



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Análisis textural cuantitativo de los depósitos piroclásticos de la
Secuencia Pómez Ocre, Volcán Popocatepetl, México

TESIS

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta

Juan Pablo Solano Monge
Becario CONACYT N° 1106160

Asesor

Damiano Sarocchi



San Luis Potosí, S.L.P .

Agosto de 2022



19 de mayo de 2022

**LIC. JUAN PABLO SOLANO MONGE
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Damiano Sarocchi** Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Análisis textural cuantitativo de los depósitos piroclásticos de la Secuencia Pómez Ocre, Volcán Popocatepetl, México”

1. Introducción y generalidades
2. Teoría del análisis textural y antecedentes de la Secuencia Pómez Ocre
3. Metodología del Análisis Textural Cuantitativo
4. Resultados estratigráficos, petrográficos y texturales
5. Discusión de resultados
6. Conclusiones y recomendaciones

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.**

DIR. DE INVESTIGACIONES
DIRECCIÓN

Copia. Archivo
*etn.

www.uaslp.mx

Av. Morelos 142, 64000
Ciudad de San Luis Potosí, S.L.P.
Tel: 52 479 942 2000 ext. 111
Fax: 52 479 942 2100

“Rumbo al centenario de la autonomía universitaria”

Arcón de los vientos,
Escalonado, brioso, abrupto,
Sobre la testuz tremolan los truenos,
Patrón de la lluvia, red de los arroyos,
Caldero nevado,
Prolijo te yergues y curvas el espacio en torno...

Prosa del Popocatépetl, Francisco Serrano

DEDICATORIA

"...Porque sin ustedes no hubiera llegado hasta aquí..."

A mis abuelitos

Agradecimientos

A Pa y a Ma las personas más importantes de mi vida y que siempre me guían con su sabiduría aún en la distancia.

A mis hermanos David, Julio, Fabián, Emmanuel, Samuel e Isabella por su cariño y apoyo en todos estos años que llevamos juntos.

A Yoselyn Álvarez, mi compañera de vida y principal motor durante este tiempo de maestría y a toda su familia Don Álex, Doña Milagro, Doña Elvia, Kevin y Nathalie por siempre mostrarme sus buenos deseos en este camino tan arduo.

A Percy Denyer, Gerardo Soto y Wendy Pérez por ser mis impulsores académicos desde la licenciatura. Sin lugar a duda excelentes personas que me han hecho crecer en el campo de la investigación.

A los doctores Damiano Sarocchi y Luis Ángel Rodríguez por guiarme en esta investigación y ayudarme a descubrir un poco más acerca de la sedimentología piroclástica.

A los doctores Jose Juan Francisco Castillo Rivera, Jose Ramón Torres Hernández y Lorenzo Borselli por sus comentarios y sugerencias en esta tesis y demás enseñanzas.

A las doctoras Lilia Arana Salinas y Lizeth Caballero García por su gran apoyo y mostrarme un lugar maravilloso como lo es el volcán Popocatepetl.

A mis principales amigos mexicanos Fer Cerca, Alexis Ahumada, Jose Juan Torres, Felipe Baltazar, Geovanni Ortiz y Víctor del Ángel por sus pláticas, consejos y ayudas siempre desinteresadas.

A mis compañeras de casa Verónica Quilumba, Karla Pérez, Andrea García, Elena González, Rubí Hernández por hacerme sentir siempre como en casa.

A mis compañeros de generación y amigos Helios Bafún, Karla González, Karen Rocha, Gustavo Rivera y Eduardo Torres por tan buenos momentos en el Instituto de Geología.

A mis amigos geólogos Fernanda Fonseca, Karla Vásquez, Alejandro Argüello, Federico Rivera, Thais Ramírez, Daniel Conejo, Francisco Chacón, Adrián Obando, Fabián Soriano y Pablo Dormond por estar siempre al pendiente a pesar de la distancia.

A mis amigos Bryan Granados, Kendall Miranda, Lucho Torres, Kukyn Flores, Kenneth Montero y Alessandro Castillo que desde Agua Caliente han estado en todo el proceso de esta investigación, además, de las vaciladas y los lugares que nos quedan por descubrir.

A Miguel Cortina y a Juan Carlos Guel por sus ratos de chismecito, los viernes de pizza y por hacer del Instituto de Geología un lugar especial.

A todas las personas que no fueron mencionadas pero que si representaron una parte importante de mi vida y actividades académicas durante este tiempo que estuve en la Maestría en Geología Aplicada.

A “The Royal Society”, “Newton Advanced Fellowship” Grant NAF\R2\180833 por co-financiar este proyecto.

