi, una desviación estándar de 1.88 marcando así una buena selección. La curva es cercanamente simétrica $Skl = -0.08$; lo que representa un predominio de tamaño grueso, con una angulosidad gráfica de 1.31 (leptocúrtica), indicando una buena selección.

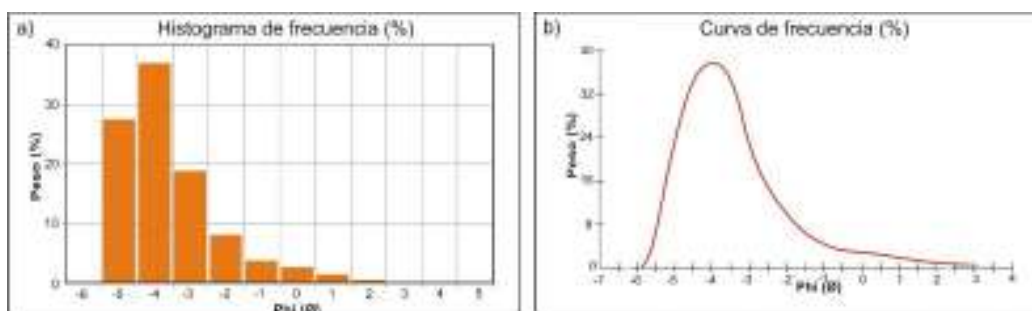


Figura 4.7: a) Histograma de frecuencia en la muestra Yu-Jv-21, b) Curva de frecuencia en la muestra Yu-Jv-21.

La muestra **Yu-Jv-58** caracterizado granulométricamente por presentar una curva con tendencia unimodal (Figura 4.8 a y b), con un promedio de grano $Mz = -3.33$ phi, una desviación estándar de 1.85 marcando así una buena selección, la curva es negativa asimétrica $Skl = -0.27$, lo que representa un predominio de tamaño grueso, con una angulosidad gráfica de 1.02 (mesocúrtica), indicando ligera dispersión de los tamaños finos.

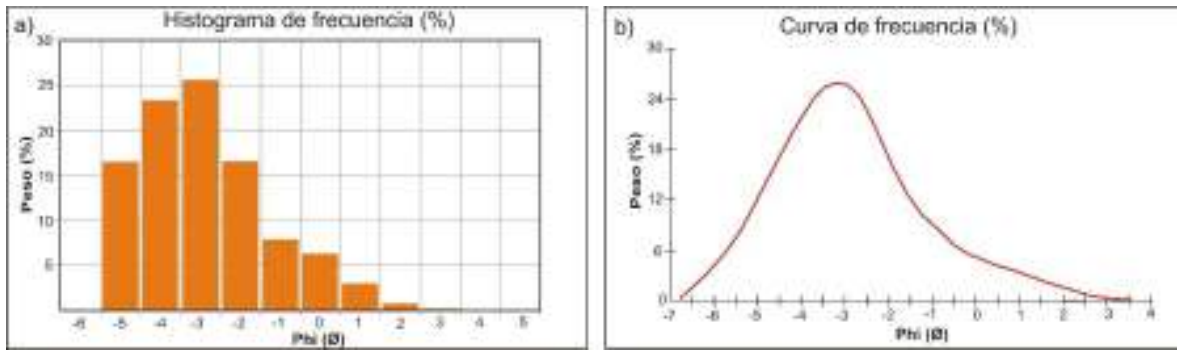


Figura 4.8: a) Histograma de frecuencia en la muestra Yu-Jv-58, b) Curva de frecuencia en la muestra Yu-Jv-58.

Por último la muestra **Yu-Jv-08** es representada por una curva de frecuencia con tendencia unimodal (Figura 4.9 a y b), parámetros con un promedio de grano $Mz = -2.67\phi$, una desviación estándar de 1.80 indicando una buena selección, la curva es positiva asimétrica $SkI = 0.18$, lo que representa un predominio de tamaño fino, con una angulosidad gráfica de 0.96 (mesocúrtica) (ver anexo B).

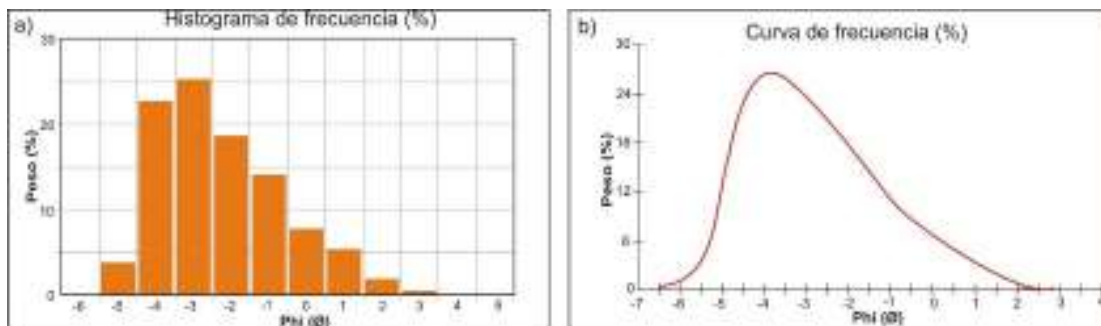


Figura 4.9: a) Histograma de frecuencia en la muestra Yu-Jv-08, b) Curva de frecuencia en la muestra Yu-Jv-08.

4.1.5 Resultados de los parámetros estadísticos en el sector medial

Los resultados de los parámetros estadísticos en el sector medial se muestran en la tabla 4.5

MUESTRA	MEDIANA (Md)	MEDIA (Mz)	DESVIACIÓN ESTANDAR ($\sigma\phi$)	ASIMETRÍA (SkI)	KURTOSIS (KG)
Yu-Jv-12	-2.93	-2.57	1.50	0.08	1.61
Yu-Jv-46	-2.80	-2.30	1.43	0.14	1.15
Yu-Jv-45	-2.70	-2.35	1.40	0.19	1.13
Yu-Jv-63	-2.65	-2.10	1.38	0.27	1.39
Yu-Jv-66	-2.65	-2.00	1.30	0.28	1.40
Yu-Jv-65	-2.60	-2.00	1.20	0.10	1.25

Tabla 4.5: Parámetros estadísticos en el sector medial.

La muestra **Yu-Jv-12** presenta una curva de frecuencia con tendencia unimodal (Figura 4.10 a y b), con un promedio de grano $Mz = -2.57\phi$, una desviación estándar de 1.50 marcando así una buena selección. La curva es cercanamente simétrica $Sk = 0.08$; lo que representa un predominio de tamaño fino, con una angulosidad gráfica de 1.61 (muy leptocúrtica), indicando una muy buena selección.

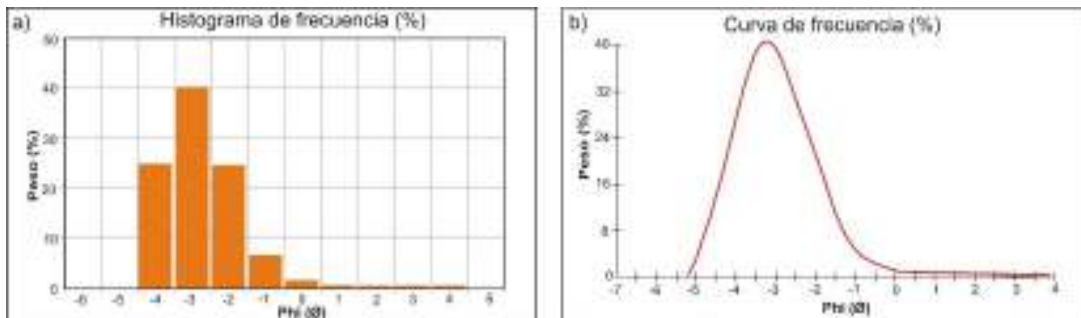


Figura 4.10: a) Histograma de frecuencia en la muestra Yu-Jv-12, b) Curva de frecuencia en la muestra Yu-Jv-12.

La muestra **Yu-Jv-66** presenta una curva de frecuencia con tendencia unimodal (Figura 4.11 a y b), con un promedio de grano $Mz = -2.00\phi$, una desviación estándar de 1.30 marcando así una buena selección. La curva es positiva asimétrica $Sk = 0.28$; lo que representa un predominio de tamaño fino, con una angulosidad gráfica de 1.40 (leptocúrtica), indicando una muy buena selección.

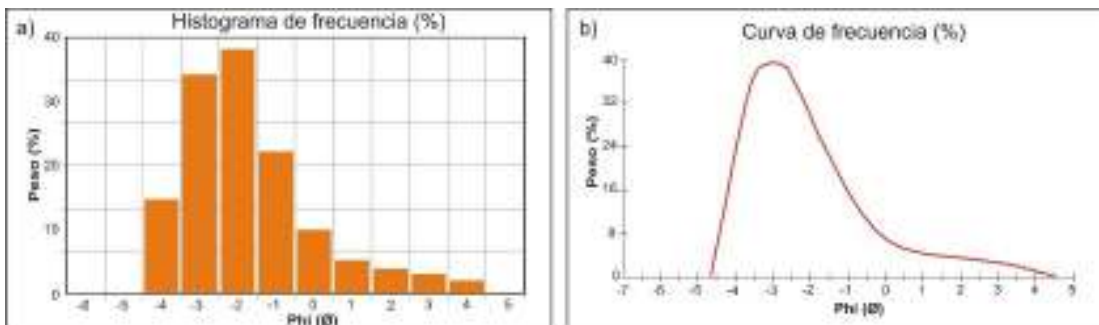


Figura 4.11: a) Histograma de frecuencia en la muestra Yu-Jv-66, b) Curva de frecuencia en la muestra Yu-Jv-66.

4.1.6 Interpretación de los parámetros estadísticos en el sector proximal y medial

En el depósito de caída de lapilli de pómez la distribución del tamaño de grano promedio (Mz) del depósito, varía de -4.45 a -2.67ϕ en zonas proximales y de -2.57 a -2.00ϕ en áreas mediales. La mediana (Md) en áreas proximales varía de -3.99 a -2.89ϕ y en áreas mediales su valor va de -2.93 a -2.60ϕ . Se nota una mejora de la selección de los depósitos de caída en las zonas mediales. Esto se debe a la influencia del viento con respecto al grano fino, a medida que aumenta la distancia al volcán.

El depósito de caída de lapilli de pómez está bien sorteado en todos los sectores y este va mejorando ligeramente, conforme nos alejamos del cráter. En áreas proximales el $\sigma\phi$ varía de -1.88 a -1.35 ϕ y en áreas mediales varía de -1.50 a -1.20 ϕ .

En el sector proximal las curvas de frecuencia presentan asimetría (SkI) negativa indicando un predominio de tamaño grueso, sin embargo la muestra Yu-Jv-08 presenta asimetría positiva debido a se encuentra próxima al sector medial. El sector medial la asimetría es positiva indicando predominio de tamaño fino.

La Kurtosis indica que en el sector proximal las curvas de frecuencia son leptocúrticas a mesocúrtica es decir hay buena sección pero con cierta dispersión de finos. En el sector medial la angulosidad gráfica es leptocúrtica a muy leptocúrtica indicando una mejor selección del depósito.

4.1.7 Diagrama de Walker

Walker (1971) hizo un reconocimiento de la combinación del tamaño de las partículas medidas así como la mediana ($Md \phi$) versus el índice de sorteo ($\sigma\phi$) usados para diferenciar los depósitos de caída de los flujos piroclásticos.

Los resultados del análisis estadístico (parámetros estadísticos) del depósito de lapilli de pómez se plotearon en diagrama de Walker (1971) (Figura 4.12), el mismo sugiere que las muestras tomadas caen en el campo de los depósitos de caída, el depósito se encuentra bien sorteado, los índices de sorteo ($\sigma\phi$) y las medianas (Md) mejoran hacia las zonas distales en dirección del viento.

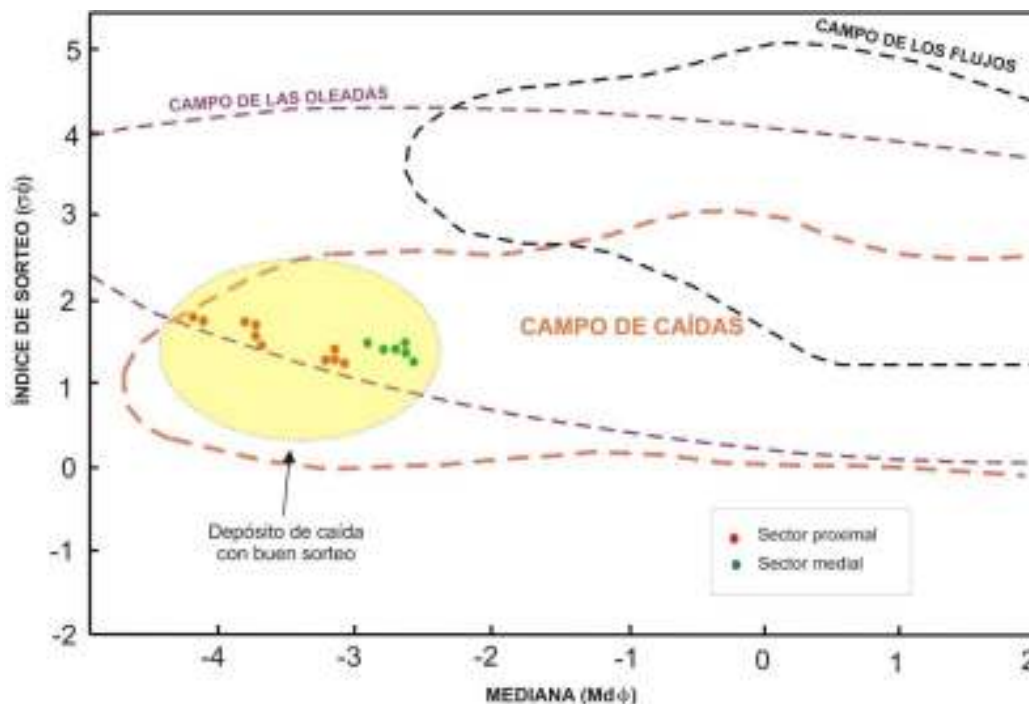


Figura 4.12: Características granulométricas del depósito de caída de pómez, ploteadas en el diagrama de Walker (1971). En la abscisa la Mediana ($Md \phi$) expresado en unidades phi (tamaño de grano que corresponde al 50% de la población). En el eje de la ordenada el índice de sorteo ($\sigma\phi$) en unidades phi (según Inman, 1952).

4.2 Análisis de los componentes litológicos

Las muestras analizadas granulométricamente en el punto 4.1 también fueron utilizadas para realizar el análisis de los componentes litológicos. Para el conteo de componentes se seleccionó una fracción grande (8mm), mediana (2 mm) y una de menor diámetro (0.5 mm). Se escogió estas tres fracciones para poder determinar la variación de los componentes litológicos en función del tamaño de grano tanto para el sector proximal como para el sector medial del depósito.

Cada muestra fue distribuida como un círculo sobre una superficie plana, y cuidadosamente se homogenizó mediante la mezcla de los granos con una espátula delgada desde el borde hasta el centro. Luego se aisló la mitad del material en un semicírculo para comenzar el conteo de partículas desde su centro hasta su borde. El conteo se realizó en forma manual para las fracciones de los tamaños 8 y 2 mm, se utilizó un microscopio binocular para la fracción 0.6 mm.

En todos los afloramientos se han reconocido principalmente 3 componentes: pómez, líticos y cristales.

A.- PÓMEZ: Las pómez del volcán Yucamane son de textura porfirítica, de color gris verdoso, muy vesiculadas y de baja densidad. (Figura 4.13 a y b).

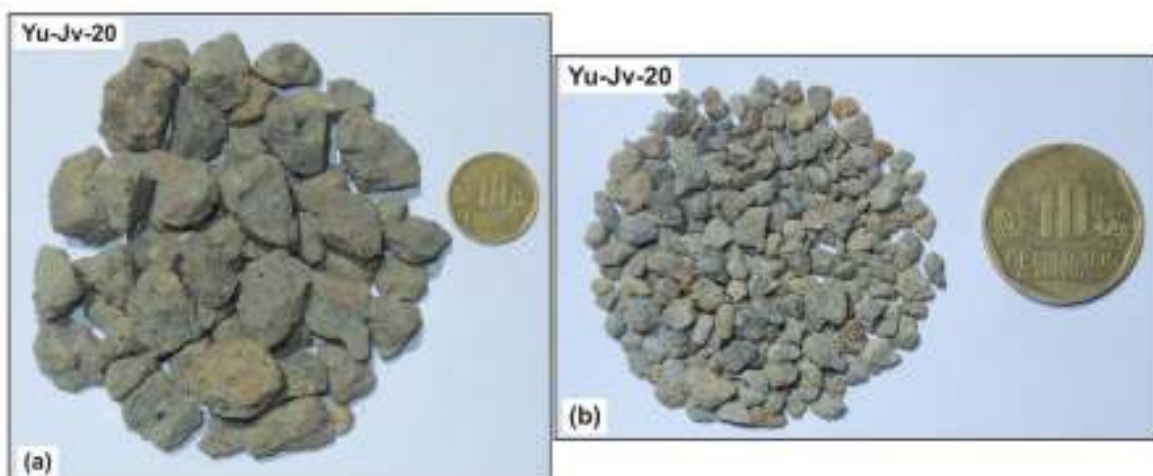


Figura 4.13: a) Pómez de la fracción 8 mm (muestra Yu-Jv-20); b) Pómez de la fracción 2 mm (muestra Yu-Jv-20).

B.-LÍTICOS: Se han reconocido tres tipos de líticos, los lávicos frescos, oxidados e hidrotermalizados (Figura 4.14 a, b y c). Estos líticos son fragmentos que provienen de las rocas que formaron el cono volcánico y durante la erupción estos han sido arrancados del conducto.



Figura 4.14: Líticos de la fracción 2 mm (muestra Yu-Jv-51). A) Líticos lávicos frescos; b) Líticos lávicos oxidados; c) Líticos hidrotermalizados.

C.-CRISTALES: Los cristales se encuentran libres debido a la intensa fragmentación del magma durante la erupción explosiva. Se identificaron a los cristales en la fracción 2 mm, pero están mayormente presentes en la fracción 0.5 mm. Se pudo diferenciar dos grupos de cristales: opacos y translúcidos (Figura 4.15).

Entre los cristales opacos distinguimos al anfíbol y la biotita. El anfíbol es de color negro, alargado y euhedral, mientras que la biotita se presenta en escamas diseminadas de color negro y de forma euhedral a subhedral. Esporádicamente se ha encontrado piroxenos.

Los cristales translúcidos son las plagioclasas que tienen formas prismáticas a tabulares y los fragmentos de vidrio que casi siempre son amorfos y brillosos.

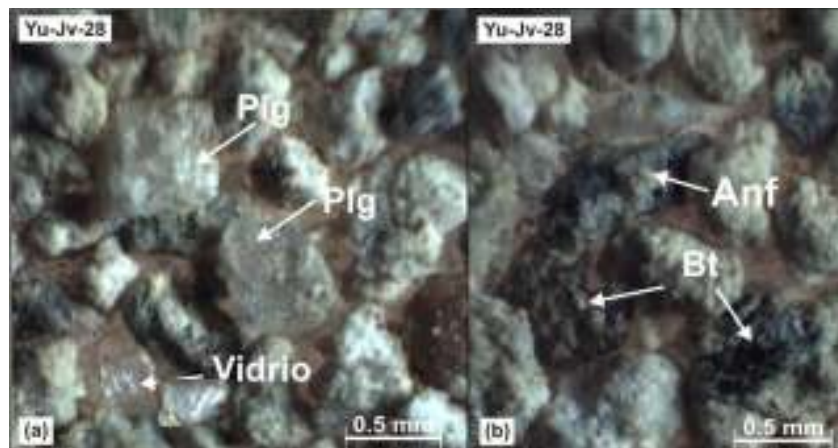


Figura 4.15: Cristales de la fracción 0.5 mm (muestra Yu-Jv-28). A) Cristales de plagioclasa y vidrio b) cristales de anfíbol y biotita.

4.2.1 Características de los componentes litológicos en el sector proximal

En la **malla 8 mm** se pudo identificar a las pómez y los líticos frescos, oxidados e hidrotermalizados. La pómez es el componente más abundante que está en alrededor de 52% (Tabla 4.6, Figura 4.16), seguido de los líticos lávicos oxidados 39%, mientras que los líticos lávicos frescos solo están en 7% y los hidrotermalizados en 2%.

MALLA	COMPONENTE	Yu-Jv-30		Yu-Jv-51		Yu-Jv-58		Yu-Jv-31		Yu-Jv-55		Yu-Jv-20		Yu-Jv-08		Yu-Jv-21		Yu-Jv-28		PROMEDIO
		N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	
8 mm		70	49	83	54	69	58	86	53	65	53	100	49	100	52	96	55	59	49	52
	Pómez	70	49	83	54	69	58	86	53	65	53	100	49	100	52	96	55	59	49	52
	L. Lávicos frescos	12	8	7	5	7	6	12	7	8	7	14	7	15	8	10	6	8	7	7
	L. Lávicos oxidados	58	41	61	40	40	34	60	38	47	39	86	42	71	37	65	37	49	40	39
	L. Lávicos hidrotermalizados	3	2	3	2	2	2	4	2	2	2	5	2	5	3	4	2	5	4	2
	Total	143	100	154	100	118	100	162	100	122	100	205	100	191	100	175	100	121	100	100

Tabla 4.6: Resultados del conteo litológico en la fracción 8 mm del sector proximal, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.16

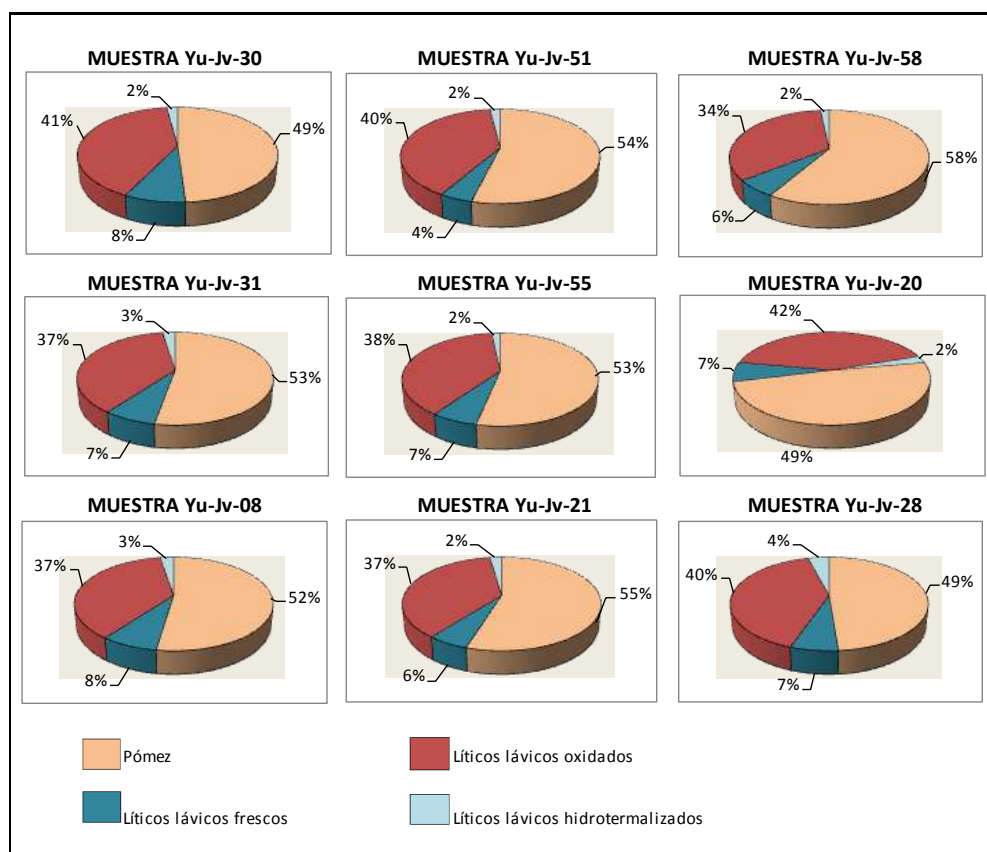


Figura 4.16: Composición porcentual de fragmentos en el sector proximal para la malla 8mm.

En la **malla 2 mm** (Tabla 4.7, Figura 4.17): En esta malla el contenido de pómez es menos abundante que en la malla 8 mm. La pómez se encuentra en un promedio de 46%, los líticos lávicos oxidados están en 40%; este es el máximo valor del conteo para los líticos oxidados en ambos sectores y de todas las fracciones. Los líticos lávicos frescos se encuentran en un 6%, estos líticos disminuyen en la malla 2mm del sector proximal. Los hidrotermalizados tienen 4%. Los cristales translucidos predominan sobre los opacos, los cristales translucidos tienen 3% y los opacos 2%. A partir de este diámetro de malla se hacen presentes los cristales.

MALLA	COMPONENTE	Yu-Jv-30		Yu-Jv-51		Yu-Jv-58		Yu-Jv-31		Yu-Jv-55		Yu-Jv-20		Yu-Jv-08		Yu-Jv-21		Yu-Jv-28		PROMEDIO
		N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	
2 mm	Pómez	296	50	245	43	276	51	290	46	250	44	223	40	276	52	301	45	280	43	46
	L. Lávicos frescos	30	5	46	8	16	3	35	6	28	5	38	7	31	6	35	5	41	6	6
	L. Lávicos oxidados	213	36	228	40	223	41	261	41	231	41	260	46	183	34	279	42	282	43	40
	L. Lávicos hidrotermalizados	32	5	22	4	5	1	9	1	15	3	17	3	21	4	32	5	40	6	4
	Cristales Opacos	10	2	6	1	11	2	15	2	12	2	10	2	4	1	8	1	4	1	2
	Cristales Translucidos	14	2	23	4	15	3	25	4	28	5	14	2	16	3	17	3	11	2	3
	Total	595	100	570	100	546	100	635	100	564	100	562	100	531	100	672	100	658	100	100

Tabla 4.7: Resultados del conteo litológico en la fracción 2 mm del sector proximal, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.17

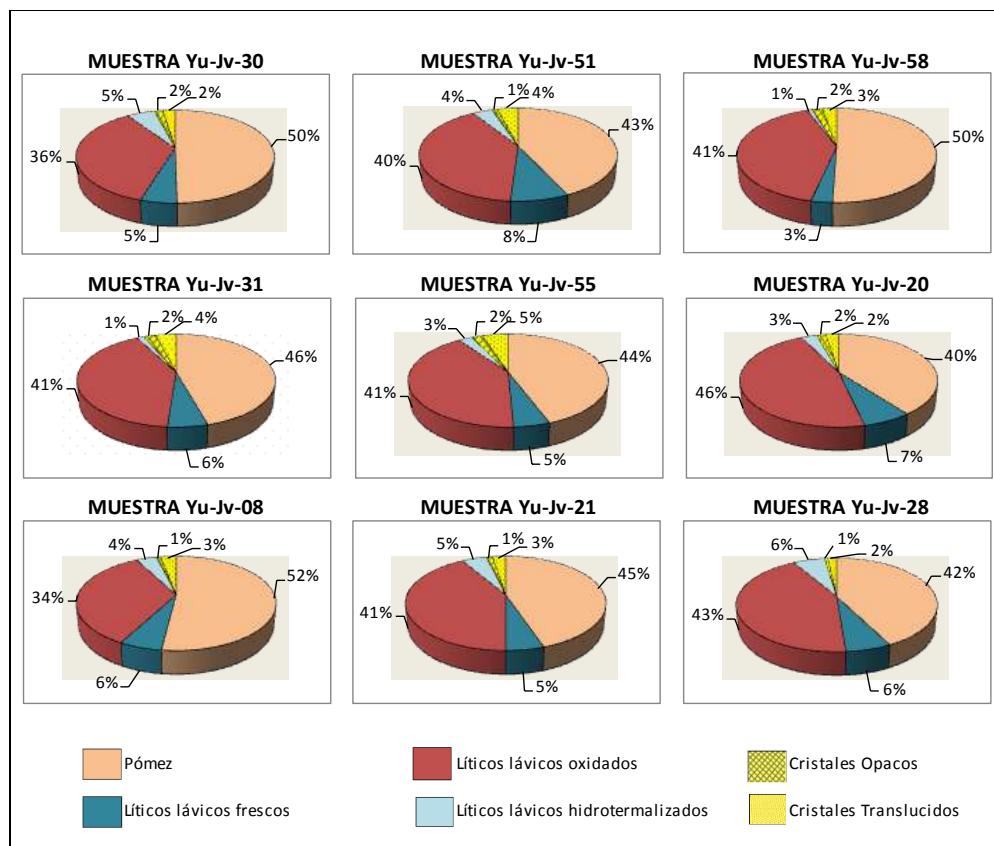


Figura 4.17: Composición porcentual de los componentes en el sector proximal, malla 2 mm.

En la **malla de 0.5 mm** (Tabla 4.8, Figura 4.18): El componente más abundante en esta fracción corresponde a los cristales. Los fragmentos translúcidos (plagioclasa y vidrio) alcanzan el 49%, seguidos de los cristales opacos con 11%. La pómez tienen 19%, es menos abundante que en la malla 8 mm y 2 mm. Los líticos lávicos frescos, oxidados e hidrotermalizados se encuentran en bajo porcentaje. Los líticos lávicos oxidados tienen 10% mientras que los líticos lávicos frescos tienen 8% y los lávicos hidrotermalizados solo están en un 3%.

MALLA	COMPONENTE	Yu-Jv-30		Yu-Jv-51		Yu-Jv-58		Yu-Jv-31		Yu-Jv-55		Yu-Jv-20		Yu-Jv-08		Yu-Jv-21		Yu-Jv-28		PROMEDIO
		N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	
0.5 mm	Pómez	95	21	101	23	75	15	90	19	73	21	74	17	102	21	106	24	63	13	19
	L. Lávicos frescos	31	7	16	4	44	9	16	3	30	9	48	11	49	10	38	8	39	8	8
	L. Lávicos oxidados	44	10	35	8	51	10	59	12	46	13	27	6	34	7	43	10	51	11	10
	L. Lávicos hidrotermalizados	8	2	10	2	20	4	26	5	18	5	23	5	12	2	6	1	11	2	3
	Cristales Opacos	60	13	34	8	61	12	74	15	33	9	46	11	49	10	31	7	75	16	11
	Cristales Translucidos	220	48	241	55	257	51	213	45	150	43	217	50	251	51	225	50	235	50	49
	Total	458	100	437	100	508	100	478	100	350	100	435	100	497	100	449	100	474	100	100

Tabla 4.8: Resultados del conteo litológico en la fracción 0.5 mm del sector proximal, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.18

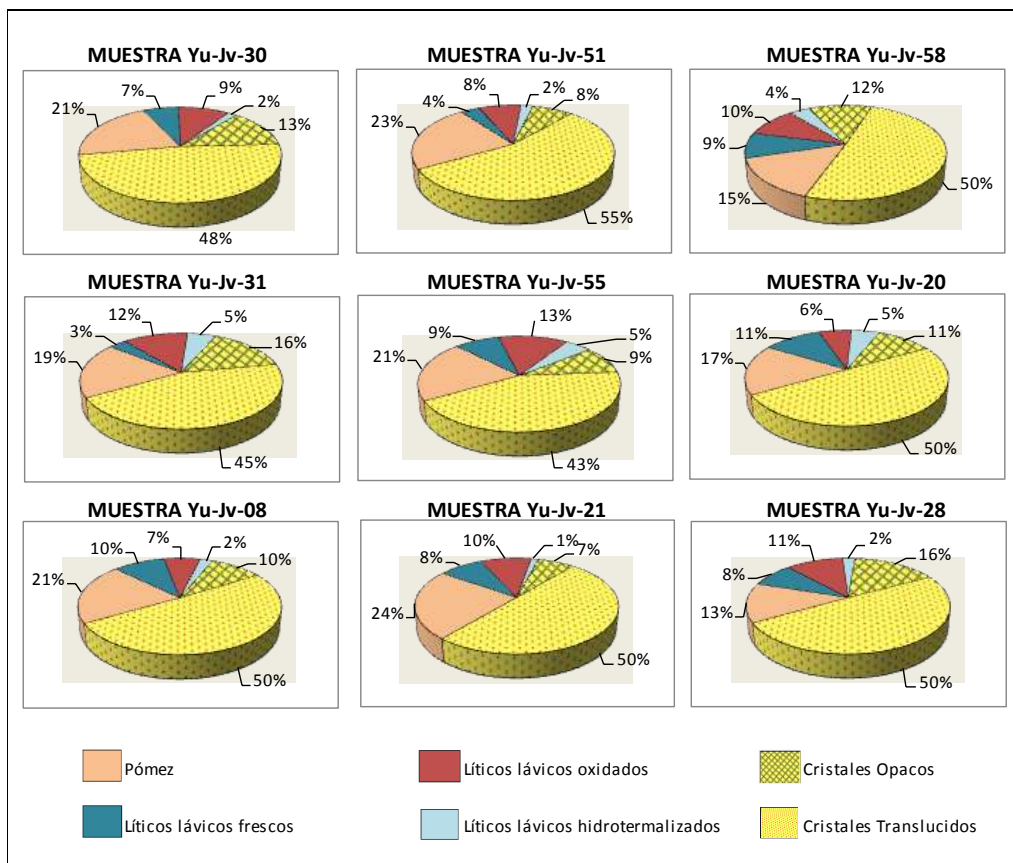


Figura 4.18: Composición porcentual de los componentes en el sector proximal, malla 0.5 mm.

4.2.2 Características de los componentes litológicos en el sector medial

En la **malla de 8mm** (Tabla 4.9, Figura 4.19): Las pómez se encuentran en un promedio de 57%. Es el porcentaje más alto de esta fracción y de ambos sectores. Los líticos lávicos oxidados se encuentran en un 35%, este componente es menor que en el sector proximal. Los líticos lávicos frescos e hidrotermalizados están en un porcentaje muy bajo, los lávicos frescos tienen 6% y los hidrotermalizados 2%.

MALLA	COMPONENTE	Yu-Jv-45		Yu-Jv-12		Yu-Jv-63		Yu-Jv-66		Yu-Jv-65		Yu-Jv-46		PROMEDIO
		N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	
8 mm	Pómez	133	59	70	53	179	63	93	62	86	59	82	48	57
	L. Lávicos frescos	8	4	8	6	15	5	11	7	9	6	12	7	6
	L. Lávicos oxidados	81	36	49	37	88	31	44	29	49	34	72	42	35
	L. Lávicos hidrotermalizados	3	1	4	3	2	1	3	2	2	1	6	3	2
	Total	225	100	131	100	284	100	151	100	146	100	172	100	100

Tabla 4.9: Resultados del conteo litológico en la fracción 8 mm del sector medial, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.19

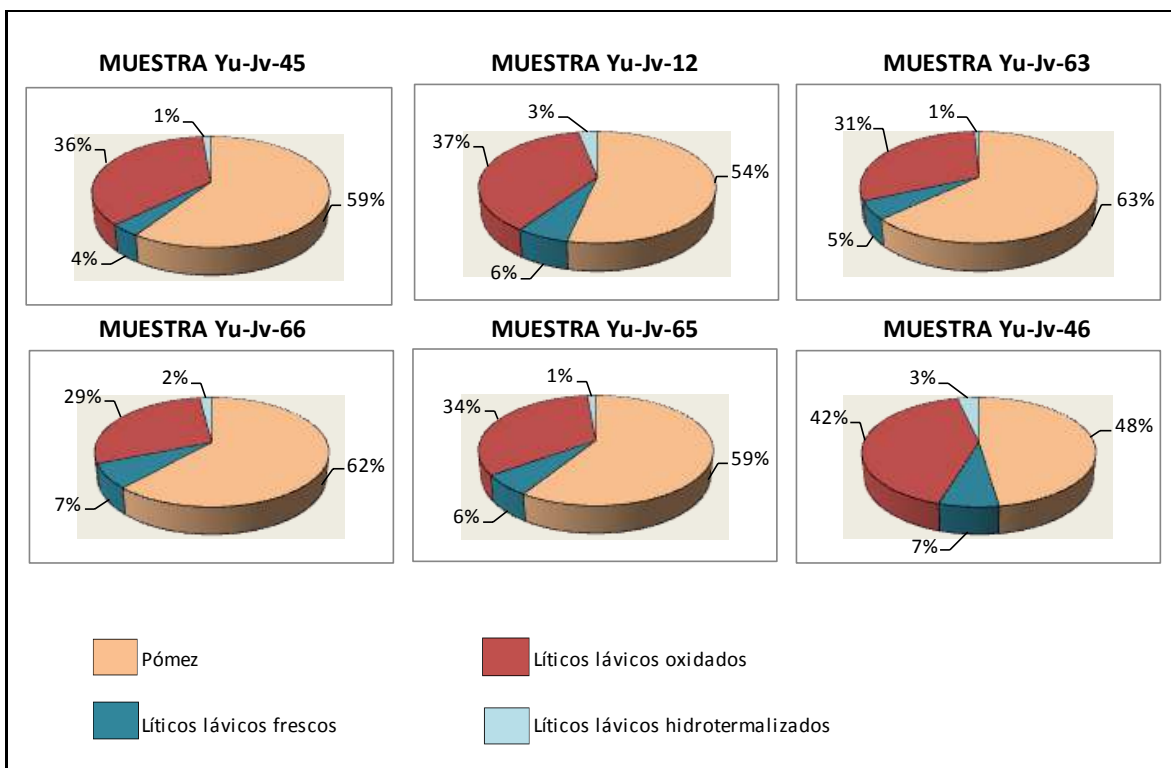


Figura 4.19: Composición porcentual de fragmentos en el sector medial para la malla 8mm.

En la **malla de 2 mm** (Tabla 4.10, Figura 4.20): La pómez conforman un promedio de 53%, este valor se incrementa respecto a la malla 2 mm del sector proximal. Los líticos lávicos oxidados conforman el 34%. Los lávicos frescos se encuentran en un 4%, los líticos hidrotermalizados conforman solo el 3. Los cristales aumentan ligeramente respecto a los cristales de la malla 2mm del sector proximal. Los cristales translucidos se encuentran en un 4% y los opacos en un 3%.

FRACCION	COMPONENTE	Yu-Jv-45		Yu-Jv-12		Yu-Jv-63		Yu-Jv-66		Yu-Jv-65		Yu-Jv-46		PROMEDIO
		N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	
2 mm	Pómez	301	51	340	50	467	58	512	54	376	50	321	51	53
	L. Lavicos frescos	37	6	33	5	27	3	43	5	31	4	17	3	4
	L.Lávicos oxidados	204	35	258	38	213	26	299	32	278	37	215	34	34
	L.Lávicos hidrotermalizados	17	3	19	3	27	3	23	2	18	2	39	6	3
	Cristales Opacos	10	2	8	1	23	3	31	3	29	4	15	2	3
	Cristales Translucidos	22	4	16	2	48	6	32	3	21	3	18	3	4
	Total	591	100	674	100	805	100	940	100	753	100	625	100	100

Tabla 4.10: Resultados del conteo litológico en la fracción 2 mm del sector medial, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.20

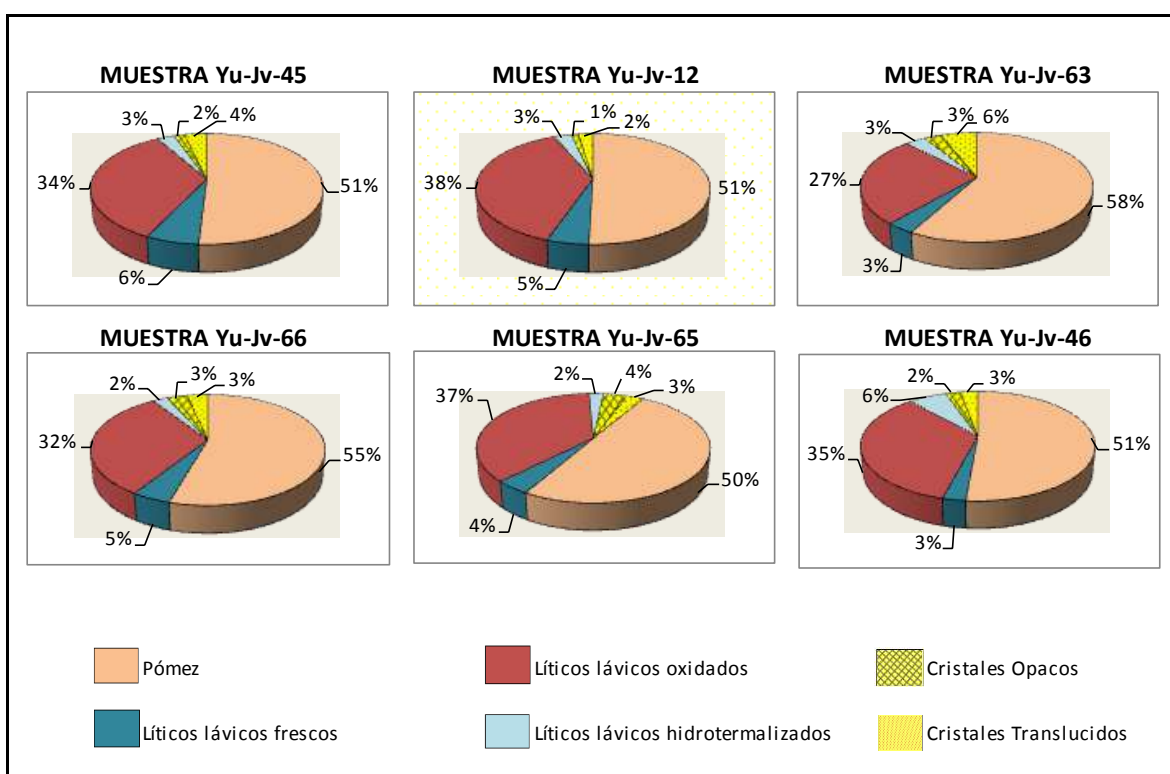


Figura 4.20: Composición porcentual de fragmentos en el sector medial para la malla 2mm.

En la **malla 0.5 mm** (Tabla 4.11, Figura 4.21): Los cristales translucidos tienen 55% y los opacos 13%. Los cristales translúcidos y opacos son los componentes más abundantes en esta malla tanto en el sector proximal y medial. El segundo componente importante son las pómez, se encuentran en un 24%. Luego los líticos son escasos pero entre ellos los líticos lávicos oxidados son los que más predominan, conforman el 5%. Los líticos frescos e hidrotermalizados son menos frecuentes, los líticos lávicos frescos tienen 3% y los hidrotermalizados 2%.

FRACCION	COMPONENTE	Yu-Jv-45		Yu-Jv-12		Yu-Jv-63		Yu-Jv-66		Yu-Jv-65		Yu-Jv-46		PROMEDIO
		N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	
0.5 mm	Pómez	116	22	100	23	164	24	97	24	105	26	126	23	24
	L. Lavicos frescos	16	3	11	3	17	3	12	3	16	4	13	2	3
	L.Lávicos oxidados	32	6	19	4	15	2	23	6	18	4	27	5	5
	L.Lávicos hidrotermalizados	9	2	12	3	8	1	8	2	7	2	8	1	2
	Cristales Opacos	51	10	64	15	86	13	47	11	59	14	71	13	13
	Cristales Translucidos	308	58	223	52	387	57	225	55	204	50	314	56	55
	Total	532	100	429	100	677	100	412	100	409	100	559	100	100

Tabla 4.11: Resultados del conteo litológico en la fracción 0.5 mm del sector medial, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.21

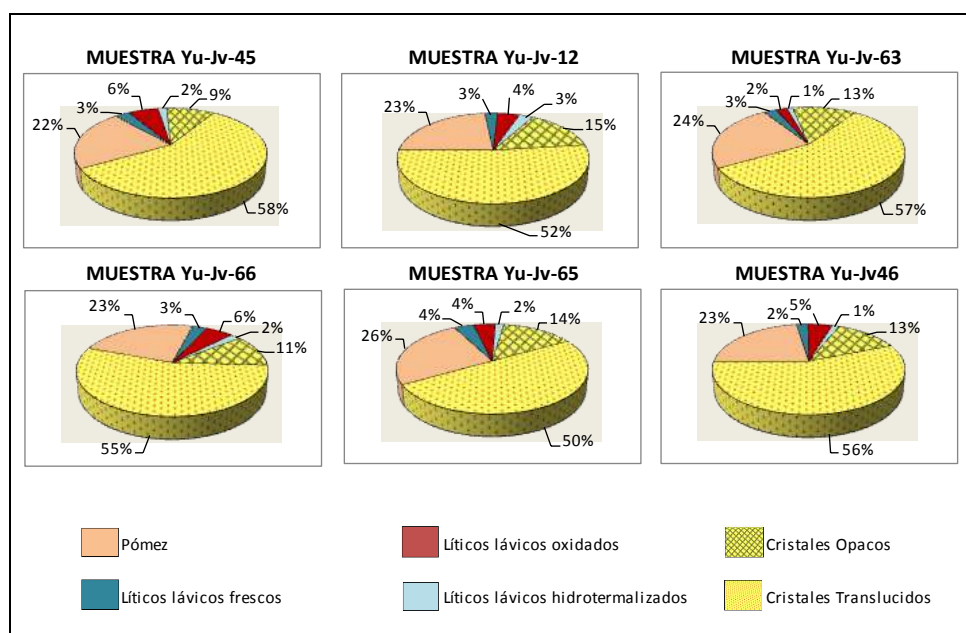


Figura 4.21: Composición porcentual de fragmentos en el sector medial para la malla 0.5mm.

4.2.3 Resumen de análisis de los componentes litológicos

En la Tabla 4.12 se muestra el resumen de la variación de los componentes litológicos, según el tamaño de grano en el sector proximal y medial del depósito.

COMPONENTES	MALLA 8 mm		MALLA 2 mm		MALLA 0.5 mm	
	PROXIMAL	MEDIAL	PROXIMAL	MEDIAL	PROXIMAL	MEDIAL
	%	%	%	%	%	%
Pómez	52	57	46	53	19	24
L. Lavicos frescos	7	6	6	4	8	3
L.Lávicos oxidados	39	35	40	34	10	5
L.Lávicos hidrotermalizados	2	2	4	3	3	2
Cristales Opacos			2	3	11	13
Cristales Translucidos			3	4	49	55

Tabla 4.12: Cuadro comparativo de componentes entre sectores según el tamaño de grano.

De acuerdo a la tabla anterior se puede concluir lo siguiente:

El componente más importante en la malla 8 y 2 mm es la pómez. En todas las fracciones el porcentaje de pómez aumenta hacia el sector medial. Por otra parte, los líticos oxidados abundan en la zona proximal y van disminuyendo hacia la zona medial. Los líticos frescos e hidrotermalizados son los menos frecuentes y también disminuyen hacia el sector medial. Los cristales están ausentes en la malla 8 mm, pero aparecen con bajos porcentajes en la malla 2mm, sin embargo los cristales son abundantes en la malla de menor diámetro (0.5 mm) y se incrementan en la zona medial. Las variaciones en el porcentaje de los componentes, indican un ensanchamiento del cráter y fuerte erosión del conducto desde el inicio de la erupción, con el consiguiente incremento de la descarga.

CAPITULO V

PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DEL DEPÓSITO DE CAÍDA DE LAPILLI DE PÓMEZ

5.1 Ubicación de muestras para estudio petrográfico y geoquímico

Un total de 11 muestras de pómez fueron recolectadas alrededor del volcán Yucamane (Figura 5.1), de los cuales 6 muestras fueron para el estudio petrográfico y 5 muestras para análisis geoquímico.

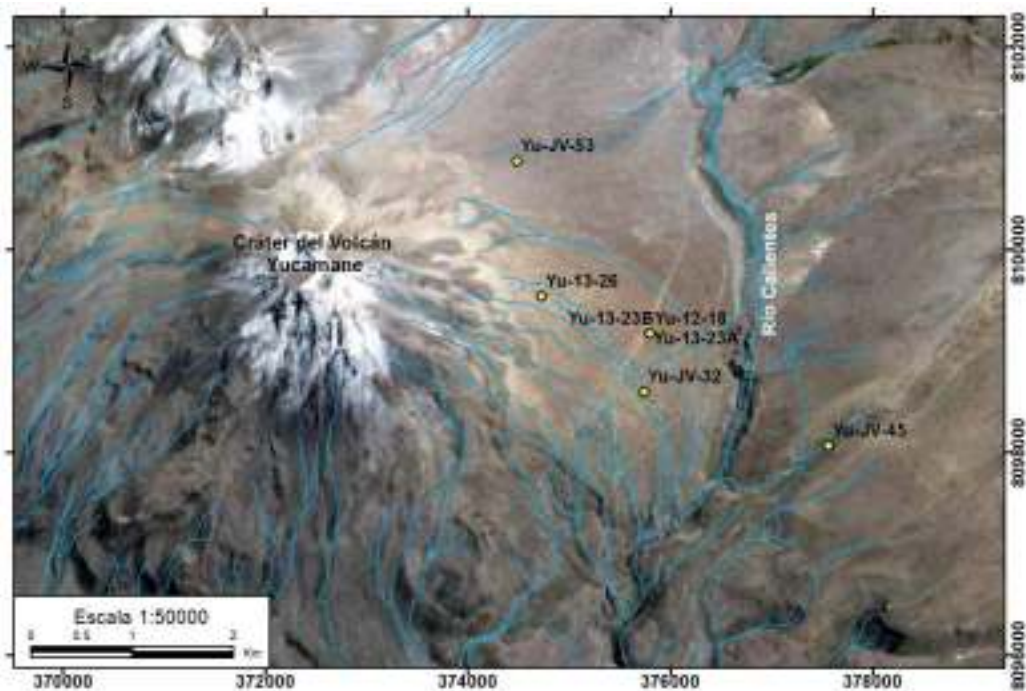


Figura 5.1: Ubicación de las muestras utilizadas para el estudio petrográfico y geoquímico.