Al proyecto PAPIIT IN119620 Modelos reológicos empíricos de lahares aplicados a simulaciones numéricas y evaluación de peligros por co-financiar este proyecto.

A CONACYT por el apoyo económico brindado durante la realización de esta investigación.

Tabla de contenidos

Resumen	1
Abstract.....	3
Capítulo 1. Introducción y generalidades	4
1.1 Ubicación.....	6
1.2 Justificación.....	8
1.3 Problema de investigación.....	10
1.4 Hipótesis de trabajo	11
1.5 Objetivos y actividades	12
1.5.1 Objetivo general.....	12
1.5.2 Objetivos específicos.....	12
1.5.3 Actividades.....	12
1.6 Antecedentes sobre análisis textural cuantitativo	13
Capítulo 2. Teoría del análisis textural y antecedentes de la Secuencia Pómez Ocre	19
2.1 Marco Geológico del Macizo Volcánico Popocatépetl	20
2.2 Materiales granulares, su flujo y las corrientes piroclásticas de densidad (CPDs)	23
2.2.1 Nomenclatura de corrientes piroclásticas de densidad.....	25
2.2.2 Tipos de corrientes piroclásticas de densidad	27
2.2.3 Mecanismos de generación de CPDs	28
2.2.4 Modelos de sedimentación – Procesos depositacionales en CPDs	30
2.2.5 Litofacies	31
2.2.6 Arquitectura de litofacies.....	32
2.2.7 Zona límite de flujo – <i>Flow boundary zone (FBZ)</i>	33
2.2.8 Interpretación de litofacies.....	36
2.3 Análisis Textural Cuantitativo (ATC).....	42
2.3.1 Granulometría.....	42
2.3.2 Morfología – Forma	48
2.3.3 Fábrica de forma	49
Capítulo 3. Metodología del Análisis Textural Cuantitativo	52
3.1 Recopilación bibliográfica	53
3.2 Trabajo de campo	53
3.2.1 Secciones estratigráficas.....	54
Capítulo 4. Resultados estratigráficos, petrográficos y texturales	68

4.1 Geología local.....	69
4.1.1 Secciones estratigráficas y su correlación.....	69
4.1.2 Descripción de las unidades asociadas a corrientes piroclásticas de la Secuencia Pómez Ocre.....	72
4.1.3 Petrografía de las unidades estudiadas	74
4.2 Granulometría.....	75
4.2.1 Tamizados	75
4.2.2 Perfiles Granulométricos Verticales.....	75
4.2.3 Granulometría extendida.....	75
4.3 Forma	85
4.3.1 Intervalo granulométrico -3ϕ	85
4.3.2 Variaciones verticales en morfología de las partículas	85
4.4 Análisis de componentes	87
4.5 Fábrica de forma	89
4.5.1 Dirección de la orientación preferencial de las partículas.....	89
4.5.2 Variaciones verticales de dirección preferencial de las partículas	92
4.5.2 Imbricación.....	92
Capítulo 5. Discusión de resultados.....	96
5.1 Metodología aplicada	97
5.2 Estratigrafía del área de estudio	97
5.3 Variaciones granulométricas de las unidades.....	100
5.3.1 Bimodalidad granulométrica de las unidades.....	100
5.3.2 Variaciones longitudinales	100
5.3.3 Perfiles Granulométricos Verticales.....	102
5.4 Variaciones morfológicas de las partículas	103
5.4.1 Variaciones longitudinales	103
5.4.2 Variaciones verticales	104
5.5 Análisis de componentes	108
5.6 Variaciones en la fábrica de forma de las partículas	108
5.6.1 La fábrica de forma y el tamaño de las partículas	108
5.6.2 Efecto de la topografía en la fábrica de forma	110
5.7 Fábrica de forma vs. granulometría extendida vs. morfología de las partículas	119
5.7.1 Secciones verticales	119
5.7.2 Secciones horizontales.....	123

5.8	Discusión general	125
5.9	Interpretación final	126
5.9.1	Relleno de un paleo – cauce	126
5.9.2	Emplazamiento en un medio confinado	127
5.9.3	Desvío de las corrientes piroclásticas de densidad por una barrera topográfica.....	127
Capítulo 6.	Conclusiones y recomendaciones.....	129
Capítulo 7.	Referencias Bibliográficas.....	132
Capítulo 8.	Apéndices	142
8.1	Apéndice I. Datos de tamizados.....	143
8.1.1	Unidad Gris.....	143
8.1.2	Unidad Rosada	144
8.2	Apéndice II. Programas empleados	145