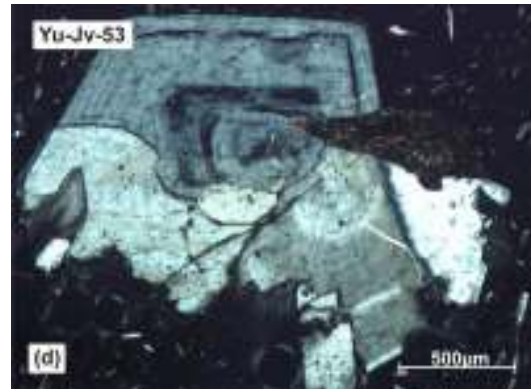
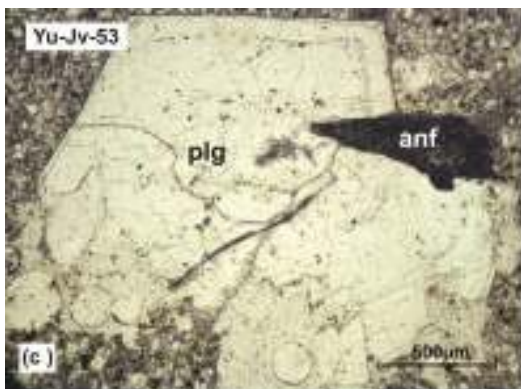
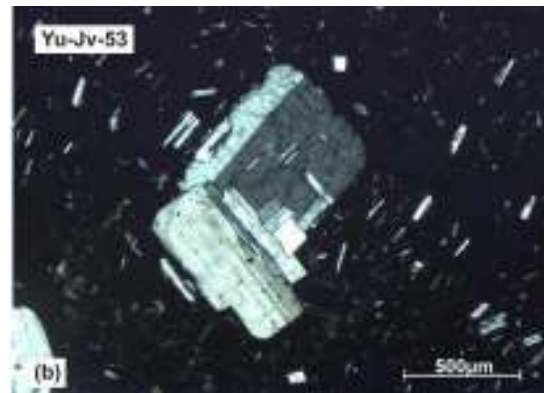
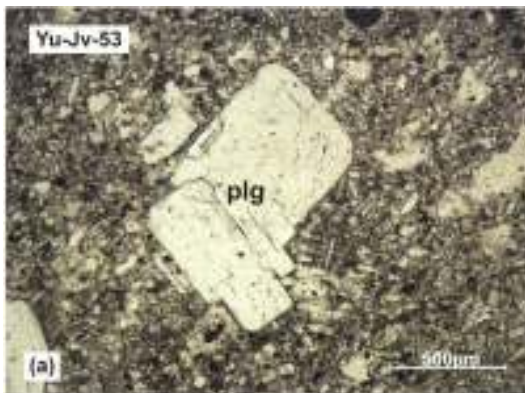
5.2 Caracterización petrográfica del depósito de caída de lapilli de pómez

Las pómez del depósito de caída de lapilli de pómez (e.g. Yu-13-26; Yu-Jv-32; Yu-Jv-45; Yu-Jv-53, Yu-13-23A y Yu-13-23B) son de textura porfírica con matriz microlítica, poikilítica y muy vesiculadas. Estas muestras están constituidas por 20-30 vol. % de fenocristales, 30-40 vol. % de

matriz y 40-50 vol. % de vesículas. Los microlitos que forman parte de la matriz son la plagioclasa, el anfíbol, y menor proporción biotita y ortopiroxenos. Los microlitos miden entre 60-100 μm . En las muestras predominan las vesículas redondeadas, sin embargo también se observan vesículas subredondeadas, las vesículas miden entre 70-250 μm y algunas llegan a medir hasta 700 μm .

La asociación mineral consiste principalmente de plagioclasa (10-20 vol. %) asociado con anfíbol (5-10 vol. %), biotita (5 vol. %), ortopiroxeno y óxidos de Fe-Ti (<3 vol. %)

Se observan dos poblaciones de plagioclasa. La primera población está constituida por fenocristales de plagioclasa de caras limpias que miden entre 0.5-2 mm y ocasionalmente algunas llegan a medir hasta 5 mm. Presentan formas euhedrales a subhedrales, están macladas y zonadas (Figura 5.2 a y b). Algunos cristales de plagioclasa forman pequeños aglomerados, este tipo de textura se conoce como glomeroporfirítica, así mismo se han identificado plagioclasas fracturadas con inclusiones de anfíbol (Figura 5.2 c y d) y en pocos casos plagioclasas con intercrecimiento de biotita. Mientras que la segunda población (Figura 5.2 e y f) está constituida por fenocristales de plagioclasa subhedrales a anhedrales (5 vol.%) que miden menos de 1mm y además presentan coronas de reacción e inclusiones vítreas en el borde de los cristales (textura "sieve" o "tamiz"). Algunas plagioclasas muestran inclusiones de anfíboles y óxidos de Fe-Ti.



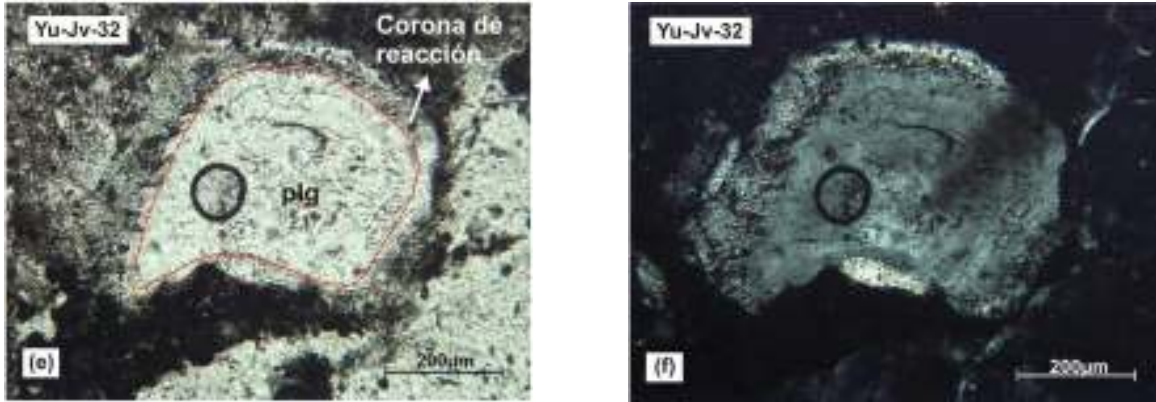
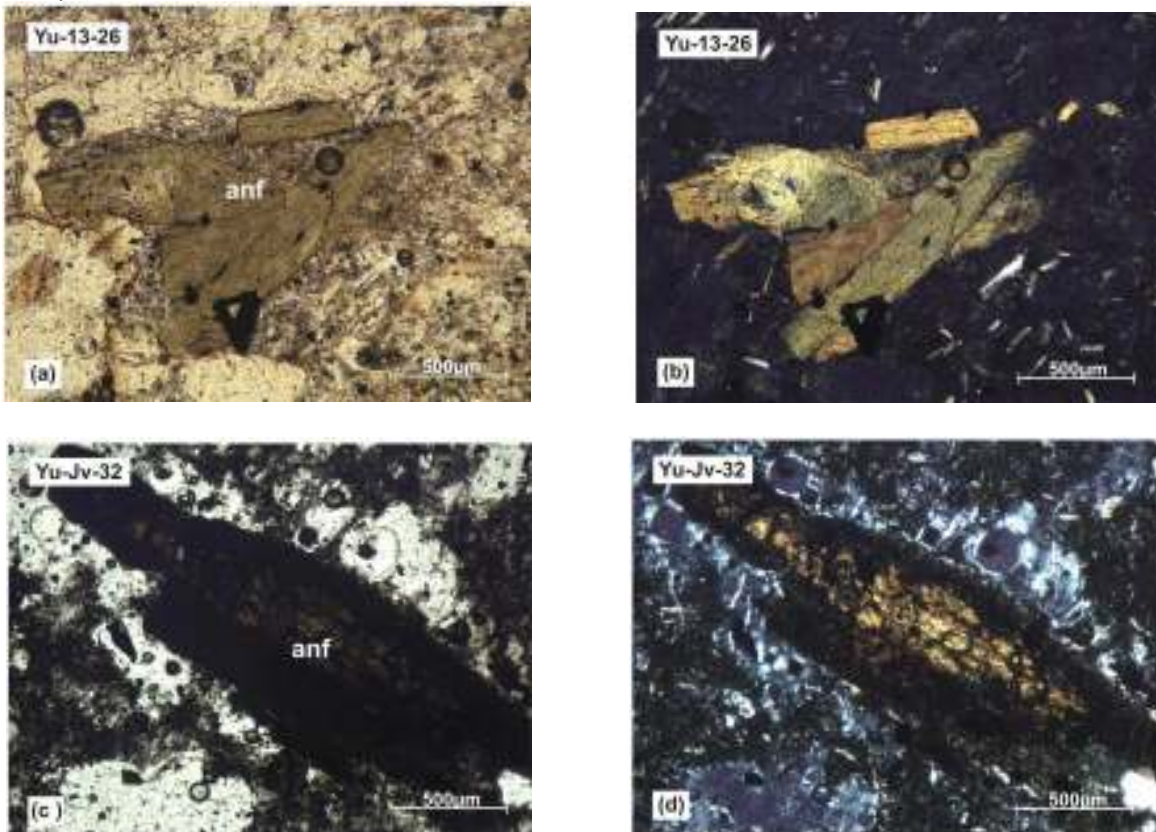


Figura 5.2: Fotografías de las secciones delgadas de las pómez del depósito de caída subpliniana. En lado izquierdo está en luz natural y en el lado derecho está en luz polarizada. Las imágenes “a y b” muestran el intercrecimiento de cristales de plagioclasas (plg), de forma euhedral. Las figuras “c y d” muestran una plagioclasa con zonación concéntrica, fracturada y con inclusión de anfíbol. Las imágenes “e y f” muestran una corona de reacción en la plagioclasa (plg), textura “sieve”.

Después de la plagioclasa, el anfíbol es el mineral más abundante (5-10 vol. %), se observan dos poblaciones: la primera población (<5 vol. %) presenta cristales limpios, euhedrales a subhedrales, de hábito prismático y entre 0.5 y 1mm (Figura 5.3 a y b). La segunda población está constituida por anfíboles (5 vol. %) con un tamaño menor a 700 µm, pero que en pocos casos alcanzan a medir 2 mm. Estos fenocristales están rodeados por óxidos de Fe y Ti (Figura 5.3 c y d) y algunos están completamente alterados por óxidos de Fe-Ti. Este tipo de textura es denominada “black” (Figura 5.3 e y f).



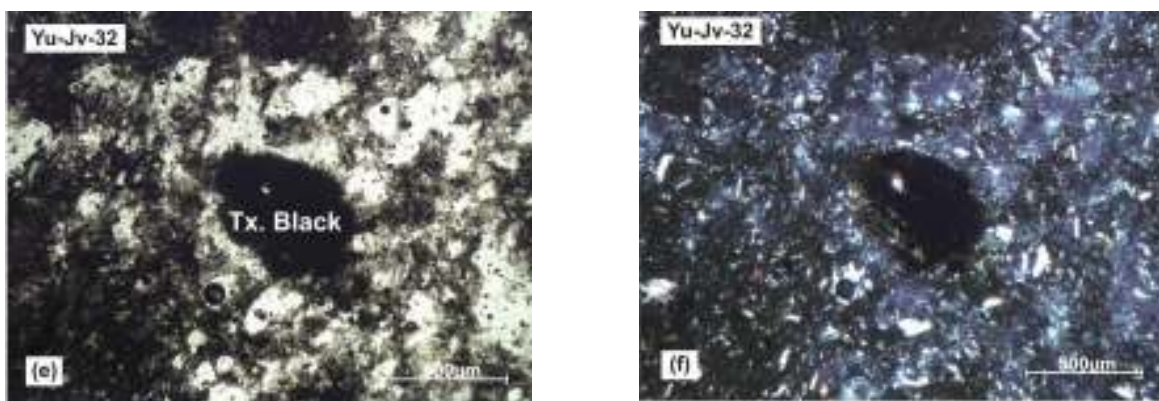


Figura 5.3: a,b) Agregado de fenocristales de anfíbol de hábitos subhedral. c,d) Fenocristal de anfíbol rodeado por óxidos de Fe y Ti. e,f) Anfíbol (anf) anhedral con textura “black” en una matriz con microfenocristales de plagioclasa (plg) y anfíbol (anf).

La biotita está presente en menor proporción con respecto a la plagioclasa y al anfíbol (5 vol. %). Los fenocristales de biotita miden entre 0.5 y 1.5 mm y, presentan un hábito euhedral a subhedral. Contienen inclusiones de plagioclasa subhedral y óxidos de Fe-Ti. Algunos cristales presentan bordes de óxidos de Fe-Ti (Figura 5.4 a, b, c y d).

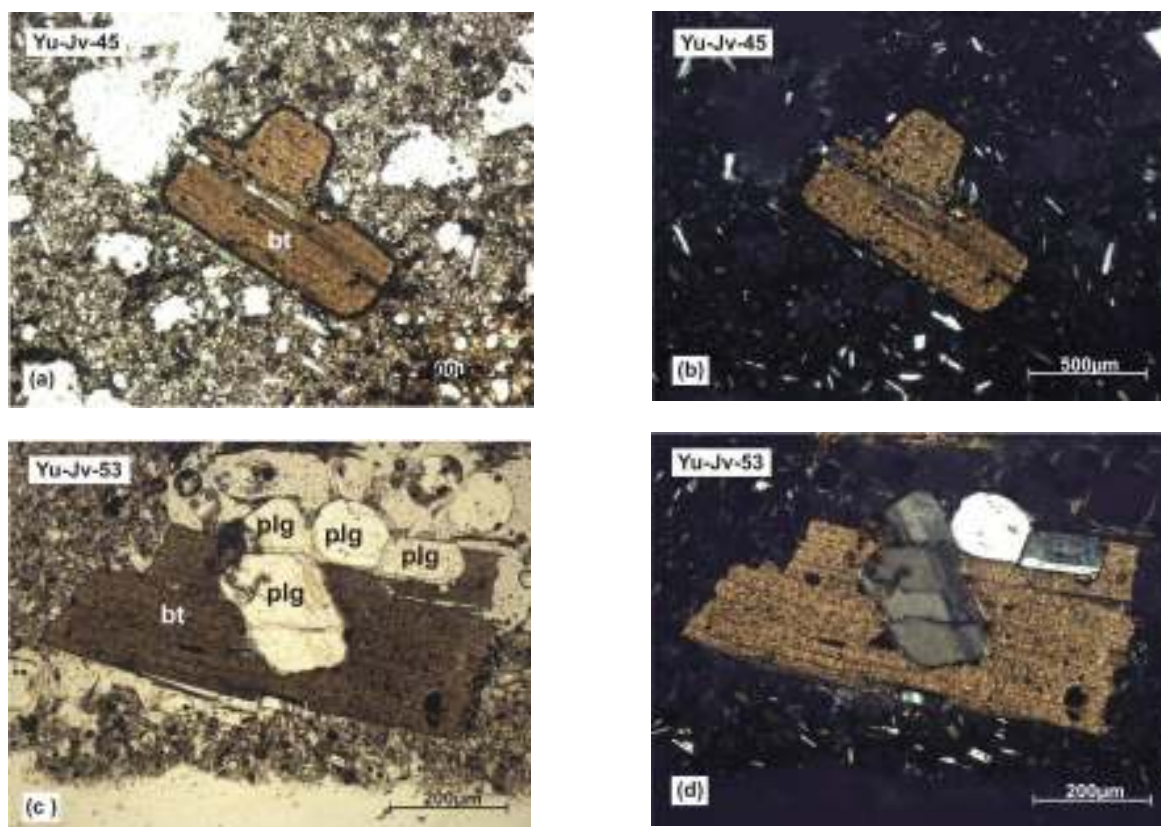


Figura 5.4: a,b) Cristal de biotita (bt) subhedral con inclusión de microfenocristales de plagioclasa (plg). Este cristal presenta bordes de óxidos de Fe-Ti. c,d) Se observa una biotita (bt) subhedral con intercrecimiento e inclusión de plagioclasa (plg) y óxidos de Fe y Ti, la plagioclasa (plg) es anhedral a subhedral y presenta macla polisintética.

El ortopiroxeno es un mineral que se encuentra en un porcentaje menor (< 3 vol. %). Mayormente se presentan como microfenocristales subhedrales a anhedrales que miden entre 60-100 μm . Algunos cristales están ligeramente alterados (Figura 5.5 a, b). En algunos casos forman aglomerados con anfíboles de forma anhedral (Figura 5.5 c y d).

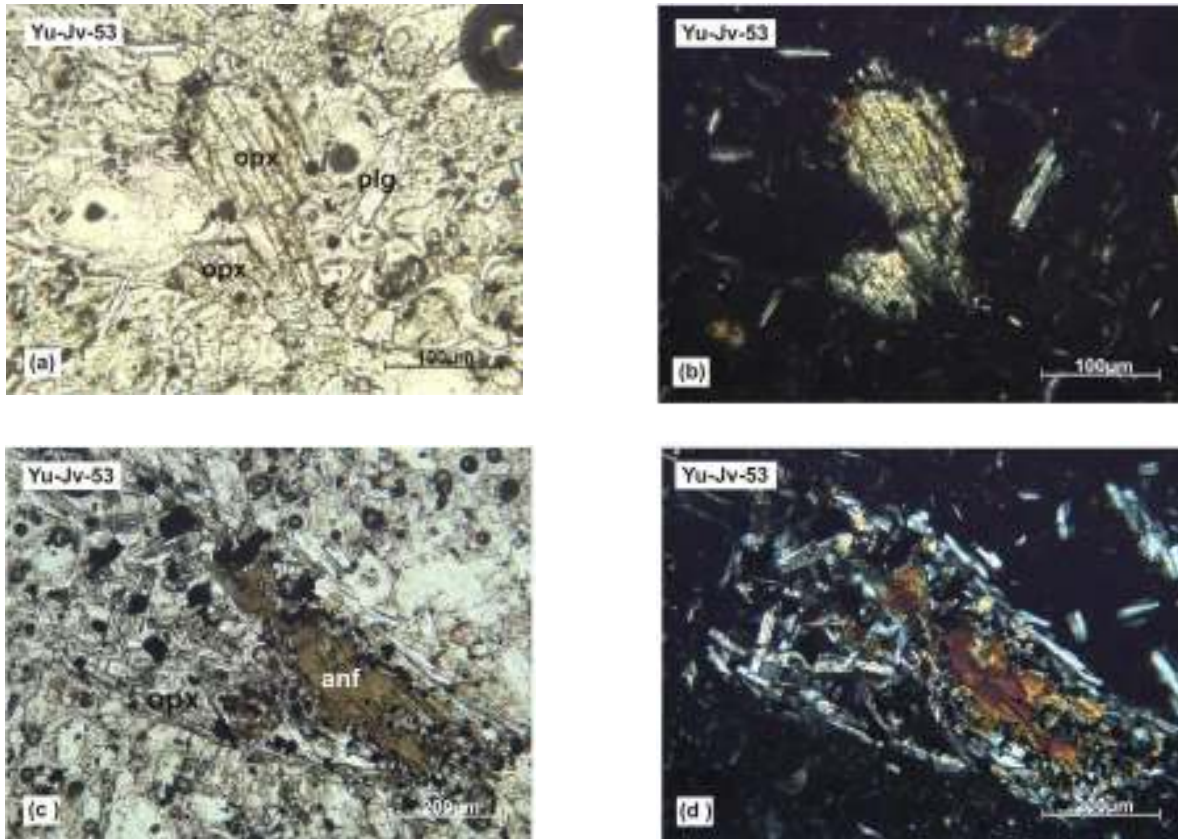


Figura 5.5: a,b) Se observa ortopiroxenos anhedrales con bordes corroídos e inclusiones de óxidos de Fe y Ti. c,d) Se observa agregado de microfenocristales de ortopiroxenos subhedrales, un fenocristal de anfíbol anhedral y óxidos de Fe y Ti.

5.3 Geoquímica

El estudio geoquímico está basado en las muestras correspondientes al depósito de caída de lapilli de pómez del complejo volcánico Yucamane-Calientes. En cuatro campañas realizadas en el 2013 y 2014 se tomaron 5 muestras. Los resultados químicos se han planteado en los diagramas de clasificación de rocas volcánicas.

5.3.1 Diagramas de Clasificación

Los resultados de los análisis químicos son presentados en algunos diagramas de clasificación clásica de rocas volcánicas. En el diagrama TAS (Figura 5.6), total Álcalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) versus Sílice (SiO_2) de Le Bas (1986), la pómez es de composición andesítica con promedio entre 61-62 wt. % de SiO_2 . En el diagrama triangular AFM (A: $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, F: FeO , M: MgO) de Kuno (1968), las muestras del depósito de lapilli de pómez se sitúan en el dominio de los magmas calco-alcalinos (Figura 5.7).

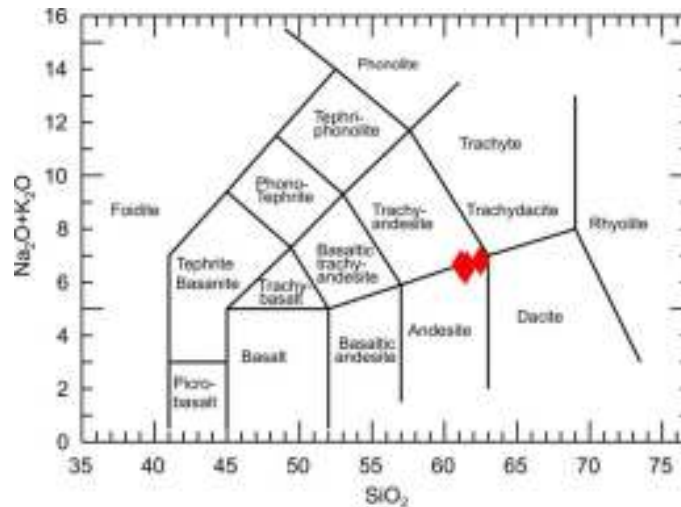


Figura 5.6: Clasificación de la pómez en el diagrama TAS (“total álcalis vs sílice”), de Le Bas (1986).

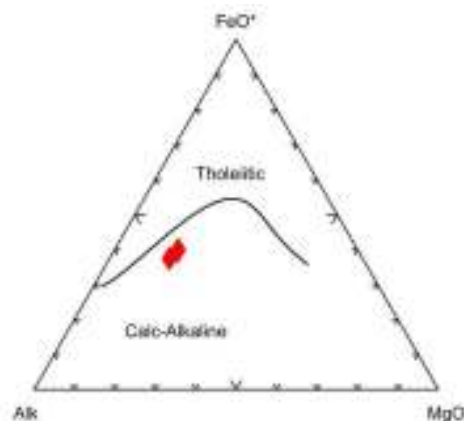


Figura 5.7: Definición de la serie calco-alcalina en el diagrama triangular AFM de las pómez, de Kuno (1968).

En la Figura 5.8 se muestra el diagrama K_2O vs. SiO_2 de Peccerillo y Taylor (1976) donde las 5 muestras del Complejo volcánico Yucamane-Calientes corresponden a la serie calco - alcalina con alto contenido de K_2O . Está constituido por andesitas (2.6 - 2.9 wt.% K_2O y 61-62 wt.% SiO_2).

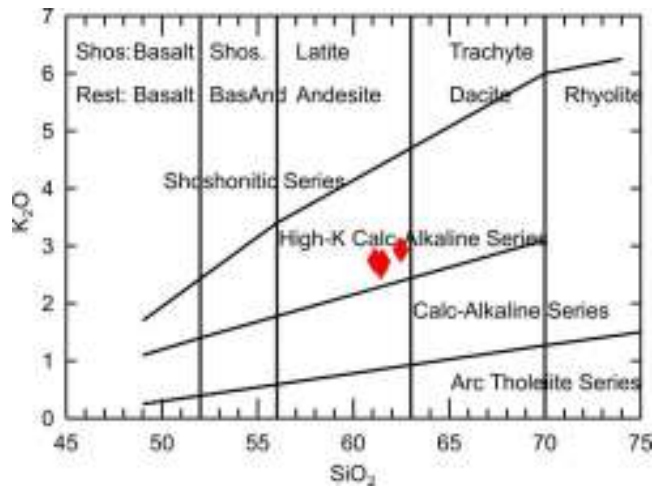


Figura 5.8: Diagrama K_2O vs. SiO_2 de Peccerillo y Taylor (1976), que muestra las rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes son fuertemente potásicos.

5.3.2 Conclusiones del estudio geoquímico

Las pómez del depósito son de composición andesítica (61-62% de SiO_2) pertenecientes a la serie calcoalcalina. Las muestras presentan una característica típica de magmas ligados a procesos de subducción, característico en rocas del Plio-cuaternario de la ZVC.

CAPITULO VI

DINÁMICA ERUPTIVA

6.1 Análisis del depósito de caída de lapilli pómez

El espesor, granulometría y dispersión de los depósitos depende principalmente de la altura de la columna de erupción, así como la velocidad y dirección de los vientos que desplazan la nube o columna eruptiva (Carey y Sparks, 1986). Las columnas bajas están asociadas comúnmente a erupciones estrombolianas, las columnas intermedias a erupciones vulcanianas y las columnas altas a erupciones de tipo sub-pliniano, pliniano o ultrapliniano.