Índice de figuras

Figura 1.1	Ubicación del área de estudio. A. Vista general del área de estudio. B. Contexto geopolítico del área de estudio. C. Ubicación de los afloramientos estudiados.....	7
Figura 1.2	Vista del volcán Popocatepetl. A la derecha del cráter principal se reconoce la estructura El Ventorrillo.....	9
Figura 1.3.	Análisis textural cuantitativo. A. Clasificación de la esfericidad de las partículas según Krumbein (1941). B. Clasificación de la forma de las partículas según Krumbein (1941). C. Clasificación granulométrica propuesta por Fisher (1961).....	14
Figura 1.4.	Análisis textural cuantitativo. A. Imagen binaria para análisis de fábrica (Capaccioni y Sarocchi, 1996). B. Dirección de flujo de los materiales piroclásticos estudiados por Zrelak et al., (2020).	17
Figura 2.5.	Mapa Geológico Regional del Volcán Popocatepetl. Modificado de Sosa-Ceballos et al., (2015) e INEGI.....	21
Figura 2.6.	Secuencias piroclásticas recientes. Sec.: Secuencia. Póm.: Pómez.	22
Figura 2.7.	Materiales y flujos granulares. A. Arena. B. Bolsa de arroz. C. Anillos de Saturno.....	24
Figura 2.8.	Regímenes de un flujo granular según Drake (1990).....	25
Figura 2.9.	Nomenclatura de rocas piroclásticas. A. Ignimbrita. B. Nube ardiente, flujo piroclástico, corriente piroclástica de densidad.....	25
Figura 2.10.	Tipos de corrientes piroclásticas de densidad. A. Diluidas. B. Basadas en flujos granulares - concentradas.....	28
Figura 2.11.	A. Maneras de deposición. B. Escalonada. C. Continua. D. Discontinua. Tomada de Sulpizio et al., (2014).	31
Figura 2.12.	Modelos de sedimentación. A. Congelación masiva. B. Agregación progresiva. Tomado de: Branney y Kokeelar (2002) y Sulpizio et al., (2014).	32

Figura 2.13. Conceptualización de los cuatro tipos de FBZ en una deposición continua. Tomada de: Branney y Kokeelar (2002). Figure 2.13. Types of flow boundary zone. Modified of Branney y Kokeelar (2002). ..	34
Figura 2.14. Escala granulométrica de Krumbein (1934). Tomado y modificado de: https://post.geoxnet.com/	43
Figura 2.15. Método de las pipetas. Tomado de: http://www.lapacacr.com/	44
Figura 2.16. Tamices. Tomado de: https://www.directindustry.es/	45
Figura 2.17. Método de Rosiwal. Tomado de: Sarocchi et al., (2005).	47
Figura 2.18. Propiedades de la morfología de la partícula. Modificado de Moreno-Chávez et al., (2020).	49
Figura 2.19. Análisis de fábrica de forma. A. Corte de roca pulido. B. Orientación de la imagen binaria. C. Orientación de los ejes mayores. D. Diagrama de rosas que muestra la orientación y la isorientación de las partículas. Tomado de: Hernández-Rivas et al., (2021).	50
Figura 3.20. Secuencia metodológica y actividades principales a desarrollar.....	53
Figura 3.21. A. Afloramiento de estudio representativo (PT2101 – 542534/2110104). B. Esquema interpretativo. Dep.: Depósito. Fuert.: Fuertemente. S.: Secuencia. P.: Pómez.	54
Figura 3.22. Ejemplo de fotografía de alta resolución para granulometría óptica.....	55
Figura 3.23. Malla para granulometría óptica.	56
Figura 3.24. Parámetros estadísticos de los perfiles granulométricos verticales.....	58
Figura 3.25. Partes de un perfil granulométrico vertical.	59
Figura 3.26. Preparación de muestras. A. Tamizadora eléctrica. B. Baños ultrasónicos.	59
Figura 3.27. Técnica de muestreo. A. Preparación del afloramiento previo al muestreo. B. Cuboide de 10 cm ³ . C. Cobertura de yeso y Orientación de la Muestra.....	60
Figura 3.28. Preparación de muestras. A. Hoyos laterales. B. Hoyos superiores. C. Bomba de vacío.	61
Figura 3.29. Preparación del ambiente fotográfico. A. Configuración para la toma de fotografías. B. Cámara empleada. Tomada de: https://www.canon.es/ . Canon EOS 50D. C. Mesa fotográfica Smith-Víctor. Tomada de: https://bachimport.com/ . D. Fotografías obtenidas.	62
Figura 3.30. Procesamiento de imágenes en PhotoPea. A. Herramienta de selección rápida. B. Ajustes de saturación y luminosidad de las imágenes. C. Imagen binaria. Capturas tomadas de: photopea.com	63
Figura 3.31. Uso de FabricS y resultados. A. Parámetros de tamaño y excentricidad. B. Diagrama de rosas.	64
Figura 3.32. Partes de un perfil vertical de la dirección preferencial de las partículas respecto al N.	65
Figura 3.33. Partes de un perfil morfológico vertical.....	67
Figura 4.34. Afloramiento PT2101 y su correlación. Cd: Depósito de caída. Dl: Depósito de corriente piroclástica diluida. Cn: Depósito de corriente piroclástica concentrada.	70
Figura 4.35. Afloramiento PT2102 y su correlación. Cd: Depósito de caída. Dl: Depósito de corriente piroclástica diluida. Cn: Depósito de corriente piroclástica concentrada.	71
Figura 4.36. Correlación estratigráfica de las secciones levantadas en el trabajo de campo.	72
Figura 4.37. Componentes de la Unidad Rosada. A. Pómez. B. Escoria.	73
Figura 4.38. Láminas delgadas. A., B., C. y D. Pómez del afloramiento PT2106. E. y F. Juvenil del afloramiento PT2106. G. y H. Pómez del afloramiento PT2107.	74
Figura 4.39. Resultados del método del tamizado. A. Resultados para la Unidad Gris. B. Resultados para la Unidad Rosada. Los códigos se refieren a las localidades estudiadas donde el afloramiento PT2101 y PT2106 corresponden a los sitios más cercano y lejano del volcán Popocatepetl.....	76