Una erupción en una atmósfera sin movimiento produciría un depósito de caída con una dispersión simétrica y circular, con isópacas concéntricas alrededor del punto de emisión. Sin embargo, es común que el viento sople en una dirección preferencial, confiriéndole al depósito una configuración elíptica cuyo eje de dispersión mayor es paralelo a la dirección principal del viento (Ej.: el Fogo-Cabo Verde, Walker y Croasdale, 1971; la caldera Pululahua-Ecuador, Papale y Rosi (1993) y Campos Flegreos-Italia (Rosi et al., 1999).

El depósito de caída de lapilli de pómez del volcán Yucamane fue emplazado por una erupción explosiva. La granulometría y dispersión dependió de los vientos que influyeron sobre la forma de la columna eruptiva. Se elaboró mapas de isópacas e isopleas para conocer parámetros, tales como: volumen y superficie del depósito; altura de la columna eruptiva, IEV, etc.

6.1.1 Mapa de isópacas:

Se realizaron 53 calicatas ubicadas entre 2 km y 7.5 km del cráter del volcán, en estas calicatas se hizo la medida de los espesores y la medida de los fragmentos máximos de la pómez (MP) y de los líticos (ML) del depósito de caída de lapilli de pómez.

A partir de la medición de los espesores (Tabla 6.1, Anexo C), se ha construido el mapa de isópacas (Figura 6.1), ubicados en los sectores proximal y medial del depósito de caída. Estos mapas fueron trabajados en un Sistema de Información Geográfica (Arc Map), los mismos que fueron procesados y mostrados sobre un modelo digital de elevaciones. En este programa también se calculó las áreas de cada isópaca (Tabla 6.2) para posteriormente realizar el cálculo del volumen.

El mapa de isópacas posee un eje de dispersión mayor orientado en dirección sureste, y un lóbulo de dispersión de forma elíptica también hacia el sureste. En la tabla 5.2 se muestran las áreas de las isópacas de 5, 10, 20, 30, 40 y 50 cm. La isópaca de mayor espesor (50 cm) cubre un área de 2.2 km² y la isópaca de menor espesor cubre un área de 11.5 km².

La isópaca de 5 cm pasa a 7.5 km del cráter, la de 10 cm a 6.2 km, la de 20 cm a 5.1 km, la de 30 cm a 4.4 km, la de 40 cm a 3.9 km y la de 50 cm a 3.2 km, todos al sureste del cráter.

Espesor (T) (cm)	Área de la Isópaca (A) (km²)
50	2.2
40	3.9
30	6.3
20	9.6
10	17.1
5	28.6

Tabla 6.2: Área y espesor de las isópacas.

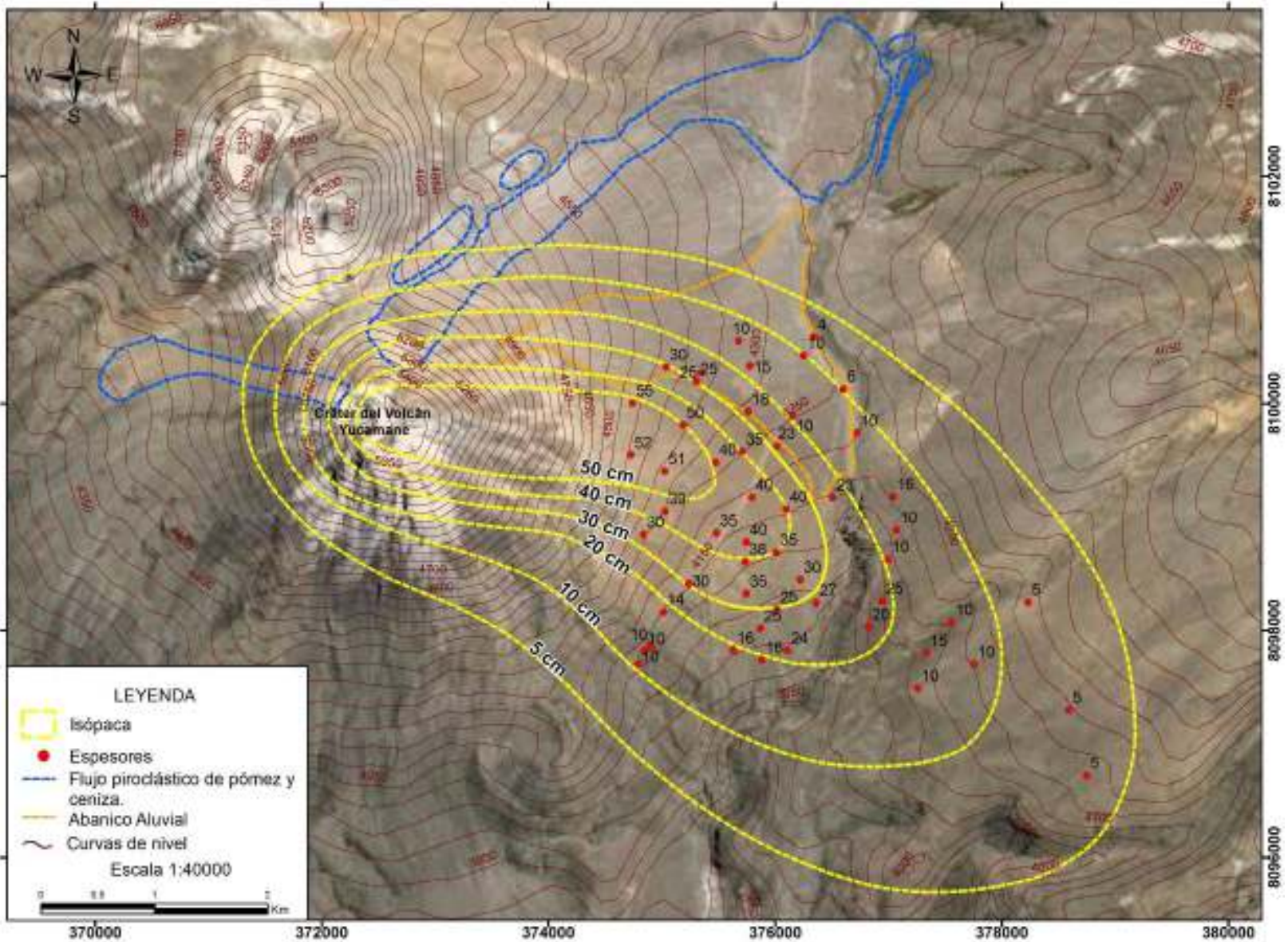


Figura 6.1: Mapa de isópaca del depósito de caída de lapilli de pómez donde se muestra la variación del espesor con la distancia respecto al cráter.

6.1.2 Estimación del volumen del depósito de caída

En la literatura se describen varios métodos para calcular el volumen de un depósito de caída. A partir del criterio de la disminución exponencial de los espesores hacia las zonas distales, varios autores han desarrollado diferentes métodos para el cálculo del volumen de estos depósitos. A continuación se da una breve descripción de los más importantes.

Rose et al. (1973) fueron los primeros en usar escalas logarítmicas de espesor vs área. En este método se calcula el volumen total resolviendo la ecuación $V=A\int(t)dt$. En donde A es el área cubierta por cada isópaca y t es el espesor.

Más tarde Sarna-Wojcicki (1981) y Froggatt (1982) propusieron el método de la regla trapezoidal. Este consiste en una integración numérica para calcular el área bajo la curva resultante de graficar el área en km² ocupada por cada isópaca, contra el espesor en cm.

Pyle (1989) usó por primera vez una escala combinada log espesor vs $A^{1/2}$, simplificando de manera considerable el cálculo del volumen, evitando en cierto modo la inexactitud al momento de extrapolar e interpolar.

Fierstein y Nathenson (1992) y Pyle (1995) propusieron modificaciones al método de Pyle (1989), modificando el uso de las fórmulas para el cálculo del volumen.

Con el fin de reducir la incertidumbre acerca de la aplicación de cada método Rodríguez-Elizarraras (1998) hizo una revisión sobre cada uno de los antes descritos, concluyendo que el método más apropiado para obtener un volumen mínimo del depósito es el que propuso Pyle (1989,1995) y Fierstein y Nathenson (1992). Señalando que algunos métodos están basados sobre varias asunciones y cuando son aplicados al mismo depósito, ellos muestran inconsistencias.

De acuerdo con Rodríguez-Elizarraras (1998) el método que se utilizó en este trabajo es el “método del adelgazamiento exponencial” propuesto por Pyle (1989, 1995) y Fierstein y Nathenson (1992, 1993), ya que este modelo se ajusta a nuestros datos asumiendo una ley de adelgazamiento exponencial, es decir se asume que el espesor del depósito de caída disminuye exponencialmente con la distancia.

Para el cálculo del volumen fue necesario, antes que nada, calcular las áreas de cada isópaca. Esto se realizó con el software Arc Map. Luego, de acuerdo al método de Pyle se utilizó la siguiente relación:

$$T = T_{max} \exp (-k \cdot A^{1/2}) \quad (1)$$

En donde T_{max} es el valor del espesor máximo extrapolado cuando el área A es igual a “0” y -k= pendiente de la recta obtenido a partir de la gráfica de la Figura 6.2 (Fierstein y Nathenson, 1992 y Pyle, 1989; 1995). Por lo tanto, si se grafica en las ordenadas el logaritmo natural del espesor de una isópaca $\ln(T)$, y en las abscisas la raíz cuadrada del área de la misma isópaca ($A^{1/2}$), la línea que le corresponde es una recta cuyos valores disminuyen cuando aumenta la raíz cuadrada del área “A”. Por lo tanto, al conocer a T en cada distancia, se extrapola el valor del espesor máximo de la isópaca en la Figura 5.4: $T_{max} = 130.94$ m; con valor de $-kA = -0.611$. Esos valores se utilizan en la ecuación 7 para obtener el volumen “V”:

Integrando la ecuación (1) se obtiene:

$$V = \int_0^{\infty} T \cdot dA \quad (2)$$

$$V = \int_0^{\infty} T \cdot d(A^{1/2})^2 \quad (3)$$

$$V = \int_0^{\infty} T \cdot 2A^{1/2} dA^{1/2} \quad (4)$$

Sustituyendo la ecuación (1), se obtiene:

$$V = \int_0^{\infty} T_{\max} \exp(-KA^{1/2}) \cdot 2A^{1/2} dA^{1/2} \quad (5)$$

$$\text{Resolviendo la integral: } -2T_{\max}/K^2 [(KA^{1/2}+1) \cdot \exp(-kA^{1/2})]_0^{\infty} \quad (6)$$

Se encuentra el volumen total del depósito entre una distancia 0 e infinito:

$$V = 2 \cdot T_{\max} / K^2 \quad (7)$$

La ecuación representa la línea recta en las gráficas semilogarítmicas y los valores representan la intercepción de la línea con el eje Y (T_{\max}) y el coeficiente k , respectivamente. Por lo tanto, utilizando los datos anteriores se obtuvo un volumen para el depósito de caída de aproximadamente $7 \times 10^6 \text{ m}^3$.

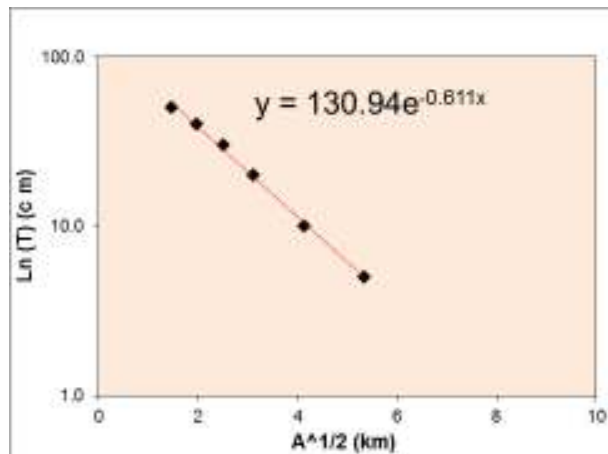


Figura 6.2: Gráfico $\ln(T)$ vs $A^{1/2}$

Adicionalmente se debe añadir el volumen del depósito del flujo piroclástico, que aflora en el flanco NE del volcán Yucamane y que corresponde al mismo evento eruptivo. Como se describió anteriormente este flujo aflora al oriente y occidente del volcán. El volumen aproximado para el flujo piroclástico de pómez y ceniza es de $9 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Entonces sumando el volumen el depósito de caída y el volumen del flujo piroclástico de pómez y ceniza, se tendría un volumen total de $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ para esta erupción.

6.1.3 Mapa de isopleetas

Se realizaron dos mapas de isopleetas, uno para los líticos y otro para las pómez. Se construyeron a partir de los valores tomados en las calicatas y afloramientos donde se midieron los espesores. Para cada afloramiento se escogieron las 5 pómez más grandes (MP) y los 5 líticos más grandes (ML). Posteriormente se calculó el valor promedio de las tres dimensiones de las 5 pómez y líticos, luego estos valores fueron ploteados en los mapas de isopleetas de pómez y líticos.

Los mapas de isopleetas, permiten inferir la altura de la columna eruptiva, el tipo de erupción, la dirección y velocidad predominante del viento durante la erupción. También se puede comparar con el mapa de isópacas y tener mejor idea de la dispersión del depósito.

6.1.3.1 Mapa de isopleetas de pómez

Las isopleetas de pómez (Figura 6.3) tienen forma elíptica con eje mayor en dirección sur este del cráter, debido a vientos provenientes del noroeste. En la tabla 6.3 (Anexo C) se muestran los valores promedios de las dimensiones de MP, con estos datos se elaboró el mapa de isopleetas de pómez.

En la zona proximal, las pómez tienen 6 y 5 cm de diámetro y en el sector medial las isopleetas son de 4 a 3 y 2 cm. La isopleeta de diámetro más grande (6 cm) cubre un área de 3.8 km^2 y la isopleeta de diámetro más pequeño (2 cm) cubre un área de 9.9 km^2 .

La isopleeta de 6 cm pasa a 3.4 km del cráter, la de 5 cm a 3.8 km, la de 4 cm a 4.8 km, la de 3 cm a 5.7 km y la de 2 cm a 7.5 km, todos al sureste del cráter.

En áreas distales (más allá de 7.5 km), no se pudieron determinar isopleetas, pero las pómez deben tener diámetros menores a 2 cm.

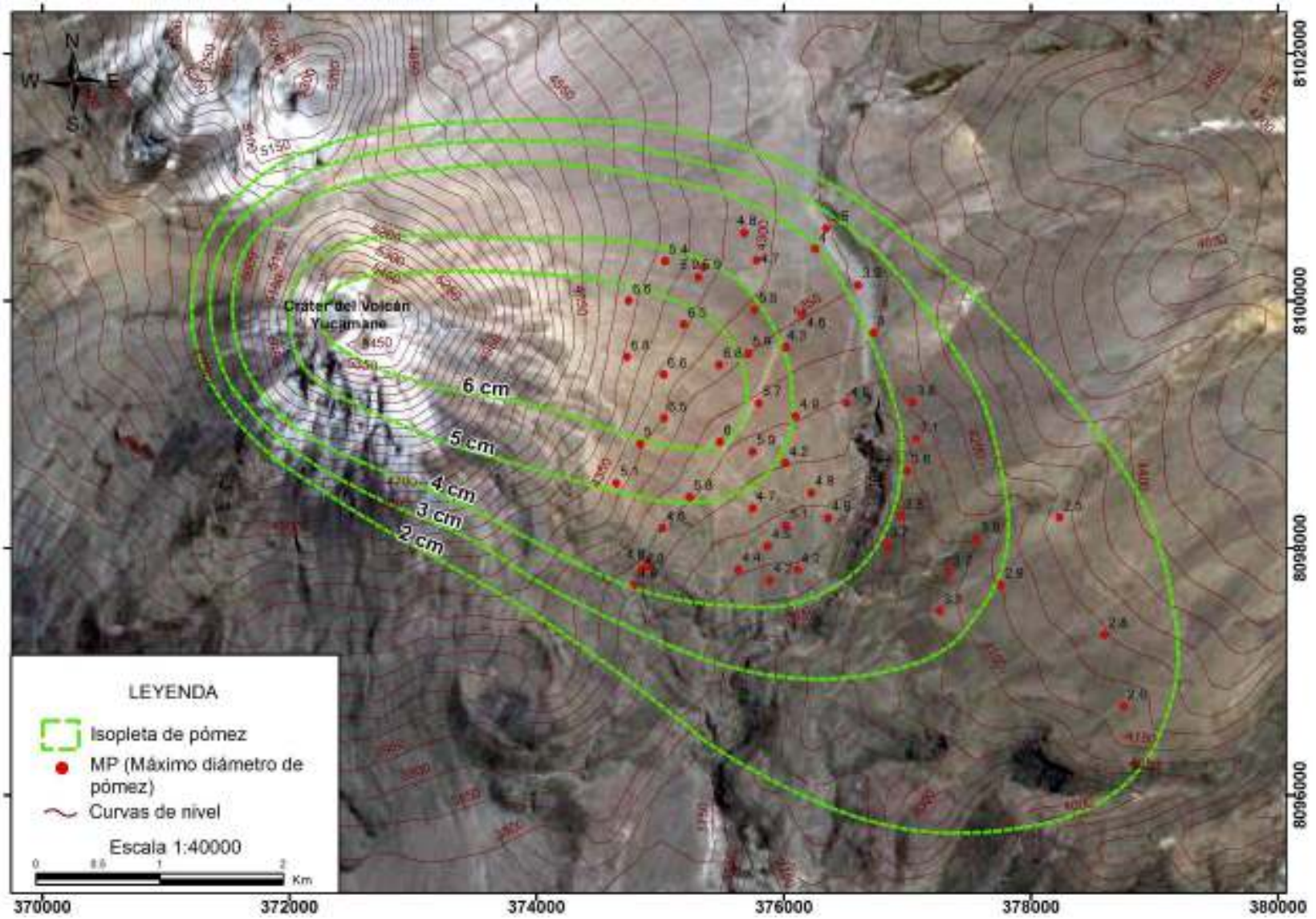


Figura 6.3: Mapa de isopletas de pómez, se muestra el tamaño de las pómez más grandes en el depósito de caída de lapilli de pómez.

6.1.3.2 Mapa de isopletras de líticos

En el mapa de isopletras de líticos (Figura 6.4) el lóbulo de dispersión tiene forma elíptica y orientación al sureste similar al lóbulo de pómez. En la tabla 6.4 (Anexo C) se muestran los valores promedios de las dimensiones de ML del depósito de caída.

Las isopletras de 6, 5 y 4 cm están en la facie proximal, las de 3, 2 y 1 en la medial. La isopletra de diámetro más grande (6 cm) cubre un área de 2.7 km² y la isopletra de diámetro más pequeño (1 cm) cubre un área de 8.7 km².

La isopletra de 6 cm pasa a 3.2 km del cráter, la de 5 cm a 4.0 km, la de 4 cm a 4.4 km, la de 3 cm a 5.1 km, la de 2cm a 6.3 km y la de 1cm a 7.5 km, todos al sureste del cráter.

El mapa de isopletras de líticos, isopletras de pómez y el mapa de isópacas, obedecen la misma dirección de viento, los ejes de dispersión sugieren que durante la erupción, la dirección general del viento fue hacia el sureste.

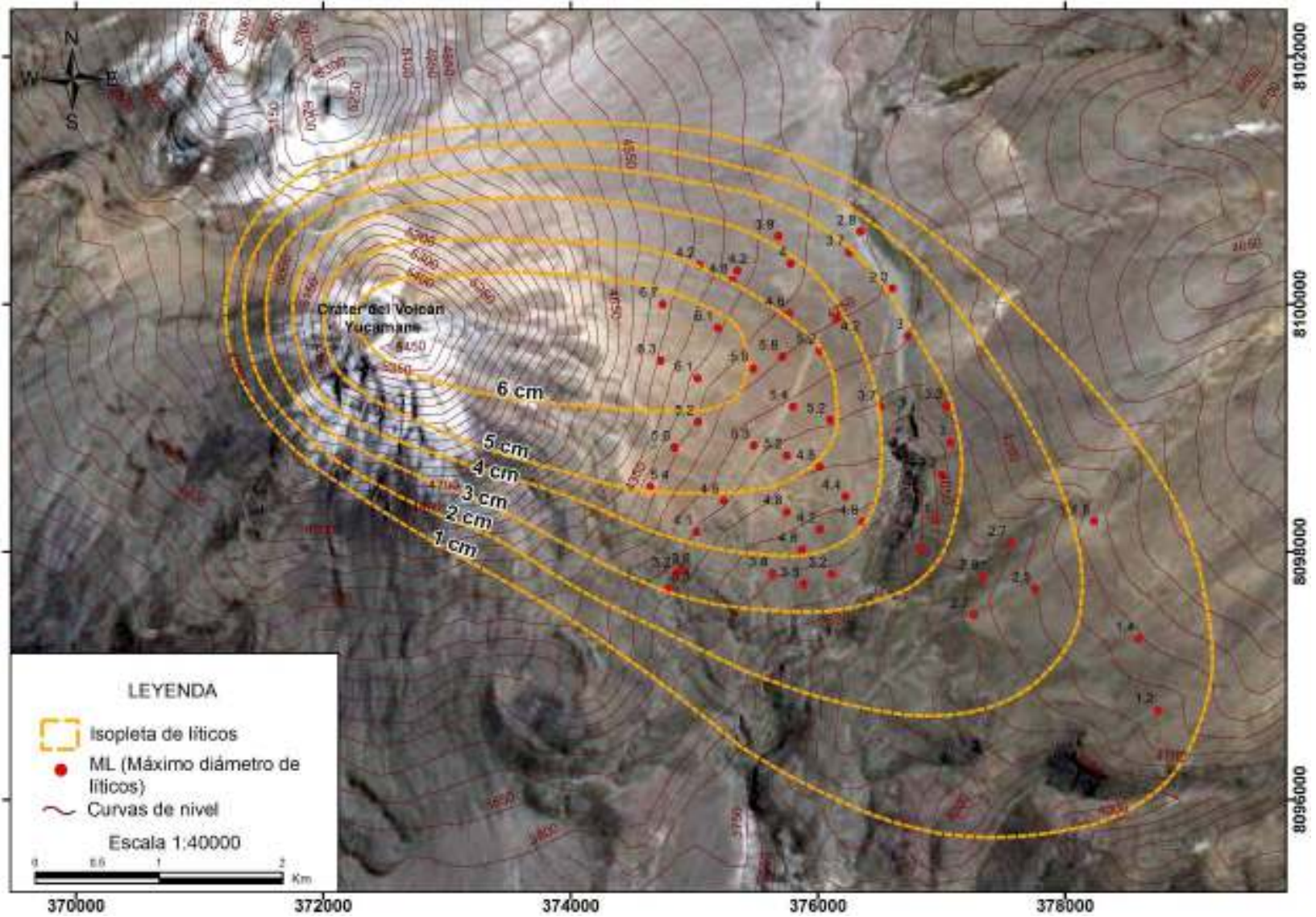


Figura 6.4: Mapa de isopletas de líticos, se muestra el tamaño de los líticos más grandes en el depósito de caída de lapilli de pómez.

6.1.4 Estimación de la altura de la columna

El conocimiento de este parámetro puede llevar a un mejor entendimiento de la fase eruptiva en estudio. El radio del cráter, la velocidad de salida y el contenido volátil magmático juntos controlan la velocidad de la descarga de la erupción, el cual es el principal determinante de la altura de la columna (Wilson et. al., 1980; Wilson y Walker, 1987). A su vez la altura de la columna junto con los patrones de vientos, influyen fuertemente la geometría de la columna, expansión y dispersión de los clastos (Sparks 1986, Carey and Sparks 1986).

Para comprender mejor la dinámica de la columna de erupción, que se refiere al transporte y dispersión de las partículas, se hicieron varios estudios por Sparks (1986), Carey & Sparks (1986), Wilson & Walker (1987), Woods (1988), Bursik et al (1992) y Sparks et al (1992) estos estudios concuerdan bien con datos de campo así como con resultados experimentales de columnas de laboratorio de pequeña escala (Sparks et al, 1991).

Existen varios métodos en la literatura que describen el cálculo de la altura de la columna eruptiva. Los diagramas de Walker & Croasdale (1971) y Carey & Sparks (1986), que relacionan áreas de isopletas de pómez y líticos vs. diámetros máximos de pómez y líticos respectivamente permiten calcular la altura de una columna eruptiva.

6.1.4.1 Modelo de Walker y Croasdale (1971)

En estos diagramas se relacionan áreas de isopletas de pómez y líticos vs. diámetros máximos de los mismos, los valores se muestran en las tablas 6.5 y 6.6.

Diámetro máximo de pómez (cm)	Área de la Isopleta km ²
6	3.28
5	6.65
4	14.17
3	19.84
2	29.77

Tabla 6.5: Valores de MP y área de las isopletas de pómez.

Diámetro máximo de líticos (cm)	Área de la Isopleta km ²
6	2.71
5	6.43
4	10.08
3	14.68
2	21.05
1	29.77

Tabla 6.6: Valores de ML y área de las isopletas de líticos.

Los valores de MP y ML vs el área de cada isopleta de pómez fueron plotados en el diagrama de la figura 6.5 a y b respectivamente, donde el valor de la altura de la columna considerando las isopletas de pómez es de 7-11 km y considerando las isopletas de líticos es de 8-11 km.

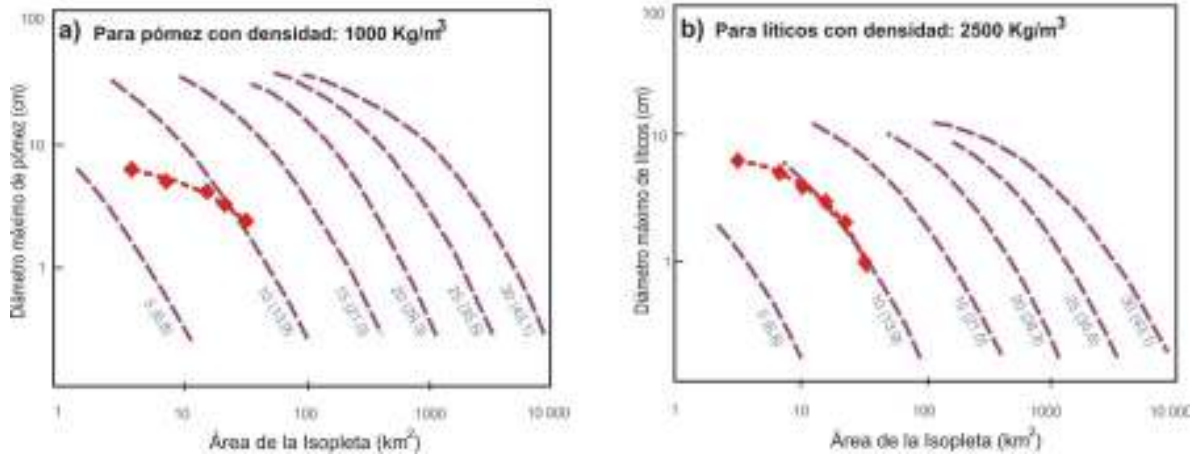


Figura 6.5: a) Área de las isopletas de pómez vs la dimensión del mismo clasto, se ha considerado una densidad de 1000 kg/m^3 , b) Área de las isopletas de líticos vs la dimensión del mismo clasto, se ha considerado una densidad de 2500 kg/m^3 .

6.1.4.2 Método de Carey y Sparks (1986)

El método de Carey y Sparks (1986) permite distinguir mejor entre la altura verdadera y los efectos del viento, como ha sido demostrado en varios casos, por ejemplo, durante la erupción del Pinatubo en 1991 (Rosi et al., 2001), por tal motivo el resultado obtenido mediante este método, será considerado como altura de la columna para esta erupción.

En este sentido, el método de Carey y Sparks (1986) es un método relativamente simple ya que evita el uso de parámetros difíciles de cuantificar y que pueden producir mayores incertidumbres. A continuación se describirá este método, el cual se aplicará para el caso de ML. Se utilizaron preferencialmente datos de líticos ya que los clastos de pómez provocan complicaciones porque su densidad varía con el tamaño o porque son susceptibles de fracturarse al impactarse sobre el terreno durante el proceso de caída.

El “método de los clastos máximos” que estos autores proponen, permite determinar la altura de la columna, al considerar la fuerza del viento a través del análisis de la forma de las isopletas de los líticos.

El método de Carey y Sparks se basa en dos parámetros, uno es la mitad de la distancia perpendicular al viento y a la distancia máxima en la dirección del eje mayor de dispersión, para inferir alturas de columna entre 7 y 43 km, a velocidades predominantes de viento de 10, 20 y 30 m/s.

Los resultados se muestran en una gráfica de tamaño/densidad de la partícula vs la relación entre el rango de tamaño máximo sotavento (down-wind) y viento cruzado o transversal (cross-wind) para cada velocidad de viento. (ver tabla 6.7 y Figura 6.6).

De acuerdo a Carey y Sparks (1986), se tomó en cuenta el modelo con los máximos de líticos de 0.8, con una densidad de $2,500 \text{ kg/m}^3$. Para la aplicación de este modelo, utilizamos la información del mapa de isopletas de líticos de 1cm porque es el dato más aproximado con el que se cuenta.

La gráfica arrojó una altura de columna de 11 km, con una velocidad de viento de 24m/s (Tabla 6.7).

Depósito de caída	Isopleta 0.8
dw	8.1
xw	2.7
h (km)	11.0
ws (m/s)	24.0

Tabla 6.7: Datos obtenidos para el cálculo de la altura de la columna eruptiva, xw = cross-wind rango de viento cruzado, dw =down-wind rango de sotavento máximo, h =altura de la columna (Carey y Sparks, 1986).

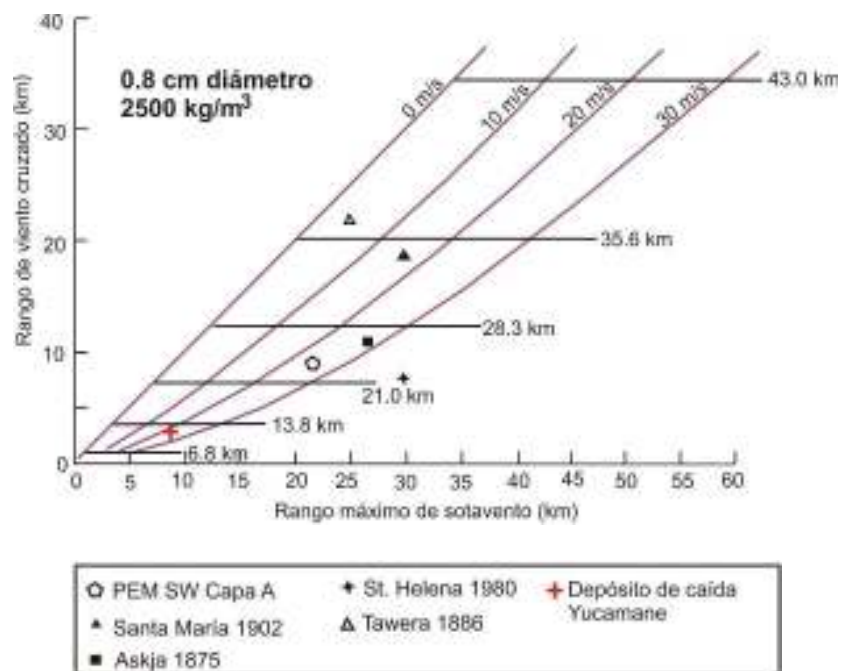


Figura 6.6: Rango de viento cruzado (xw = cross-wind) contra el rango de sotavento máximo (dw =down-wind) para clastos líticos de diámetro de 0.8 cm de diferentes erupciones, comparados con los datos de este trabajo. Las líneas diagonales representan la velocidad del paleoviento (m/s).

6.2 Discusión del modelo eruptivo del depósito de caída de lapilli de pómez

Las unidades A, B y C del depósito de caída son las características particulares de la erupción de hace 3270 del volcán Yucamane que dió origen al depósito de caída de lapilli de pómez del lóbulo SE. Estas características pueden ser explicadas por medio de un modelo (Figura 6.7) con diferentes fases eruptivas.

La erupción comenzó con una actividad de limpieza del conducto volcánico, esta actividad fue de corta duración y dio lugar a la formación del nivel A que se representa por la proporción de líticos muy relevantes (90-100%).

El nivel B presenta una proporción de líticos muy elevada de 50-80% en comparación con el material juvenil (30%), lo que hace suponer que en esta zona el evento alcanzó un nivel de energía alto a tal magnitud de erosionar el conducto como para arrancar fragmentos líticos, el tamaño de lapilli de pómez es de medio a grueso con incremento del tamaño de grano al tope de la unidad, con lo que se puede inferir que el régimen eruptivo incrementó gradualmente su magnitud energética, dado que los tamaños de clastos van aumentando hacia la cima de la unidad.

Posteriormente se incrementó la energía de la erupción dando lugar a la formación del nivel C, es en esta fase que la columna eruptiva pliniana sostenida alcanza 11.0 km. Este nivel representa uno de los eventos plinianos más energéticos de la secuencia lo cual se ve reflejado en el tamaño de lapilli grueso a muy grueso y una tasa de descarga mayor en material juvenil, comparado con los líticos. Durante esta fase la inyección periódica de material juvenil se produjo a conducto abierto, con poca interacción con la roca encajonante.

Al final de la erupción, se habría generado la pérdida de sustentación de la columna eruptiva. El colapso de la columna y la ubicación del flujo piroclástico puede deberse a la geometría del conducto o la forma del cráter. Este flujo se emplazó en dirección NE y NW del volcán. En el estadio final del emplazamiento del flujo, la velocidad de asentamiento de las partículas más finas fue mayor, produciendo una segregación de las bombas hacia la superficie debido a procesos de fluidización (Colin J., 1998). Las bombas muestran alto grado de vesicularidad y presentan una superficie agrietada, causada por el rápido enfriamiento y contracción de la cubierta vidriosa con forma de coliflor y corteza de pan.

La contribución del sistema hidrotermal está evidenciada por la presencia de componentes líticos alterados e hidrotermalizados, concentrados en la parte media a superior del depósito de caída subpliniana en áreas proximales y mediales del depósito.

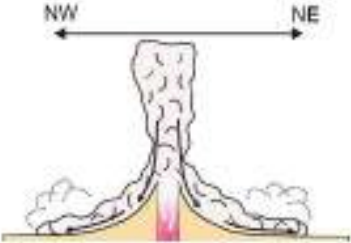

MODO DE ERUPCIÓN	DESCRIPCIÓN
	<p>DEPÓSITO DE FLUJO PIROCLÁSTICO DE PÓMEZ Y CENIZA</p> <p>Un colapso parcial repentino habría originado el flujo piroclástico de pómez y ceniza. Este flujo se emplazó en dirección NE y NW del volcán.</p>
	<p>DEPÓSITO DE CAÍDA DE LAPILLI DE PÓMEZ</p> <p>Nivel C: La columna eruptiva pliniana alcanza 11 km. Durante esta fase la inyección periódica de material juvenil se produjo a conducto abierto, con poca interacción con la roca encajonante.</p> <p>Nivel B: El régimen eruptivo incremento gradualmente su magnitud energética debido a que los clastos presentan gradación inversa hacia la cima de la unidad.</p> <p>Nivel A: La erupción comenzó con una actividad de limpieza del conducto volcánico. Este nivel esta representado por abundantes líticos lávicos frescos (90-100%).</p>

Figura 6.7: Historia y mecanismos eruptivos del depósito de caída de lapilli de pómez.

6.2.1 VEI y tipo de erupción

Para cuantificar las erupciones explosivas se usa el Índice de Explosividad Volcánica (VEI), esta escala fue definida por Newhall y Self (1982). Es una escala compuesta en la que se toman en cuenta diversas características de una erupción como son el volumen de tefra emitido, la altura de la columna eruptiva y la duración de la erupción (tabla 6.8). El VEI tiene una escala de 0 a 8 proporcional al incremento de explosividad.

El volumen estimado del depósito de caída de lapilli de pómez es de $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$, y la altura de la columna eruptiva estimada para la erupción que emplazó dicho depósito es de 11.5 km aproximadamente, y en base a dichos datos, el VEI de la erupción habría sido aproximadamente 3 (Tabla 6.8).

VEI	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción	No explosiva	Pequeña	Moderada	Moderada a grande	Grande	Muy grande	-	-	-
Volumen emitido (m^3)	< 10,000	< 10,000-1,000,000	Uno a diez millones	Diez a cien millones	Cien a mil millones	Uno a diez Km^3	Diez a cien Km^3	Cien a mil Km^3	Más de 1000 Km^3
Altura de la columna (Km)	0.1	0.1-1	1-5	3-15	10-25	Más de 25	-	-	-
Duración en horas)	-1	-1	1-6	1-6	1-12	6-12	Más de 12	-	-

Tabla 6.8: Tabla de Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en Inglés). Adaptado por Newhall y Self (1982).

Los límites entre la erupción estromboliana, subpliniana y pliniana, no han sido todavía definidos consensualmente en la literatura, sin embargo en la tabla 6.9 se muestra una recopilación hecha a partir de Cioni et al. (2000); Carey y Bursik (2000); Newhall y Self et al. (1982). Así entonces el depósito de caída de lapilli de pómez fue emplazado por una erupción subpliniana de IEV 3.

TIPO DE ERUPCIÓN	Sub pliniana	Pliniana	Lapilli de pómez volcán Yucamana	Ref.
Volumen de boca (m^3/s)	100	100-400/100-600	-	1,2
Volumen de eyecta (km^3)	0.05-0.5	0.1-10	0.02	1
VEI	3	3-6	3	3
Altura máxima de columna (h)	<20	20-35	11.5	1

Tabla 6.9: Comparación entre diferentes parámetros de erupciones subplinianas y plinianas, según diferentes autores (Modificada de Cioni et al., 2000). Referencias: 1= Cioni et al. (2000); 2= Carey y Bursik (2000); 3= Newhall y Self (1982).

CONCLUSIONES

1. En base a la historia eruptiva del volcán Yucamane, se han producido al menos 4 erupciones explosivas recientes. Estas erupciones dieron como resultado 3 depósitos de caída de escoria y un depósito de caída de lapilli de pómez asociado a un flujo piroclástico de pómez y ceniza.
2. Los vestigios del depósito de caída de lapilli de pómez se observan en el sector suroriental a una distancia comprendida entre los 2-3 km y los 6-7 km de distancia. En esta zona, los espesores varían entre 50 y 5 cm para las zonas proximales y mediales. El flujo piroclástico de pómez y ceniza en el flanco NE del volcán se extiende hasta 5 km de distancia y en el flanco NW hasta 3 km.
3. Las pómez del depósito de lapilli de pómez son de composición andesítica (61-62% de SiO_2) pertenecientes a la serie calcoalcalina característico en rocas del Plio-cuaternario de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC) ligados a procesos de subducción.
4. En la estratigrafía del depósito de caída de pómez se identificaron tres niveles. El nivel A está compuesto por ceniza fina de color negro y líticos lávicos frescos, indicando limpieza del conducto. El nivel B es de color gris rojizo debido al elevado contenido de líticos oxidados, las pómez y líticos presentan gradación inversa, lo que se puede inferir que el régimen eruptivo incrementó gradualmente su magnitud energética, dado que los tamaños de clastos van aumentando hacia la cima de la unidad. El nivel C es abundante en el contenido de pómez, es decir la inyección de material juvenil se produjo a conducto abierto sin mucha interacción de la roca encajonante.
5. La alta concentración de líticos, especialmente frescos y oxidados, en la parte basal y media del depósito, indican un ensanchamiento del cráter y fuerte erosión del conducto desde el inicio de la erupción, con el consiguiente incremento de la descarga.
6. En base al mapa de isópacas y aplicando el método de Pyle (1989), el volumen estimado para el depósito de caída de lapilli de pómez es $7 \times 10^6 \text{ m}^3$ y el volumen del flujo piroclástico de pómez y ceniza es de $9 \times 10^6 \text{ m}^3$, el volumen total para toda la erupción sería de $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$. Este valor representa el volumen mínimo de material emplazado por esta erupción ya que a este volumen no se le está considerando el volumen de ceniza y tefra depositada en la parte distal.
7. A partir de datos de los mapas de isopleas y utilizando los modelos de Walker & Croasdale y Carey & Sparks, estimamos que la altura de la columna eruptiva alcanzó poco más de 11.5 km aproximadamente.
8. De acuerdo a los cálculos estimados de volumen y altura de columna, el índice de Explosividad Volcánica (VEI) de la erupción habría sido de 3.
9. En base a la distribución de tefra y a las características sedimentológicas del depósito de caída de lapilli de pómez, se debe considerar esta erupción como de tipo subpliniana.

RECOMENDACIONES

El volcán Yucamane es catalogado como volcán activo debido a las emisiones fumarólicas tenues y difusas existentes al interior del cráter y a sus erupciones explosivas recientes, por lo tanto existe la probabilidad que se produzca en el futuro nuevas erupciones explosivas. Por tal razón se recomienda:

1. Elaborar un mapa de peligros para que sea adoptado como medida preventiva por los distritos y pueblos que se encuentran alrededor de este volcán.
2. A las autoridades del Gobierno Regional de Tacna, autoridades municipales y distritales, autoridades de Defensa Civil, instituciones educativas e instituciones científicas y técnicas, coordinar e implementar planes de emergencia local tendientes a mitigar los efectos de una erupción volcánica. Estos planes comprenderían campañas educativas a la población que den a conocer diferentes aspectos del volcán y las medidas a seguir en caso de una eventual erupción volcánica, ya que de esto depende el comportamiento y la colaboración de las comunidades. Estas medidas deberán incluir planes de evacuación.
3. Realizar monitoreo sísmico ya que es una manera de comprobar el estado actual o evolutivo de la actividad del volcán, teniendo estaciones sismológicas telemetradas sobre los flancos, para obtener datos en tiempo real de la actividad diaria del volcán. Con esta vigilancia, se obtendrá información de posible ascenso de magma y se podrá predecir cualquier evento volcánico.
4. Se debe realizar la vigilancia periódica de la temperatura y la química de los gases (fumarolas) que emite el volcán Yucamane.
5. Realizar vigilancia de la deformación (GPS y/o interferometría radar) en los flancos del volcán. Estas técnicas deben ser complementarias y permanentes en el tiempo, ya que ayudarán a predecir posibles eventos de mayor magnitud que permitan alertar a la población.
6. En caso de reactivación del volcán, se recomienda a la población (que permanece en áreas aledañas o alejadas al volcán) evitar contacto con las cenizas, ya que estas causan efectos graves en el sistema respiratorio y visual. Además, se recomienda proteger las fuentes de agua de consumo humano ante la ocurrencia de caída de cenizas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENAVENTE,C.; CARLOTTO,V.; DEL CASTILLO,B. (2010). Extensión en el arco volcánico actual del Sur del Perú. XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos. Sociedad Geológica del Perú, Pub. Esp. N° 9. Cuzco p. 766-769.

CAREY,S. & SPARKS,R. (1986). Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruptions columns. *Bulletin of Volcanology*, v. 48. p. 109-126.

COLIN,J.; BRUCE,F. (1998). Pyroclast Transport and Deposition. Institute of Geological & Nuclear Sciences, *Encyclopedia of Volcanoes*.

COTRINA,G; ORLATE,Y; PEÑA,F; VARGAS,V; SANCHEZ,M; PARI,W. (2009). Hidrogeología de la cuenca del Rio Locumba. *Boletín N°2 Serie H*.

DE LA CRUZ N & DE LA CRUZ O. (2000). Mapa Geológico del Cuadrángulo de Tarata, a escala 1:50,000, INGEMMET.

FIDEL,L.; HUAMANI,A. (2001). Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Yucamane. *Boletín N°26, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*.

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

FIERSTEIN, J. and NATHENSON, M. (1993). "Reply to Coment by WI Rose" *Bulletin of Volcanology*, v. 55, p. 375-378.

FOLK, R. and WARD, V. (1957). *Petrology of Sedimentary rocks*. 182 p. Hemphill, Austin, Text.

FORNARI,M.; BALDELLÓN,E.; ESPINOZA,F.; IBARRA,I.; JIMÉNEZ,N.; MAMANI,M. (2002). Ar-Ar dating of late Oligocene–early Miocene volcanism in the Altiplano, in 5th International Symposium on Andean Geo dynamics. Paris, Institut de recherché pour le développement and Université Paul Sabatier, Extended abstract, p. 223–226.

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.

INEI (2007). Censos Nacionales (XI de Población y VI de vivienda). Resultados definitivos a nivel provincial y distrital: Provincias Tacna, Candarave, Jorge Basadre y Tarata.

JAÉN, H. (1965). Geología del cuadrángulo de Tarata (Hoja 35-v). *Boletín N°11*.

JENKS,W (1948). Geology of the Arequipa quadrangle of the Carta National of Peru, Inst. Geol. of Peru. Bol. N° 9. Lima

KLINCK,B.; ELLISON,R.; HAWKINS,M. (1986). The Geology of the Cordillera Occidental and Altiplano West of Lake Titicaca, Southern Peru. Lima, Perú, Instituto de Geología Minería y Metalurgia, preliminary report, 353 p.

MAMANI,M.; IBARRA,I; CARLIER,G; FORNARI,M. (2004). MAMANI, M., IBARRA, I., CARLIER, G., FORNARI, M. (2004). Petrología y geoquímica del magmatismo alcalino de la zona noroeste del Altiplano peruano (departamento de Puno), in Jacay, J., and Sempere, T., eds., Nuevas Contribuciones del IRD y sus Contrapartes al Conocimiento Geológico del Sur del Perú: Sociedad Geológica del Perú Publicación Especial 5, p. 157–174.

MAMANI,M.; WÖRNER,G.; SEMPERE,T. (2009). Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *GSA Bulletin*; v. 122; p. 162–182.

MARTINEZ, W. y CERVANTES, J. (2003). Rocas ígneas en el Sur del Perú: Nuevos datos geocronométricos, geoquímicos y estructurales entre los paralelos 16° y 18°30' latitud Sur. Boletín N° 26. Serie D: Estudios Regionales. INGEMMET

MERING,C.; HUAMAN,D.; CHOROWICZ,J.; DEFFONTAINES, B.;GUILLANDE,R. (1996). New data on the geodynamics of Southern Peru from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. *Tectonophysics* 259, 153–169.

MORCHE W., ET AL. (1994). Estudio geovolcánico e inventario sistemático de manifestaciones geotermales del lote Tutupaca. INGEMMET, Lima, t. I-3 (Informe interno).

NEWHALL,C.; SELF,S. (1982). The Volcanic Explosivity Index (VEI): An estimate of the explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87(C), 1231–12328.

PAPALE,P. Y ROSI,M. (1993). A case of no-wind plinian fallout at Pululanga Caldera (Ecuador): implications for model of clast dispersal. *Bulletin of Volcanology*, v. 55, p. 523-535.

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

PYLE,D. (1995). "Assessment of the minimum volume of tephra fall deposits" *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 69, p. 379-382.

QUANG,C.; CLARK,A.; LEE,J. (2005). Response of supergene processes to episodic Cenozoic uplift, Pediment erosion, and ignimbrite eruption in the porphyry copper Province of Southern Perú. *Economic Geology* 100, 87–114.

RIVERA,M.& MARIÑO,J. (2004). Volcán Yucamane (Sur del Perú) geología, petrología y evaluación preliminar de las amenazas volcánicas. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* v. 98, p. 7-27.

RIVERA,M.; SAMANIEGO,P.; LIORZOU,C.; GUILLOU,H.; VELA,J. (2014). Geología y evolución del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Resumen XVII Congreso Peruano de Geología.

RODRÍGUEZ-ELIZARRARÁS. (1998). El Campo Volcánico de Las Cumbres al oriente de la Faja Volcánica Trans-Mexicana, estados de Puebla y Veracruz: Evolución geológica y características de

sus principales depósitos piroclásticos. PhD Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y de Posgrado, 263 pp.

ROSE,W.; BONIS,S.; STOIBER,R; KELLER,M; BICKFORD,T. (1973). Studies of volcanic ash from two recent Central America eruptions. *Bulletin of Volcanology*, v. 37, p. 338-364.

ROSI, M.; PALADIO M.; DI MURO A.; LEONI R.; BACOLCOL T. (2001). Fall vs flow activity during the 1991 climatic eruption of Pinatubo Volcano (Philippines). *Bulletin of Volcanology*, v. 62, p. 549-566.

ROSI,M.; VEZZOLI,L.; CASTELMENZANO,A.; GRIECO,G. (1999). Plinian pumice fall deposit of the Campanian Ignimbrite eruption Phlegraean Fields, Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal*.

SANDEMAN,H.; CLARK, A.; FARRAR,E. (1995). An integrated tectono-magmatic model for the evolution of the southern Peruvian Andes (13°–20° S) since 55 Ma. *International Geology Review*, v. 37, p. 1039–1073.

SARNA-WOJCICKI A.; SHIPLEY, S; WAIT R; DZURISIN,D; WOOD,S. (1981). Areal distribution, thickness, mass, volume, and grain size of 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.

SEMPERÉ,T.; JACAY,J. (2008). Anatomy of the Central Andes: distinguishing between western, magmatic Andes and eastern, tectonic Andes. 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008, Nice), Extended Abstracts: 504 – 507.

SPARKS, R. (1986). The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. *Bull Volcanol* 48:3-15

TAYLOR, H. (1986). Igneous rocks: II. Isotopic case studies of circumpacific magmatism. In Stables Isotopes in high temperature geological processes. Valley, J.W., Taylor, H.P., O'Neil, J.R., editors. Mineralogical Society of America. *Reviews in Mineralogy* 16, 273–285.

TOSDAL,R.; FARRAR,E.; CLARK,A. (1981). K-Ar geochronology of the late Cenozoic volcanic rocks of the Cordillera Occidental, southernmost Peru: *Journal of Volcanology and Geothermal. Research*, v.10, p. 157-173.

WALKER,G. (1971). Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. *J. Geol.* 79, p. 696-714.

WALKER,G; CROASDALE,R. (1971). Two plinian-type eruptions in the Azores. *J Geol Soc London* 127:17-55.