Figura 4.40. Granulometría óptica de la Unidad Gris. A. Afloramiento PT2101. B. Afloramiento PT2107. C. Afloramiento PT2102. D. Afloramiento PT2106. Líneas rojas: ajuste potencial de grado 2 de la curva. ...	77
Figura 4.41. Granulometría óptica de la Unidad Rosada. A. Afloramiento PT2101. B. Afloramiento PT2107. C. Afloramiento PT2102. D. Afloramiento PT2106. Líneas rojas: ajuste potencial de grado 2 de la curva.	78
Figura 4.42. Granulometría extendida por unidad y afloramiento visitado. A. Unidad Gris. B. Unidad Rosada.....	79
Figura 4.43. Desviación estándar y promedio de las granulometrías extendidas. El color de las líneas refleja la unidad estudiada. Figure 4.43. Extended granulometry: Standard deviation and mean. Color line indicates the unit studied.	82
Figura 4.44. Variaciones morfológicas de la Unidad Gris. A. Afloramiento PT2101. B. Afloramiento PT2107. C. Afloramiento PT2102. MR: Morfología regular. MI: Morfología irregular. Valores promedios de mayor valor reflejan partículas más irregulares y valores de menor valor partículas regulares.	86
Figura 4.45. Variaciones morfológicas de la Unidad Rosada. A. Afloramiento PT2101. B. Afloramiento PT2107. C. Afloramiento PT2102. MR: Morfología regular. MI: Morfología irregular. Valores promedios de mayor valor reflejan partículas más irregulares y valores de menor valor partículas regulares.	87
Figura 4.46. Análisis de componentes de las muestras empleadas para análisis morfológico.	88
Figura 4.47. Variaciones de la dirección preferencial de las partículas.	92
Figura 4.48. Diagramas de rosas de imbricación para muestras AMSUP y AMMED. A. y B. Diagramas de rosas para la muestra AMMED por intervalo granulométrico. C. y D. Diagramas de rosas para la muestra AMSUP por intervalo granulométrico.....	94
Figura 4.49. Valores de imbricación según el ángulo obtenido.....	95
Figura 5.50. Anomalías topográficas y expresiones morfológicas. A. Mapa general. B. Acercamiento al sitio de muestreo PT2101. C. Patrón de drenaje modificado por una falla.	101
Figura 5.51. Redondez de las partículas. A. Coeficientes de forma general, redondez y textura superficial para la Unidad Rosada. B. Coeficientes de forma general, redondez y textura superficial para la Unidad Gris.	104
Figura 5.52. Valores morfológicos para los intervalos granulométricos $-2 -1$ y $2 - 4 \Phi$ de la Unidad Gris.	105
Figura 5.53. Valores morfológicos para los intervalos granulométricos $-2 -1$ y $2 - 4 \Phi$ de la Unidad Rosada.	106
Figura 5.54. Porcentajes de orientación de partículas para orientación preferencial de las partículas e imbricación en secciones horizontales. A. Grado de orientación de las partículas de las Unidades Gris y Rosada. B. R^2 de ajustes lineales aplicados. C. Grado de imbricación de las Unidades Gris y Rosada. D. R^2 de ajustes lineales aplicados.....	112
Figura 5.55. Hipótesis de mucha oscilación. A. Variaciones de azimut en la vertical reportadas por MacDonald y Palmer (1990). B. Variaciones de azimut en la vertical reportadas por LaBerge et al., (2009).	115
Figura 5.56. Porcentajes de orientación de partículas para orientación preferencial de las partículas e imbricación en secciones verticales. A. Grado de orientación de las partículas de las Unidades Gris y Rosado. B. R^2 de ajustes lineales aplicados. C. Grado de imbricación de las Unidades Gris y Rosado. D. R^2 de ajustes lineales aplicados.....	117
Figura 5.57. Variaciones de ángulo de imbricación en la vertical de las Unidades estudiadas.	118
Figura 5.58. Secciones verticales para el afloramiento PT2101. Línea roja: ajuste parabólico. Línea punteada morada: límite que indica el cambio de régimen cinemático.	121