WASTENEYS,H. (1990). Epithermal Silver Mineralization with a Mid-Tertiary Diatreme: Santa Bárbara, Santa Lucía District, Puno, Peru [Ph.D. thesis] Kingston , Ontario, Canada, Queen's University, 367 p.

WILSON,L. (1980). Relationships between pressure, volatile content and ejecta velocity in three types of volcanic explosion. *J Volcanol Geotherm Res* 8:297-313.

WILSON,J. ; GARCIA,W. (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca. Carta Geolol. Nac. Vol. 1, N°. 4-Lima.

WILSON,L.; SPARKS, R.; WALKER, G. (1980) Explosive Volcanic Eruptions IV. The control of magma properties and conduit geometry on eruption column behaviour. Geophys J R Astr Soc 63:117-148.

WOHLETZ,K.; SHERIDAN,M. and BROWN,W. (1989). Particle size distributions and the sequential fragmentation/transport theory applied to volcanic ash, J. Geophys. Res., 94(B11), 15,703–15,721, doi:10.1029/JB094iB11p15703.

ZAMÁCOLA, J. (1888). Apuntes para la historia de Arequipa. Año de 1804. Arequipa: Imp. de La Bolsa, 98

RELACIÓN DE FIGURAS

- Figura 1.1:** Complejo volcánico Yucamane localizado a 11 km al NE de la ciudad de Candarave.
- Figura 1.2:** Mapa de localización de la zona de estudio.
- Figura 1.3:** Ubicación de centros poblados rurales y urbanos del distrito de Candarave.
- Figura 1.4:** Mapa de subcuencas de la cuenca del río Locumba (Cotrina et al., 2009).
- Figura 1.5:** Mapa de Isoyetas de la cuenca del río Locumba (Cotrina et al., 2009).
- Figura 2.1:** Afloramiento de areniscas de la formación Labra a 11 km al Sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes, en la margen izquierda del río Callazas.
- Figura 2.2:** Afloramiento de lavas con intercalaciones de rocas sedimentarias de la formación Toquepala, en la laguna Aricota a 17 km al Sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes.
- Figura 2.3:** Afloramiento de lavas y flujos piroclásticos del Grupo Tacaza, en el cerro Estrone a 10 km al suroeste del complejo volcánico Yucamane-Calientes.
- Figura 2.4:** Ignimbritas riolíticas de color rosáceo tenue Formación Huaylillas emplazadas en el pueblo de Jirata.
- Figura 2.5:** Volcán Lopez extraña al este del complejo volcánico Yucamane-Calientes.
- Figura 2.6:** Morrenas en el flanco occidental del volcán Yucamane.
- Figura 2.7:** Mapa de estructuras tectónicas y lineamientos regionales (modificado de Morche et al., 1994; Martínez et al., 2003; Semperé et al., 2008; Benavente et al., 2010).
- Figura 2.8:** Flanco oeste del Complejo Volcánico Yucamane-Calientes. En el extremo derecho el volcán Yucamane y a su izquierda el volcán Calientes.
- Figura 2.9:** Mapa geológico del volcán Yucamane (Tacna) y sus alrededores.
- Figura 2.10:** Depósito Blast a 9 km al SW del volcán Yucamane.
- Figura 2.11:** Flujos de lava dacíticos y andesíticos “Yucamane III” en el cono superior del volcán Yucamane.
- Figura 2.12:** a) Depósito de caída de escoria a 4 km al sureste del cráter del volcán Yucamane. b) Depósito de caída de lapilli de pómez a 3.5 km al sureste del cráter del volcán Yucamane.
- Figura 3.1:** a) Depósito de caída Halloween Inferior y Escoria parda 6 km al sureste del cráter. b) Depósito de caída Halloween Superior y depósito de caída de lapilli de pómez 3 km al sureste del cráter.
- Figura 3.2:** Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza a 4 km al NE del cráter.
- Figura 3.3:** Sección del depósito de caída Halloween Inferior a 5 km al sureste del cráter.
- Figura 3.4:** Mapa de isópacas del depósito Halloween inferior donde se muestra la variación del espesor con la distancia.
- Figura 3.5:** Sección del depósito de caída de escoria parda a 4 km al sureste del cráter.
- Figura 3.6:** Mapa de isópacas del depósito Escoria parda donde se muestra la variación del espesor con la distancia.
- Figura 3.7:** Sección del depósito de caída Halloween superior a 3.5 km al sureste del cráter.
- Figura 3.8:** Mapa de isópacas del depósito Halloween superior. piroclástico de pómez y ceniza rico en bombas. B) Bomba “corteza de pan”, y c) Bomba “coliflor”.
- Figura 3.9:** Límites de los sectores proximal, medial y distal del depósito.
- Figura 3.10** a) Depósito de caída al pie del flanco este del estratovolcán Yucamane, b) Calicata en el depósito de caída a 2 km del cráter, donde se muestran los 3 niveles.
- Figura 3.11** a) Vista panorámica del depósito de caída en una quebrada a 5.5 km al sureste del cráter. b) Niveles del depósito de caída visto en una quebrada.
- Figura 3.12:** Sección modelo del depósito de caída de lapilli de pómez a 2.5 km al este del cráter.
- Figura 3.13:** Ubicación de las secciones en el sector proximal y medial del depósito.

Figura 3.14: Correlación estratigráfica del depósito de caída de lapilli de pómez en el sector proximal.

Figura 3.15: Correlación estratigráfica del depósito de caída de lapilli de pómez en el sector medial.

Figura 3.16: Flanco oriental, vista al NE del volcán Yucamane, pampa cubierta por flujo piroclástico de pómez y ceniza rico en bombas.

Figura 3.17: a) Foto tomada a 4.8 km al NE del cráter. b) Sección estratigráfica del depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza.

Figura 3.18: a) Bomba “corteza de pan”, b) Bomba “coliflor” al tope del depósito.

Figura 3.19: a) Flanco occidental del volcán Yucamane. b) Vista del flujo piroclástico de pómez en el flanco occidental. c) Sección estratigráfica del depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza en el flanco occidental.

Figura 4.1: Ubicación de la muestras utilizadas para el estudio granulométrico.

Figura 4.2: Histograma de frecuencias (Folk e Inman).

Figura 4.3: Curva de frecuencias (Folk e Inman).

Figura 4.4: Mediana y Media en la muestra Yu-JV-66.

Figura 4.5: a) Asimetría positiva en la muestra Yu-Jv-08, b) Asimetría negativa en la muestra Yu-Jv-58.

Figura 4.6: Tipos de kurtosis (KG) en las curvas de frecuencia.

Figura 4.7: a) Histograma de frecuencia en la muestra Yu-Jv-21, b) Curva de frecuencia en la muestra Yu-Jv-21.

Figura 4.8: a) Histograma de frecuencia en la muestra Yu-Jv-58, b) Curva de frecuencia en la muestra Yu-Jv-58.

Figura 4.9: a) Histograma de frecuencia en la muestra Yu-Jv-08, b) Curva de frecuencia en la muestra Yu-Jv-08.

Figura 4.10: a) Histograma de frecuencia en la muestra Yu-Jv-12, b) Curva de frecuencia en la muestra Yu-Jv-12.

Figura 4.11: a) Histograma de frecuencia en la muestra Yu-Jv-66, b) Curva de frecuencia en la muestra Yu-Jv-66.

Figura 4.12: Características granulométricas del depósito de caída de pómez, ploteadas en el diagrama de Walker (1971). En la abscisa la Mediana ($Md \phi$) expresado en unidades phi (tamaño de grano que corresponde al 50% de la población). En el eje de la ordenada el índice de sorteo ($\sigma\phi$) en unidades phi (según Inman, 1952).

Figura 4.13: a) Pómez de la fracción 8 mm (muestra Yu-Jv-20); b) Pómez de la fracción 2 mm (muestra Yu-Jv-20).

Figura 4.14: Líticos de la fracción 2 mm (muestra Yu-Jv-51). A) Líticos lávicos frescos; b) Líticos lávicos oxidados; c) Líticos hidrotermalizados.

Figura 4.15: Cristales de la fracción 0.5 mm (muestra Yu-Jv-28). A) Cristales de plagioclasa y vidrio b) cristales de anfíbol y biotita.

Figura 4.16: Composición porcentual de fragmentos en el sector proximal para la malla 8mm.

Figura 4.17: Composición porcentual de los componentes de la caída subpliniana en el sector proximal, malla 2 mm.

Figura 4.18: Composición porcentual de los componentes de la caída subpliniana en el sector proximal, malla 0.5 mm.

Figura 4.19: Composición porcentual de fragmentos en el sector medial para la malla 8mm.

Figura 4.20: Composición porcentual de fragmentos en el sector medial para la malla 2mm.

Figura 4.21: Composición porcentual de fragmentos en el sector medial para la malla 0.5mm.

Figura 5.1: Ubicación de la muestras utilizadas para el estudio petrográfico y geoquímico.

Figura 5.2: Fotografías de las secciones delgadas de las pómez del depósito de caída subpliniana. En lado izquierdo está en luz natural y en el lado derecho está en luz polarizada. Las imágenes “a y b” muestran el intercrecimiento de cristales de plagioclasas (plg), de forma euhedral. Las figuras “c y d” muestran una plagioclasa con zonación concéntrica, fracturada y con inclusión de anfíbol. Las imágenes “e y f” muestran una corona de reacción en la plagioclasa (plg), textura “sieve”.

Figura 5.3: a,b) Agregado de fenocristales de anfíbol de hábitos subhedral. c,d) Fenocristal de 91anfíbol rodeado por óxidos de Fe y Ti. e,f) Anfíbol (anf) anhedral con textura “black” en una matriz con microfenocristales de plagioclasa (plg) y anfíbol (anf).

Figura 5.4: a,b) Cristal de biotita (bt) subhedral con inclusión de microfenocristales de plagioclasa (plg). Este cristal presenta bordes de óxidos de Fe-Ti. c,d) Se observa una biotita (bt) subhedral con intercrecimiento e inclusión de plagioclasa (plg) y óxidos de Fe y Ti, la plagioclasa (plg) es anhedral a subhedral y presenta macla polisintética.

Figura 5.5: a,b) Se observa ortopiroxenos anhedrales con bordes corroídos e inclusiones de óxidos de Fe y Ti. c,d) Se observa agregado de microfenocristales de ortopiroxenos subhedral, un fenocristal de anfíbol anhedral y óxidos de Fe y Ti.

Figura 5.6: Clasificación de la pómez en el diagrama TAS (“total álcalis vs sílice”)

Figura 5.7: Definición de la serie calco-alcalina en el diagrama triangular AFM de las pómez

Figura 5.8: Diagrama K_2O vs. SiO_2 de Peccerillo y Taylor (1976), que muestra las rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes son fuertemente potásicos.

Figura 6.1: Mapa de isópacas del depósito de caída de lapilli de pómez donde se muestra la variación del espesor con la distancia respecto al cráter.

Figura 6.2: Gráfico $\ln(T)$ vs $A^{1/2}$

Figura 6.3: Mapa de isoplejas de pómez, se muestra el tamaño de las pómez más grandes en el depósito de caída de lapilli de pómez.

Figura 6.4: Mapa de isoplejas de líticos, se muestra el tamaño de los líticos más grandes en el depósito de caída de lapilli de pómez.

Figura 6.5: a) Área de las isoplejas de pómez vs la dimensión del mismo clasto, se ha considerado una densidad de 1000 kg/m^3 , b) Área de las isoplejas de líticos vs la dimensión del mismo clasto, se ha considerado una densidad de 2500 kg/m^3 .

Figura 6.6: Rango de viento cruzado (xw= cross-wind) contra el rango de sotavento máximo (dw=down-wind) para clastos líticos de diámetro de 0.8 y 1.6 cm de diferentes erupciones, comparados con los datos de este trabajo. Las líneas diagonales representan la velocidad del paleoviento (m/s).

Figura 6.7: Historia y mecanismos eruptivos del depósito de caída de lapilli de pómez.

TABLAS

Tabla 1.1: Accesos al complejo volcánico Yucamane-calientes.

Tabla 1.2: Población urbana de la provincia y distrito de Candarave. Basado en: XI censo de población y VI censo de vivienda, 2007. Censos Nacionales.

Tabla 1.3: Población rural de la provincia y distrito de Candarave. Basado en: XI censo de población y VI censo de vivienda, 2007. Censos Nacionales.

Tabla 4.1: Pesos parciales y porcentajes acumulados, para el análisis granulométrico del depósito de lapilli de pómez en el sector proximal.

Tabla 4.2: Pesos parciales y porcentajes acumulados, para el análisis granulométrico del depósito de lapilli de pómez en el sector proximal.

Tabla 4.3: Pesos parciales y porcentajes acumulados, para el análisis granulométrico del depósito de lapilli de pómez en el sector medial.

Tabla 4.4: Parámetros estadísticos en el sector proximal.

Tabla 4.5: Parámetros estadísticos en el sector medial.

Tabla 4.6: Resultados del conteo litológico en la fracción 8 mm del sector proximal, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.16

Tabla 4.7: Resultados del conteo litológico en la fracción 2 mm del sector proximal, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.17

Tabla 4.8: Resultados del conteo litológico en la fracción 0.5 mm del sector proximal, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.18

Tabla 4.9: Resultados del conteo litológico en la fracción 8 mm del sector medial, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.19

Tabla 4.10: Resultados del conteo litológico en la fracción 2 mm del sector medial, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.20

Tabla 4.11: Resultados del conteo litológico en la fracción 0.5 mm del sector medial, estos datos están representados gráficamente en la figura 4.21

Tabla 4.12: Cuadro comparativo de componentes entre sectores según el tamaño de grano.

Tabla 6.1: Coordenadas y espesores del depósito de caída.

Tabla 6.2: Área y espesor de las isópacas.

Tabla 6.3: Valores promedio de las dimensiones de MP considerados para la elaboración del mapa de isoplefas de pómez.

Tabla 6.4: Valores promedio de las dimensiones de los ML del depósito de caída.

Tabla 6.5: Valores de MP y área de las isoplefas de pómez.

Tabla 6.6: Valores de ML y área de las isoplefas de líticos.

Tabla 6.7: Comparación de los datos obtenidos para el cálculo de la altura de la columna eruptiva, xw = cross-wind rango de viento cruzado, dw =down-wind rango de sotavento máximo, h =altura de la columna (Carey y Sparks, 1986).

Tabla 6.8: Tabla de Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en Inglés) Adaptado de Newhall (1982).

Tabla 6.9: Comparación entre diferentes parámetros de erupciones subplinianas y plinianas, según diferentes autores (Modificada de Cioni et al., 2000). Referencias: 1= Cioni et al. (2000); 2= Carey y Bursik (2000); 3= Newhall y Self (1982).

ANEXO A

SECTOR PROXIMAL

SECCIÓN: S-1

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8100634 N
 374880 E
 4482 msnm
 ESPESOR: 40 cm



Vista del depósito a 2.63 km al noreste del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
40		C	20	Depósito de caída de lapilli de pómez, sin gradación y con buen sorteo. Abundante contenido de pómez (80%) de color verde claro, con diámetros de 12 a 15 cm. Las vesículas son milimétricas y tienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. En esta capa los líticos (oxidados y lávicos) disminuyen (20%). En el techo del depósito se encuentran balísticos de pómez.
20		B	15	Depósito de caída de lapilli de pómez con moderada gradación inversa y buen sorteo. El contenido de pómez es de 40%, estas son de color gris verdoso y tienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Depósito con alto contenido de líticos lávicos (60%). Los líticos son de tres tipos: lávicos oxidados, frescos e hidrotermalizados. Los líticos lávicos oxidados y frescos son densos, los líticos oxidados son de color marrón a rojizo y los líticos frescos son negros de textura afanítica. Los líticos hidrotermalizados son deleznable y blanquecinos.
0		A	5	Depósito de ceniza fina de color negro con alto contenido de líticos lávicos frescos (90%). Presenta gradación inversa con buen sorteo.

SECCION: S-2

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8099999 N
 374742 E
 4474 msnm
 ESPESOR: 55 cm

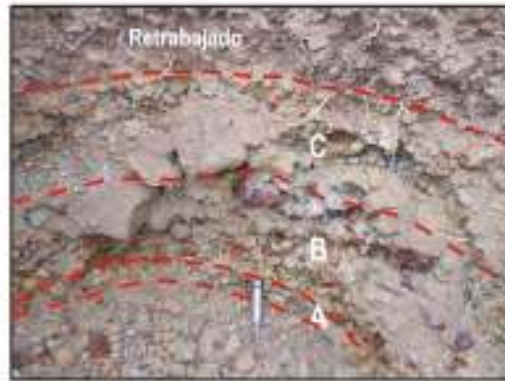


Vista del depósito a 2.5 km al este del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
55		C	21	Depósito de caída de lapilli de pómez, depósito sin gradación, con moderado a buen sorteo. Abundante contenido de pómez (90%), las vesículas son esféricas y contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Los líticos lávicos oxidados disminuyen a un 10%. Los balísticos de pómez se encuentran al tope de la capa, son muy vesiculadas y tienen diámetros de hasta 25 cm.
50				
0	A	6	Depósito de líticos lávicos frescos de grano medio (95%) y ceniza fina (5%). Presenta gradación inversa con buen sorteo.	

SECCIÓN: S-3

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8099401 N
 375027 E
 4338 msnm
 ESPESOR: 51 cm

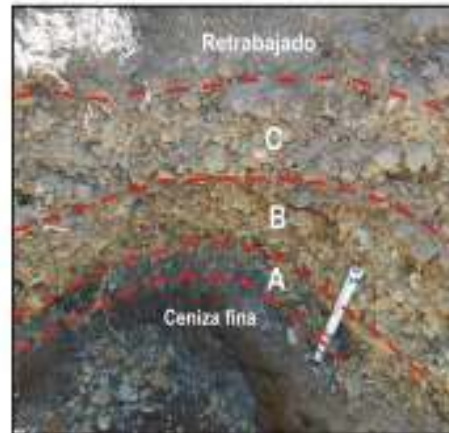


Vista del depósito a 2.77 km al este del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	CAPA	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
51		C	21	Depósito de caída de lapilli de pómez, depósito sin gradación y con buen sorteo. El contenido de pómez es de 70-80%, las pómez tienen diámetros entre 15 y 25 cm. Las pómez presentan vesículas milimétricas y contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Los líticos lávicos (oxidados y frescos) son densos y constituyen el 20-30%. Al tope de la capa se encuentran algunos balísticos de pómez.
40				Depósito de caída de lapilli de pómez con gradación inversa y buen sorteo. El contenido de pómez es de 35%. La pómez es subangular, de color gris verdoso y fuertemente vesiculada. En la base y tope de la capa hay abundantes líticos oxidados (55%). Los líticos frescos e hidrotermalizados constituyen un 10%. Presencia esporádica de balísticos de pómez y balísticos lávicos oxidados, al tope de la capa. Los balísticos de pómez son porfíricos y miden hasta 15 cm, los balísticos de líticos son afaníticos y miden hasta 10 cm de diámetro.
30				Depósito de líticos lávicos frescos de grano medio (100%). Presenta gradación inversa con buen sorteo.
20		B	25	
10		A	5	
0				

SECCIÓN: S-4

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8099048 N
 375031 E
 4311 msnm
 ESPESOR: 39 cm



Vista del depósito a 2.85 km al este del cráter




(cm)	LITOSTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
30		C	17	Depósito de caída de lapilli de pómez, sin gradación y con sorteo moderado. Abundante contenido de pómez (70%), de grano grueso, con abundantes vesículas esféricas, su textura es porfirítica y los fenocristales son de plagioclasa, anfíbol y biotita. En esta capa los liticos oxidados se encuentran ente 20 y 30%.
20		B	17	Depósito de caída de lapilli de pómez con moderada gradación inversa y buen sorteo. El contenido de pómez es de 25%, son de grano medio, de color gris verdoso y tienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. El contenido de liticos lávicos oxidados es de 60%, los lávicos frescos 10% y los hidrotermalizados 5%. Los liticos lávicos oxidados son densos y tienen colores rojizos y marrones, los lávicos frescos son afaníticos y de tonos grises, los liticos hidrotermalizados son delzables y de tonos amarillos y blanquecinos.
10		A	5	Depósito de liticos lávicos frescos (95%) y liticos lávicos oxidados (5%), el diámetro de los liticos es menor a 0.5 cm. Presenta gradación inversa y el sorteo es muy bueno.
0				

SECCIÓN: S-5

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8098411 N
 375240 E
 4145 msnm
 ESPESOR: 30 cm

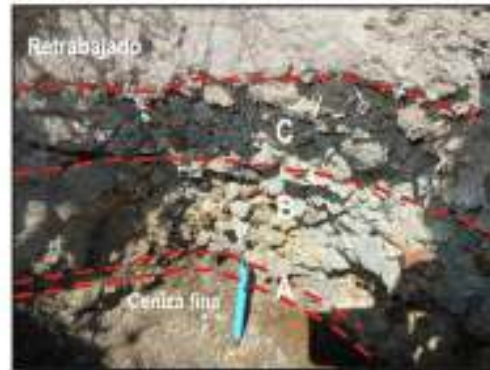


Vista del depósito a 3.28 km al sureste del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
30		C	11	Depósito de caída de lapilli de pómez, depósito sin gradación y con moderado sorteo. Abundante contenido de pómez (60%), son de color verde claro en fractura fresca y algunas tienen tonos amarillentos por la erosión. Disminuye el contenido de líticos oxidados entre 30 y 40% y los lávicos frescos 5%.
20		B	16	Depósito de caída de lapilli de pómez con moderada gradación inversa y sorteo moderado, con soporte de clastos angulosos a subangulosos. El contenido de pómez es de 15 a 20%, la pómez es de color gris verdoso y en las vesículas presentan cristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Los líticos lávicos oxidados son abundantes (80%).
10		A	3	Depósito de líticos lávicos frescos (100%). Presenta gradación inversa, el sorteo es muy bueno.
0				

SECCIÓN: S-6

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8100269 N
 375350 E
 4377 msnm
 ESPESOR: 25 cm



Vista del depósito a 3 km al noreste del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
25		C	10	Depósito de caída de lapilli de pómez, depósito sin gradación y buen sorteo. Abundante contenido de pómez (70-80%). Las pómez tienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. En esta capa los líticos (oxidados y lávicos) se encuentran entre 10-20%. En el techo del depósito se encuentran balísticos de pómez con diámetros hasta 15 cm.
10		B	12	Depósito de caída de lapilli de pómez, sin gradación y buen sorteo. El contenido de pómez es de 50% y son de color gris verdoso. Los líticos lávicos oxidados y frescos constituyen el 50%. Los líticos lávicos oxidados son densos y los frescos tienen textura afanítica.
0		A	3	Depósito de ceniza fina de color negro con alto contenido de líticos lávicos frescos.

SECCIÓN: S-7

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8099574 N
 375712 E
 4261 msnm
 ESPESOR: 35 cm

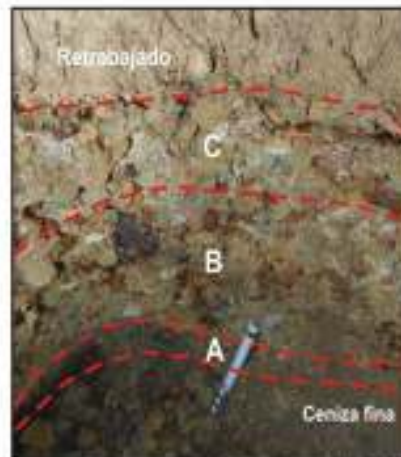


Vista del depósito a 3.40 km al este del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
35		C	14	Depósito de caída de lapilli de pómez, sin gradación y buen sorteo. La pómez tiene un 70%, es muy vesiculada y porfírica. Los fenocristales son de plagioclasa, anfíbol y biotita. Los líticos lávicos oxidados y frescos (30%) se encuentran principalmente en la base y tope del depósito.
20				Depósito de caída de lapilli de pómez, con buena gradación inversa y buen sorteo. El contenido de pómez es de 30%, con moderada vesicularidad y de color gris verdoso. Depósito enriquecido de líticos lávicos oxidados (60%), los líticos lávicos frescos e hidrotermalizados constituyen el 10%.
10				Depósito de líticos lávicos frescos de grano medio (95%) y ceniza fina (5%).
0		A	5	

SECCIÓN: S-8

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8098777 N
 375748 E
 4143 msnm
 ESPESOR: 35 cm



Vista del depósito a 3.60 km al este del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN		
35		C	13	Depósito de caída de lapilli de pómez, depósito sin gradación y con moderado sorteo. El contenido de pómez es de 80%. La pómez es fibrosa, vesiculada, su textura es porfirítica y los fenocristales son de plagioclasa, anfíbol y biotita. Los líticos oxidados y frescos (20%) son masivos y afaníticos.		
20				B	17	Depósito de caída de lapilli de pómez con moderada gradación inversa y moderado sorteo. El contenido de pómez es de 40%. La pómez es vesiculada y de color gris verdoso. El contenido de líticos lávicos oxidados es de 50%, los lávicos frescos 8-10% y los hidrotermalizados hasta 2%.
0				A	5	Depósito de ceniza y líticos lávicos frescos. Presenta gradación inversa y el sorteo es muy bueno.

SECCIÓN: S-9

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8098016 N
 375873 E
 4021 msnm
 ESPESOR: 25 cm



Vista del depósito a 3.97 km al sureste del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
25		C	10	Depósito de caída de lapilli de pómez, sin gradación y con moderado sorteo. El contenido de pómez es de 80%. La pómez es fibrosa, vesiculada, los fenocristales son de plagioclasa, anfíbol y biotita. Los lílicos oxidados y frescos (20%) son masivos y afaníticos.
20		B	14	Depósito de caída de lapilli de pómez con gradación inversa, con soporte de clastos angulosos a subangulosos. La pómez se encuentra entre 30-40%, de color gris verdoso y en las vesículas presentan cristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Los lílicos lávicos oxidados se encuentran entre 60-70% y los lílicos frescos entre 5-10%.
0		A	1	Fina capa de lílicos lávicos frescos con gradación inversa

SECTOR MEDIAL

SECCIÓN: S-10

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8099740 N
 376724 E
 4216 msnm
 ESPESOR: 10 cm



Vista del depósito a 4.40 km al este del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
10		C	9	Depósito de caída de lapilli de pómez, sin gradación y sorteo bajo a moderado. Abundante pómez (90%). La pómez es vesiculada, los fenocristales son de plagioclasa, anfíbol y biotita. Bajo contenido de líticos oxidados (10%), son densos y de color marrón.
0		A	1	Fine capa de líticos lávicos frescos con gradación inversa.

SECCIÓN: S-11

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8099176 N
 377045 E
 4159 msnm
 ESPESOR: 16 cm



Vista del depósito a 4.80 km al este del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
16		C	9	Depósito de caída de lapilli de pómez, sin gradación y moderado sorteo. El contenido de pómez es de 70%. La pómez es vesiculada, los fenocristales son de plagioclasa, anfíbol y biotita. Los líticos oxidados y lávicos (30%) son subangulosos y afaníticos.
8		B	6	Depósito de caída de lapilli de pómez con gradación inversa. El contenido de pómez es de 40%, la pómez es de color gris verdoso. Los líticos lávicos oxidados se encuentran entre 40-50% y los líticos frescos 10%.
0		A	1	Fine capa de líticos lávicos frescos con gradación inversa.

SECCIÓN: S-12

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8098257 N
 376947 E
 4060 msnm
 ESPESOR: 20 cm



Vista del depósito a 4.92 km al sureste del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
20		C	10	Depósito de caída de lapilli de pómez, sin gradación y moderado sorteo. El contenido de pómez es de 80%. La pómez es vesiculada, los fenocristales son de plagioclasa, anfíbol y biotita. Los líticos oxidados y frescos son densos y disminuyen a un 20%.
10		B	9	Depósito de caída de lapilli de pómez sin gradación y mala selección. El contenido de pómez es de 40%, la pómez es vesiculada. Los líticos lávicos oxidados se encuentran entre 50-60% y los lávicos frescos en un 5%.
0		A	1	Fina capa de líticos lávicos frescos.

SECCIÓN: S-13

MUESTRA: Lapilli de pómez
 SECTOR: Proximal
 UBICACIÓN: Pampa Cambaya
 8097490 N
 377262 E
 4075 msnm
 ESPESOR: 10 cm

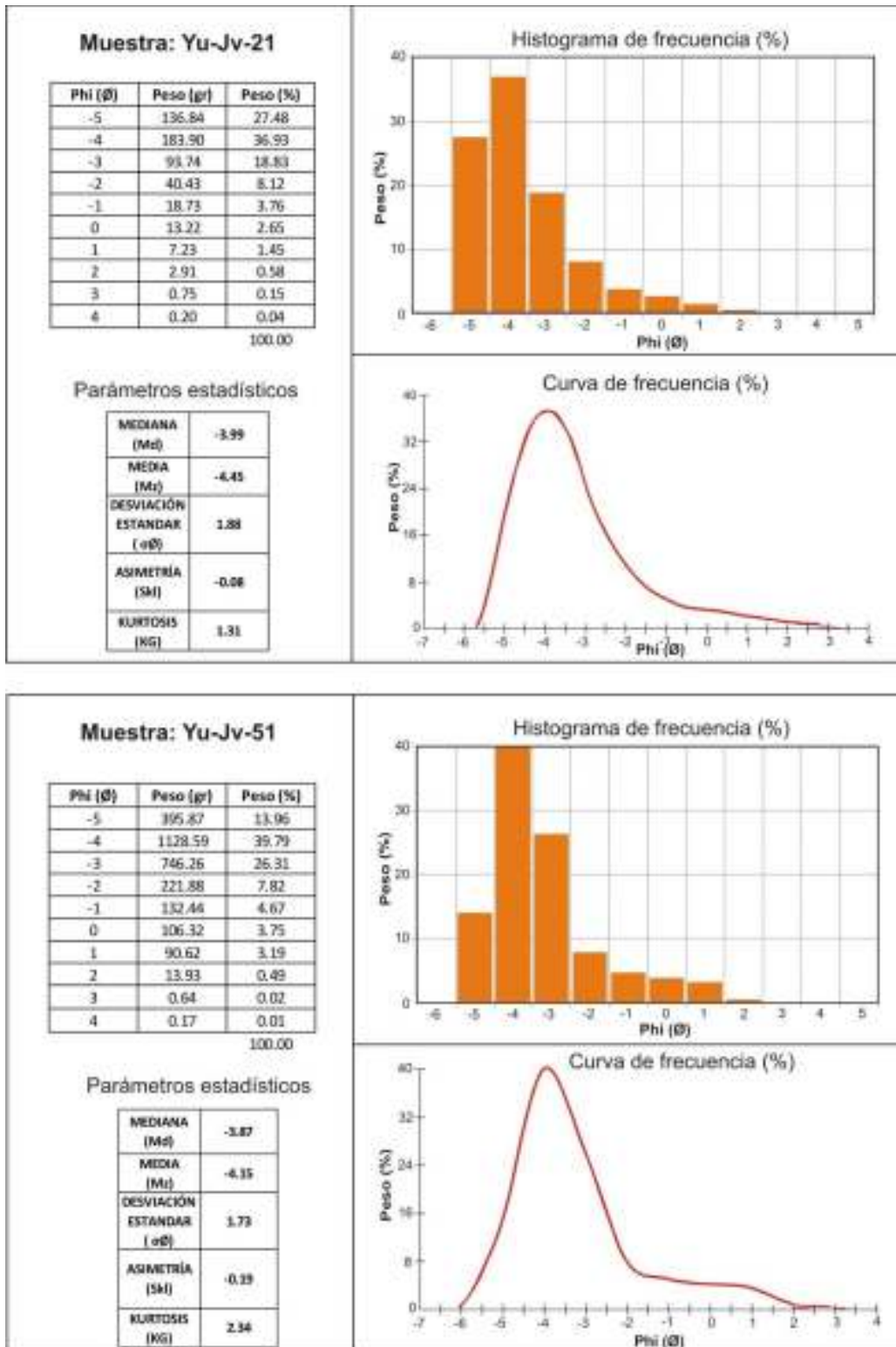


Vista del depósito a 5.46 km al sureste del cráter

(cm)	LITOESTRATIGRAFÍA	NIVEL	ESPESOR (cm)	DESCRIPCIÓN
10		C	9	Deposito de caída de lapilli de pómez, sin gradación y sorteo bajo a moderado. Abundante pómez (90%). La pómez es vesiculada, los fenocristales son de plagioclasa, anfíbol y biotita. Bajo contenido de líticos oxidados y lávicos (10%), son densos y se presentan principalmente al tope del depósito.
0		A	1	Fina capa de líticos lávicos frescos.

ANEXO B

SECTOR PROXIMAL



Muestra: Yu-Jv-20

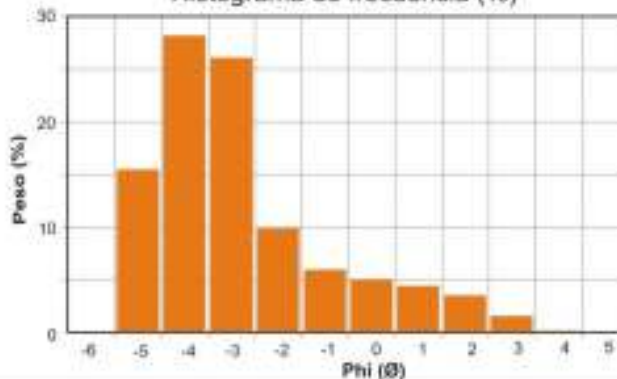
Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	346.99	15.49
-4	632.62	28.25
-3	585.89	26.16
-2	221.35	9.88
-1	132.35	5.91
0	111.84	4.99
1	95.41	4.26
2	75.29	3.36
3	33.46	1.49
4	3.42	0.15
5	1.08	0.05

100.00

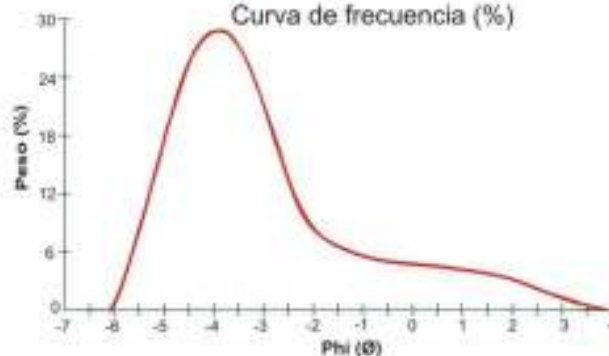
Parámetros estadísticos

MEDIANA (Md)	-3.70
MEDIA (Mz)	-3.85
DESVIACIÓN ESTANDAR (σ)	1.65
ASIMETRÍA (Sk)	-0.09
KURTOSIS (K _G)	1.23

Histograma de frecuencia (%)



Curva de frecuencia (%)



Muestra: Yu-Jv-30

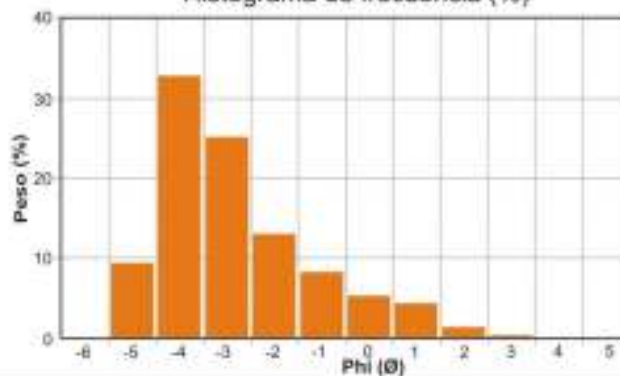
Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	47.02	9.40
-4	164.05	32.78
-3	125.58	25.10
-2	65.11	13.01
-1	41.44	8.28
0	26.56	5.31
1	21.96	4.39
2	6.82	1.36
3	1.60	0.32
4	0.26	0.05

100.00

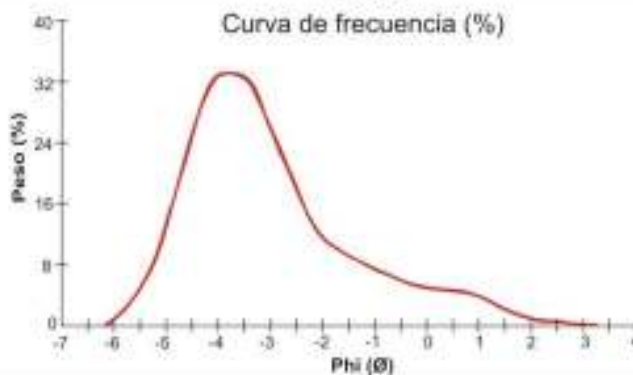
Parámetros estadísticos

MEDIANA (Md)	-3.66
MEDIA (Mz)	-3.75
DESVIACIÓN ESTANDAR (σ)	1.60
ASIMETRÍA (Sk)	-0.12
KURTOSIS (K _G)	1.25

Histograma de frecuencia (%)



Curva de frecuencia (%)



Muestra: Yu-Jv-55

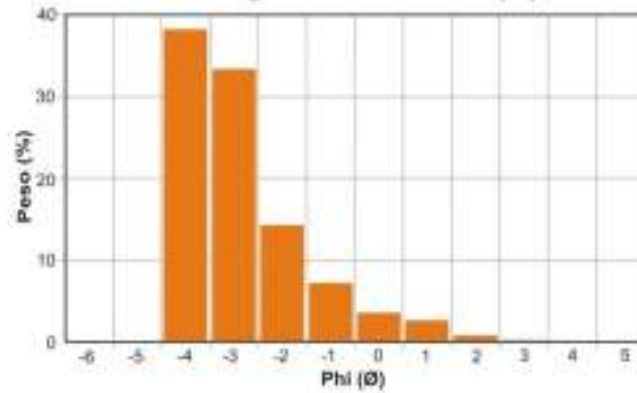
Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	0	0
-4	211.87	38.24
-3	184.83	33.36
-2	79.17	14.29
-1	39.69	7.16
0	19.32	3.49
1	14.24	2.57
2	4.03	0.73
3	0.85	0.15
4	0.09	0.02

100.00

Parámetros estadísticos

MEDIANA (Md)	-3.60
MEDIA (Mz)	-3.75
DESVIACIÓN ESTANDAR ($\sigma\phi$)	1.50
ASIMETRÍA (SM)	-0.04
KURTOSIS (KG)	1.83

Histograma de frecuencia (%)



Curva de frecuencia (%)



Muestra: Yu-Jv-58

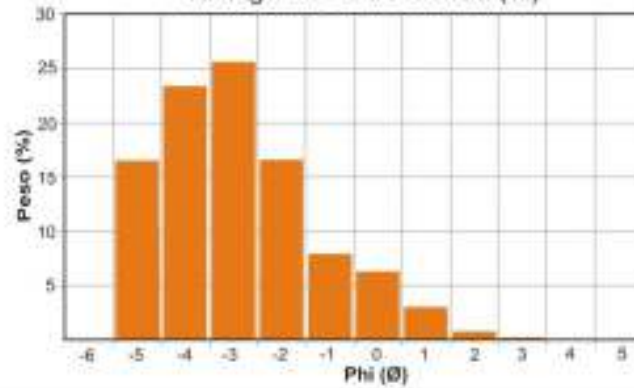
Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	85.40	16.50
-4	120.70	23.32
-3	132.43	25.58
-2	85.59	16.53
-1	40.70	7.86
0	32.58	6.29
1	15.52	3.00
2	3.83	0.74
3	0.86	0.17
4	0.08	0.02

100.00

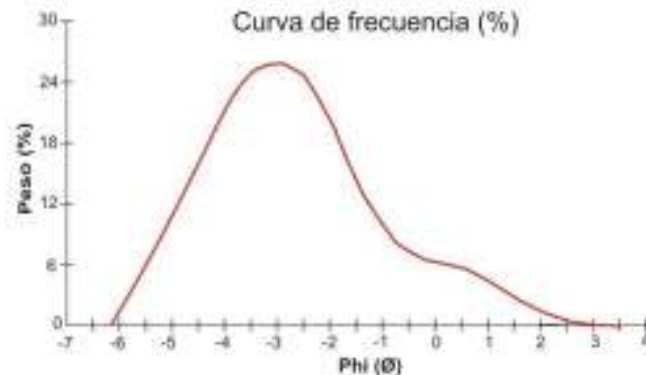
Parámetros estadísticos

MEDIANA (Md)	-3.33
MEDIA (Mz)	-3.70
DESVIACIÓN ESTANDAR ($\sigma\phi$)	1.85
ASIMETRÍA (SM)	-0.27
KURTOSIS (KG)	1.02

Histograma de frecuencia (%)



Curva de frecuencia (%)

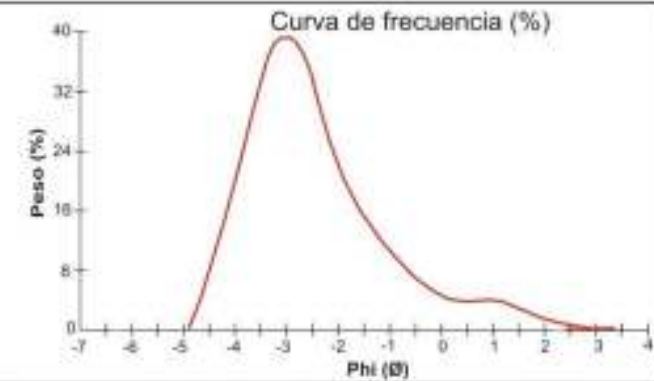
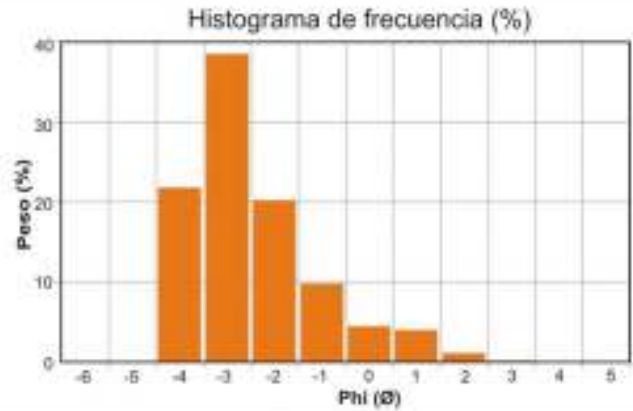


Muestra: Yu-Jv-53

Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	0	0
-4	144.88	21.76
-3	256.31	38.50
-2	134.76	20.24
-1	64.79	9.73
0	29.67	4.46
1	26.56	3.99
2	7.09	1.07
3	1.35	0.20
4	0.26	0.04
		100.00

Parámetros estadísticos

MEDIANA (Md)	-3.00
MEDIA (Mt)	-3.35
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (σ)	1.36
ASIMETRÍA (Sk)	0.00
KURTOSIS (Kk)	1.23

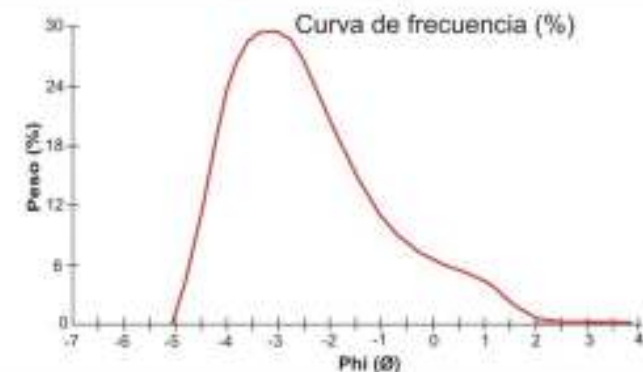
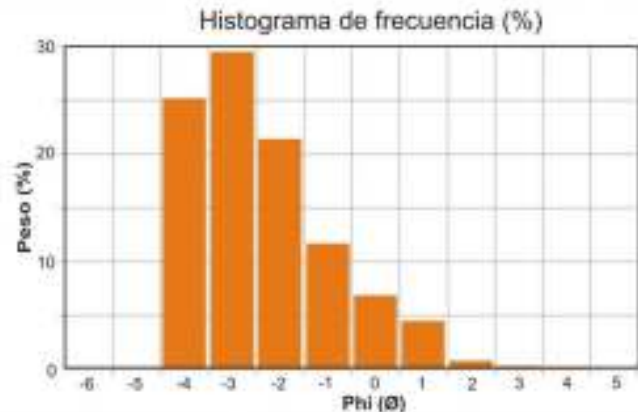


Muestra: Yu-Jv-28

Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	0	0
-4	202.48	25.14
-3	237.67	29.50
-2	172.02	21.35
-1	93.85	11.65
0	54.86	6.81
1	35.86	4.45
2	6.09	0.76
3	2.28	0.28
4	0.45	0.06
		100.00

Parámetros estadísticos

MEDIANA (Md)	-2.99
MEDIA (Mt)	-3.20
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (σ)	1.39
ASIMETRÍA (Sk)	-0.25
KURTOSIS (Kk)	1.27



Muestra: Yu-Jv-31

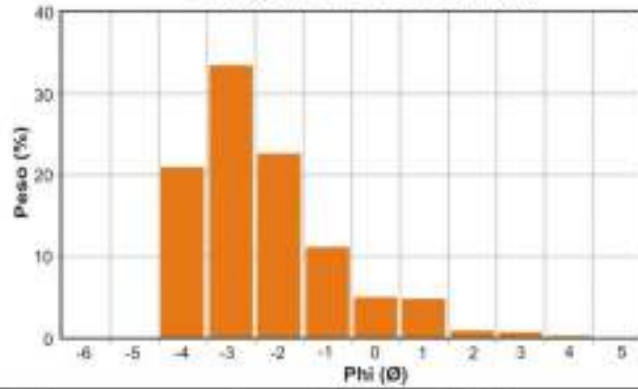
Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	0	0
-4	119.29	20.92
-3	190.65	33.44
-2	129.00	22.62
-1	63.93	11.21
0	28.76	5.04
1	27.69	4.85
2	4.99	0.88
3	3.96	0.69
4	1.52	0.27
5	0.42	0.07

100.00

Parámetros estadísticos

MEDIANA (Md)	-2.89
MEDIA (M _u)	-3.20
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (σ _D)	1.35
ASIMETRÍA (Sk)	-0.15
KURTOSIS (K _G)	1.15

Histograma de frecuencia (%)



Curva de frecuencia (%)



Muestra: Yu-Jv-08

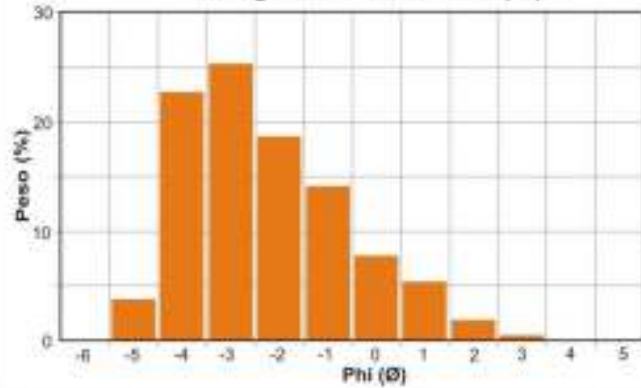
Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	22.34	3.75
-4	134.81	22.67
-3	150.25	25.27
-2	110.77	18.63
-1	83.63	14.07
0	46.13	7.76
1	32.03	5.39
2	11.25	1.89
3	2.79	0.47
4	0.48	0.08
5	0.07	0.01

100.00

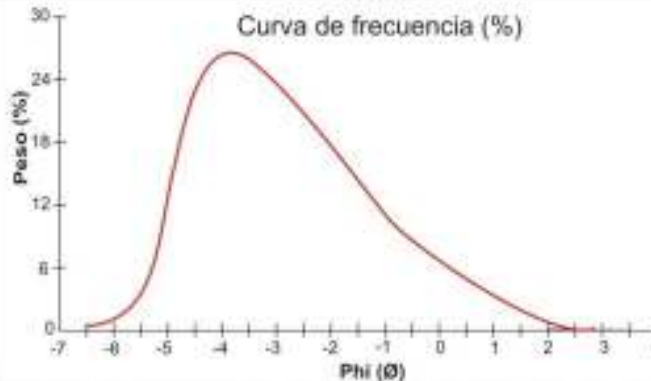
Parámetros estadísticos

MEDIANA (Md)	-3.10
MEDIA (M _u)	-2.67
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (σ _D)	1.80
ASIMETRÍA (Sk)	0.18
KURTOSIS (K _G)	0.96

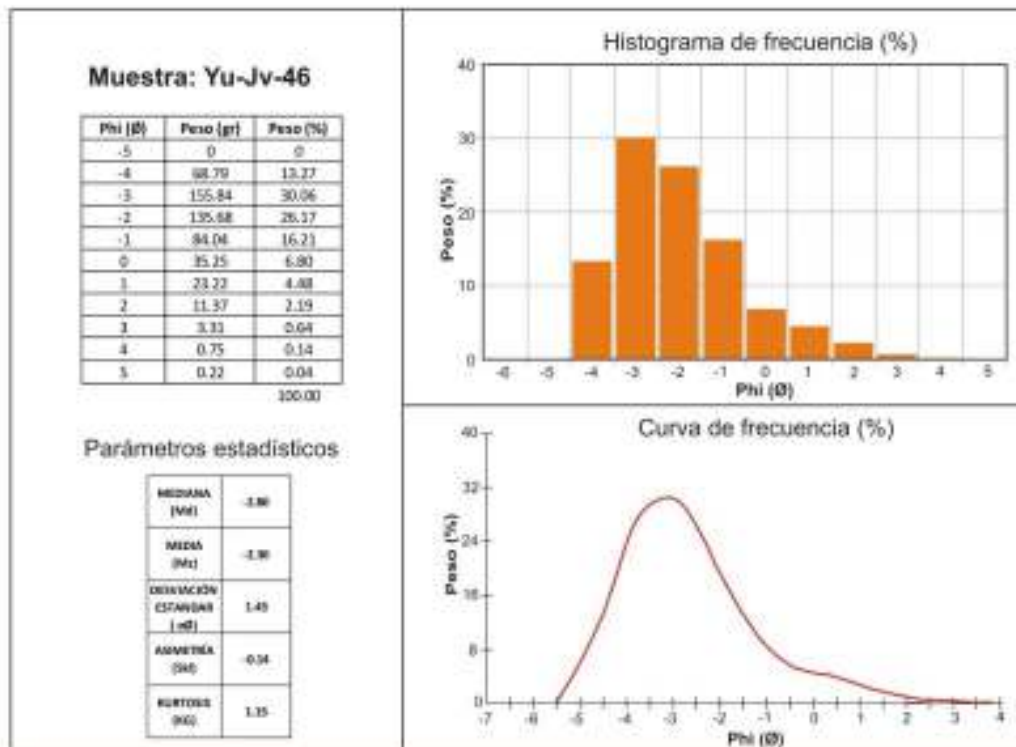
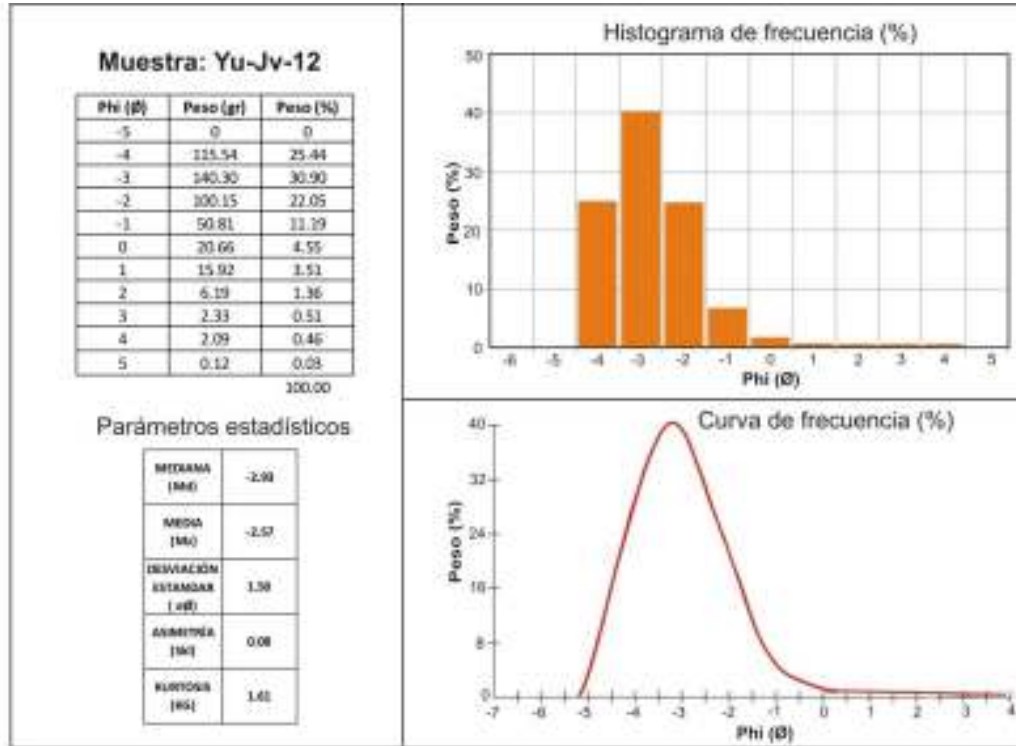
Histograma de frecuencia (%)



Curva de frecuencia (%)



SECTOR MEDIAL



Muestra: Yu-Jv-45

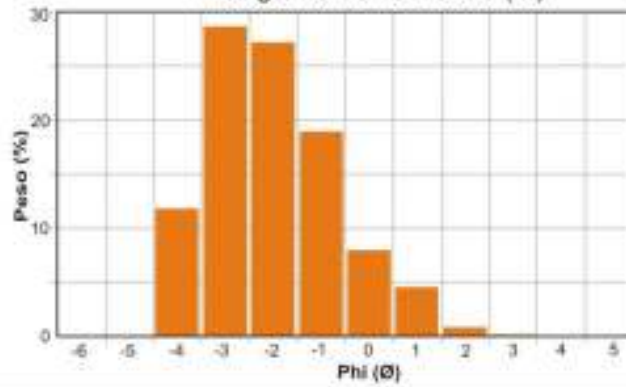
Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	0	0
-4	129.18	11.79
-3	313.92	28.65
-2	298.16	27.21
-1	207.34	18.92
0	87.32	7.97
1	49.34	4.50
2	8.98	0.82
3	1.29	0.12
4	0.29	0.03

100.00

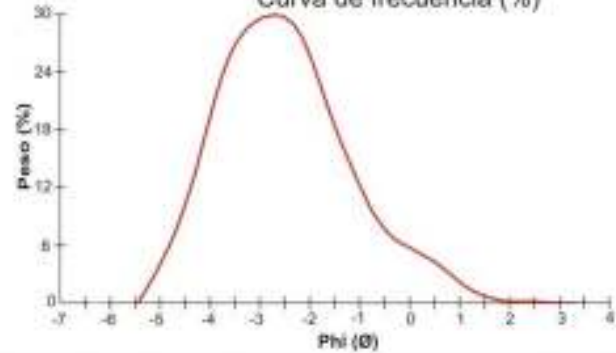
Parámetros estadísticos

MEDIANA (Mq)	-2.70
MEDIA (M)	-2.35
DEVIACIÓN ESTÁNDAR (σ)	1.40
ASIMETRÍA (Sk)	0.14
KURTOSIS (Kg)	1.13

Histograma de frecuencia (%)



Curva de frecuencia (%)



Muestra: Yu-Jv-63

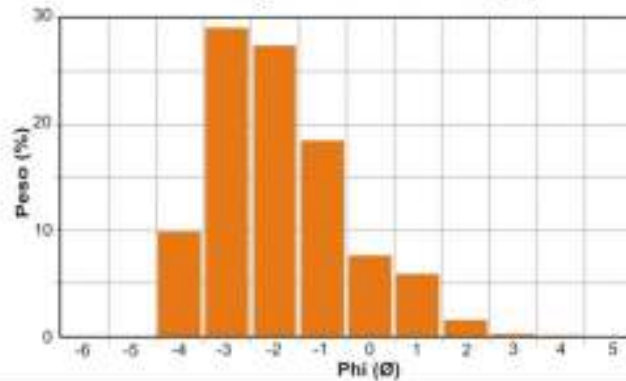
Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	0	0
-4	100.21	9.87
-3	295.32	29.09
-2	278.11	27.39
-1	187.42	18.46
0	77.24	7.61
1	59.12	5.82
2	15.48	1.52
3	2.14	0.21
4	0.29	0.03

100.00

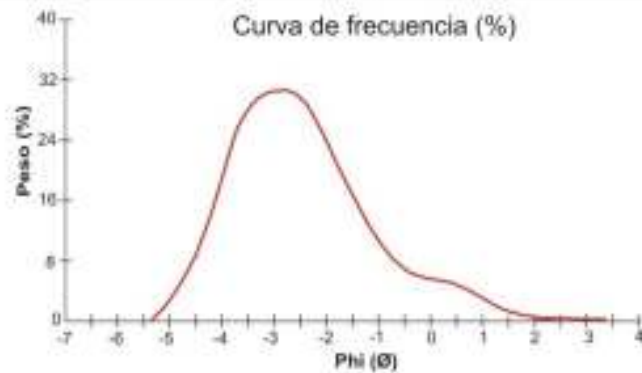
Parámetros estadísticos

MEDIANA (Mq)	-2.65
MEDIA (M)	2.10
DEVIACIÓN ESTÁNDAR (σ)	1.38
ASIMETRÍA (Sk)	0.27
KURTOSIS (Kg)	1.30

Histograma de frecuencia (%)



Curva de frecuencia (%)



Muestra: Yu-Jv-65

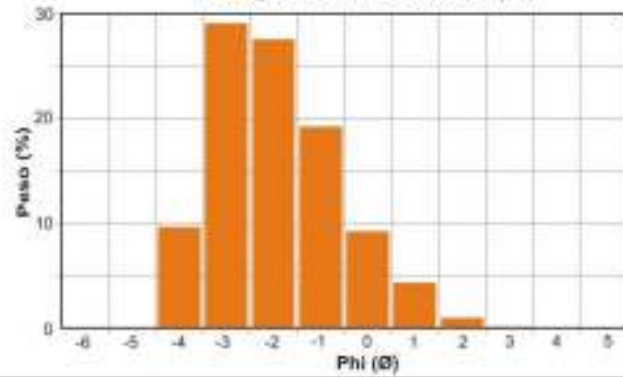
Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	0	0
-4	90.43	9.63
-3	272.76	29.05
-2	258.24	27.51
-1	180.13	19.19
0	86.21	9.18
1	40.73	4.34
2	8.72	0.93
3	1.13	0.12
4	0.43	0.05

100.00

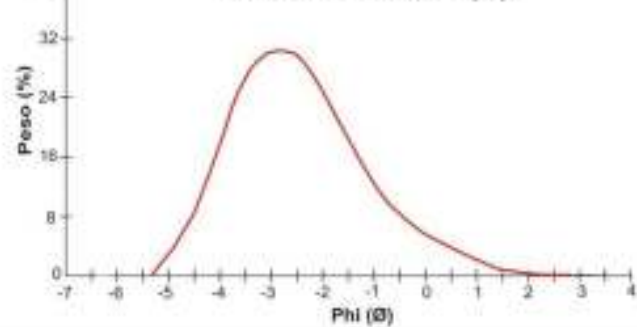
Parámetros estadísticos

MEDIANA (M _e)	-2.00
MEDIA (M _a)	-2.00
DEVIACIÓN ESTÁNDAR (σ)	1.20
ASIMETRÍA (S _k)	0.10
KURTOSIS (K _s)	1.25

Histograma de frecuencia (%)



Curva de frecuencia (%)



Muestra: Yu-Jv-66

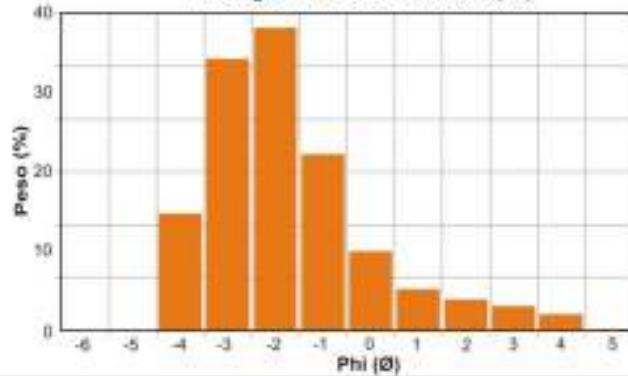
Phi (Ø)	Peso (gr)	Peso (%)
-5	0	0
-4	63.44	11.02
-3	147.49	25.61
-2	164.62	28.58
-1	95.81	16.64
0	42.95	7.46
1	22.42	3.89
2	16.74	2.91
3	13.30	2.31
4	8.64	1.50
5	0.53	0.09

100.00

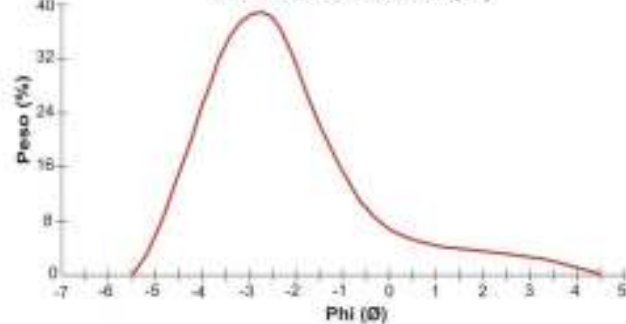
Parámetros estadísticos

MEDIANA (M _e)	-2.65
MEDIA (M _a)	-2.00
DEVIACIÓN ESTÁNDAR (σ)	1.50
ASIMETRÍA (S _k)	0.28
KURTOSIS (K _s)	1.40

Histograma de frecuencia (%)



Curva de frecuencia (%)



ANEXO C

PUNTO	NORTE	ESTE	COTA	ESPESOR
Yu-JV-51	8099999	374742	4474	55
Yu-JV-21	8099543	374728	4439	52
Yu-JV-20	8099401	375027	4338	51
Yu-JV-19	8099807	375191	4353	50
Yu-JV-05	8099170	375797	4185	40
Yu-JV-08	8099066	376097	4167	40
Yu-JV-30	8099480	375477	4267	40
Yu-JV-31	8098777	375748	4143	40
Yu-JV-22	8099048	375031	4311	39
Yu-JV-32	8098604	375740	4106	38
Yu-JV-04	8098857	375484	4758	35
Yu-JV-10	8098685	376015	4100	35
Yu-JV-26	8099574	375712	4261	35
Yu-JV-37	8098321	375746	4075	35
Yu-JV-03	8098411	375240	4145	30
Yu-JV-11	8098445	376223	4067	30
Yu-JV-29	8098843	374838	4308	30
Yu-JV-56	8100318	375040	4437	30
Yu-JV-12	8098242	376361	4051	27
Yu-JV-13	8098180	376017	4040	25
Yu-JV-15	8100269	375350	4377	25
Yu-JV-36	8098016	375873	4021	25
Yu-JV-42	8098257	376947	4060	25
Yu-JV-55	8100192	375309	4371	25
Yu-JV-33	8097822	376110	3997	24
Yu-JV-06	8099623	376018	4251	23
Yu-JV-09	8099167	376509	4155	23
Yu-JV-43	8098030	376828	4038	20
Yu-JV-25	8099925	375766	4291	18
Yu-JV-34	8097738	375886	3979	16
Yu-JV-35	8097824	375631	4006	16
Yu-JV-39	8099176	377045	4159	16
Yu-JV-24	8100326	375780	4315	15
Yu-JV-28	8098523	374644	4302	15
Yu-JV-46	8097799	377338	4059	15
Yu-JV-02	8098160	375020	4143	14
Yu-JV-01	8097853	374894	4555	10
Yu-JV-07	8099885	376153	4256	10
Yu-JV-14	8097701	374793	4096	10
Yu-JV-23	8100549	375681	4331	10
Yu-JV-38	8099740	376724	4216	10
Yu-JV-40	8098882	377072	4120	10
Yu-JV-41	8098624	377002	4099	10
Yu-JV-45	8098070	377563	4098	10
Yu-JV-47	8097490	377262	4075	10
Yu-JV-60	8097819	374848	4121	10
Yu-JV-61	8100417	376256	4240	10
Yu-JV-64	8097700	377757	4156	10
Yu-JV-49	8100125	376602	4239	6
Yu-JV-63	8098247	378233	4286	5
Yu-JV-65	8096720	378750	4160	5
Yu-JV-66	8097297	378594	4246	5
Yu-JV-50	8100584	376343	4265	4

Tabla 6.1: Coordenadas y espesores del depósito de caída.

Punto	NORTE	ESTE	COTA	MP					Promedio
Yu-JV-21	8099543	374728	4439	7.0	6.0	7.0	7.0	7.0	6.8
Yu-JV-30	8099480	375477	4267	7.0	6.0	7.0	7.0	7.0	6.8
Yu-JV-20	8099401	375027	4338	7.0	6.0	5.0	7.0	8.0	6.6
Yu-JV-51	8099999	374742	4474	7.0	6.0	5.0	7.0	8.0	6.6
Yu-JV-19	8099807	375191	4353	8.0	8.0	6.0	5.0	5.5	6.5
Yu-JV-22	8099048	375031	4311	8.0	8.0	6.0	5.0	5.5	6.5
Yu-JV-04	8098857	375484	4758	8.0	7.0	6.0	4.0	5.0	6.0
Yu-JV-15	8100269	375350	4377	7.0	6.0	6.5	5.0	5.0	5.9
Yu-JV-26	8099574	375712	4261	7.0	6.0	6.0	5.0	5.5	5.9
Yu-JV-31	8098777	375748	4143	7.0	6.0	6.5	5.0	5.0	5.9
Yu-JV-55	8100192	375309	4371	7.0	6.0	6.5	5.0	5.0	5.9
Yu-JV-03	8098411	375240	4145	7.5	7.0	5.0	5.0	4.5	5.8
Yu-JV-05	8099170	375797	4185	7.0	5.0	6.5	5.0	5.0	5.7
Yu-JV-25	8099925	375766	4291	8.0	5.0	5.5	4.5	4.5	5.5
Yu-JV-56	8100318	375040	4437	6.0	5.0	5.0	6.0	5.0	5.4
Yu-JV-13	8098180	376017	4040	4.0	4.0	4.5	4.0	9.0	5.1
Yu-JV-28	8098523	374644	4302	5.0	5.5	4.5	5.0	5.5	5.1
Yu-JV-29	8098843	374838	4308	5.0	5.5	4.5	5.0	5.0	5.0
Yu-JV-08	8099066	376097	4167	5.0	5.0	5.0	4.0	5.5	4.9
Yu-JV-12	8098242	376361	4051	4.0	5.5	5.0	5.0	5.0	4.9
Yu-JV-01	8097853	374894	4555	6.0	4.5	5.0	4.5	4.0	4.8
Yu-JV-11	8098445	376223	4067	6.0	4.5	5.0	4.5	4.0	4.8
Yu-JV-23	8100549	375681	4331	4.5	6.0	5.5	3.5	4.5	4.8
Yu-JV-60	8097819	374848	4121	4.5	6.0	5.0	3.5	5.0	4.8
Yu-JV-24	8100326	375780	4315	5.0	5.0	5.0	5.0	3.5	4.7
Yu-JV-37	8098321	375746	4075	5.0	5.0	5.0	5.0	3.5	4.7
Yu-JV-02	8098160	375020	4143	5.0	6.0	5.0	4.0	3.0	4.6
Yu-JV-07	8099885	376153	4256	5.0	5.0	5.0	4.0	4.2	4.6
Yu-JV-09	8099167	376509	4155	6.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.6
Yu-JV-14	8097701	374793	4096	5.0	4.0	5.0	4.5	4.5	4.6
Yu-JV-36	8098016	375873	4021	5.0	4.0	5.0	4.5	4.0	4.5
Yu-JV-35	8097824	375631	4006	5.0	4.5	4.0	4.0	4.5	4.4
Yu-JV-06	8099623	376018	4251	5.0	4.5	4.0	4.5	3.5	4.3
Yu-JV-10	8098685	376015	4100	4.5	4.5	4.0	4.0	4.0	4.2
Yu-JV-33	8097822	376110	3997	4.5	4.5	4.0	4.0	4.0	4.2
Yu-JV-34	8097738	375886	3979	4.0	4.0	5.0	4.0	4.0	4.2
Yu-JV-61	8100417	376256	4240	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Yu-JV-49	8100125	376602	4239	4.0	4.0	4.0	4.0	3.5	3.9
Yu-JV-39	8099176	377045	4159	5.0	4.0	4.0	3.0	3.0	3.8
Yu-JV-42	8098257	376947	4060	5.0	4.0	4.0	3.0	3.0	3.8
Yu-JV-45	8098070	377563	4098	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.8
Yu-JV-43	8098030	376828	4038	4.0	3.5	4.0	3.0	4.0	3.7
Yu-JV-46	8097799	377338	4059	5.0	4.0	3.0	3.0	3.5	3.7
Yu-JV-41	8098624	377002	4099	5.0	4.0	3.0	3.0	3.0	3.6
Yu-JV-50	8100584	376343	4265	3.0	3.5	3.5	4.0	3.5	3.5
Yu-JV-40	8098882	377072	4120	3.0	3.0	3.5	3.0	3.0	3.1
Yu-JV-47	8097490	377262	4075	3.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.1
Yu-JV-38	8099740	376724	4216	4.0	3.0	3.0	2.4	2.5	3.0
Yu-JV-64	8097700	377757	4156	3.0	3.0	3.0	2.5	2.8	2.9
Yu-JV-66	8097297	378594	4246	3.0	3.0	2.0	3.0	3.0	2.8
Yu-JV-65	8096720	378750	4160	3.5	2.5	2.5	2.0	2.5	2.6
Yu-JV-63	8098247	378233	4286	3.0	2.5	3.0	2.0	2.0	2.5

Tabla 6.3: Valores promedio de las dimensiones de MP considerados para la elaboración del mapa de isopletas de pómez.

Punto	NORTE	ESTE	COTA	ML					Promedio
Yu-JV-51	8099999	374742	4474	6.5	7.0	6.5	7.0	6.5	6.7
Yu-JV-21	8099543	374728	4439	8.0	7.0	4.5	6.5	5.5	6.3
Yu-JV-19	8099807	375191	4353	7.0	6.0	6.0	6.0	5.5	6.1
Yu-JV-20	8099401	375027	4338	7.5	8.0	4.5	5.5	5.0	6.1
Yu-JV-26	8099574	375712	4261	6.0	6.0	6.0	5.0	6.0	5.8
Yu-JV-30	8099480	375477	4267	5.0	6.6	7.5	5.5	4.5	5.8
Yu-JV-29	8098843	374838	4308	6.0	6.0	6.0	5.0	5.0	5.6
Yu-JV-05	8099170	375797	4185	6.0	5.5	6.0	4.0	5.5	5.4
Yu-JV-28	8098523	374644	4302	6.0	5.0	5.5	5.5	5.0	5.4
Yu-JV-04	8098857	375484	4758	5.0	5.0	4.5	7.0	5.0	5.3
Yu-JV-06	8099623	376018	4251	5.0	6.0	5.0	5.0	5.0	5.2
Yu-JV-08	8099066	376097	4167	4.0	4.0	7.0	7.0	4.0	5.2
Yu-JV-22	8099048	375031	4311	6.5	6.0	4.0	5.5	4.0	5.2
Yu-JV-31	8098777	375748	4143	4.0	4.0	7.0	7.0	4.0	5.2
Yu-JV-12	8098242	376361	4051	6.5	5.5	4.5	4.0	3.5	4.8
Yu-JV-37	8098321	375746	4075	5.0	5.0	4.0	5.0	5.0	4.8
Yu-JV-55	8100192	375309	4371	6.5	5.5	4.5	4.0	3.5	4.8
Yu-JV-25	8099925	375766	4291	5.5	4.5	5.0	4.0	4.0	4.6
Yu-JV-36	8098016	375873	4021	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	4.6
Yu-JV-03	8098411	375240	4145	6.0	4.0	4.5	4.0	4.0	4.5
Yu-JV-10	8098685	376015	4100	6.0	4.5	4.0	4.0	4.2	4.5
Yu-JV-11	8098445	376223	4067	5.0	4.0	3.5	5.0	4.5	4.4
Yu-JV-07	8099885	376153	4256	5.0	4.0	3.5	5.0	3.5	4.2
Yu-JV-13	8098180	376017	4040	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.2
Yu-JV-15	8100269	375350	4377	5.0	4.0	3.5	5.0	3.5	4.2
Yu-JV-56	8100318	375040	4437	5.0	4.0	3.5	5.0	3.5	4.2
Yu-JV-02	8098160	375020	4143	5.2	4.0	4.0	4.0	3.5	4.1
Yu-JV-24	8100326	375780	4315	5.0	5.0	3.5	3.5	3.0	4.0
Yu-JV-23	8100549	375681	4331	4.0	4.0	4.0	3.0	4.5	3.9
Yu-JV-35	8097824	375631	4006	4.0	4.0	4.0	3.5	3.5	3.8
Yu-JV-09	8099167	376509	4155	5.5	3.5	3.0	3.5	3.2	3.7
Yu-JV-61	8100417	376256	4240	5.5	3.5	3.0	3.5	3.2	3.7
Yu-JV-01	8097853	374894	4555	6.5	4.0	2.5	3.0	2.0	3.6
Yu-JV-14	8097701	374793	4096	3.4	4.0	3.5	3.5	3.0	3.5
Yu-JV-34	8097738	375886	3979	4.0	4.0	2.5	2.0	4.0	3.3
Yu-JV-33	8097822	376110	3997	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.2
Yu-JV-39	8099176	377045	4159	5.0	3.0	2.0	3.0	3.0	3.2
Yu-JV-41	8098624	377002	4099	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.2
Yu-JV-60	8097819	374848	4121	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.2
Yu-JV-42	8098257	376947	4060	4.0	4.0	2.5	2.5	2.5	3.1
Yu-JV-43	8098030	376828	4038	3.5	3.5	3.0	2.5	3.0	3.1
Yu-JV-38	8099740	376724	4216	2.5	3.0	3.5	2.5	3.5	3.0
Yu-JV-40	8098882	377072	4120	2.5	3.0	3.0	3.5	3.0	3.0
Yu-JV-46	8097799	377338	4059	3.2	2.5	3.2	3.2	2.5	2.9
Yu-JV-50	8100584	376343	4265	3.0	3.5	3.0	2.5	2.0	2.8
Yu-JV-45	8098070	377563	4098	2.5	3.0	3.0	2.0	3.0	2.7
Yu-JV-47	8097490	377262	4075	3.0	3.0	2.0	2.5	3.0	2.7
Yu-JV-64	8097700	377757	4156	3.5	2.5	2.0	2.5	2.0	2.5
Yu-JV-49	8100125	376602	4239	3.0	2.0	2.0	2.5	2.0	2.3
Yu-JV-63	8098247	378233	4286	2.0	1.5	2.5	1.5	1.5	1.8
Yu-JV-66	8097297	378594	4246	1.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.4
Yu-JV-66	8097297	378594	4246	1.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.4

Tabla 6.4: Valores promedio de las dimensiones de los ML del depósito de caída.