Figura 5.59. Secciones verticales para el afloramiento PT2107. Línea roja: ajuste parabólico. Línea punteada morada: límite que indica el cambio de régimen cinemático.	122
Figura 5.60. Secciones verticales para el afloramiento PT2102. Línea roja: ajuste parabólico. Línea punteada morada: límite que indica el cambio de régimen cinemático.	123
Figura 5.61. Comparación de parámetros texturales respecto a la distancia. A. Unidad Gris. B. Unidad Rosada. Part.: Partículas. Tex.: Textura. Md. W1.: Mediana de distribución tipo Weibull para partículas gruesas. Md. W2.: Mediana de distribución tipo Weibull para partículas intermedias. Md. W3.: Media de distribución tipo Weibull para partículas finas. +.: Morfologías más irregulares. -: Morfologías más regulares.	124

Índice de tablas

Tabla 2.1. Características de los regímenes de las zonas límite de flujo (Branney y Kokeelar, 2002; Sulpizio et al., 2014; Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en prensa).....	35
Tabla 2.2. Litofacies piroclásticas y sus características según Branney y Kokeelar (2002) y Brown y Andrews (2015).	37
Tabla 2.3. Tobas estratificadas secas vs. húmedas.	41
Tabla 2.4. Patrones de gradación e interpretaciones posibles.	41
Tabla 3.5. Interpretaciones de P-Value de Burdette y Gehan (1970).	63
Tabla 4.6. Coordenadas planas de los afloramientos visitados y número de análisis totales realizados. Sistema UTM 14N. An.: Análisis.	69
Tabla 4.7. Valores granulométricos totales para la Unidad Rosada.	80
Tabla 4.8. Valores granulométricos totales para la Unidad Gris.	80
Tabla 4.9. Parámetros obtenidos en DECOLOG 6.0.	81
Tabla 4.10. Coeficiente función multi-objetivo obtenido con DECOLOG 6.0.	82
Tabla 4.11. Parámetros estadísticos según el número de parámetros en distribuciones Weibull para la Unidad Gris.	83
Tabla 4.12. Parámetros estadísticos según el número de parámetros en distribuciones Weibull para la Unidad Rosada.	84
Tabla 4.13. Valores promedio y errores asociados de los análisis morfológicos realizados en FSA.	85
Tabla 4.14. Análisis de componentes por fracción de morfología analizada.	88
Tabla 4.15. Fábrica de forma de la Unidad Gris: parámetros estadísticos. O.M.P.: Orientación de la moda principal.	90
Tabla 4.16. Fábrica de forma de la Unidad Rosada: parámetros estadísticos. O.M.P.: Orientación de la moda principal.	91
Tabla 4.17. Imbricación y valores estadísticos. O.M.P.: Orientación de la moda principal.	93
Tabla 5.18. Principales características y correlación de las unidades que conforman el macizo actual del volcán Popocatepetl.	98
Tabla 5.19. Bimodalidad en depósitos asociados a flujos granulares y su interpretación.	100
Tabla 5.20. Interpretación de variaciones longitudinales morfológicas en depósitos asociados a flujos granulares naturales.	103
Tabla 5.21. Caracterización de los regímenes colisional y friccional de flujos granulares a partir de los datos de Sarocchi (2006) y Kurokawa et al., (2018).	107
Tabla 5.22. Orientación preferencial de las partículas por intervalo granulométrico.	108

Tabla 5.23. Grado de orientación preferencial de las partículas según facies piroclásticas para datos de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS).	112
Tabla 5.24. Interpretación de variaciones verticales en la dirección preferencial de las partículas.	114
Tabla 5.25. Recopilación de trabajos que emplean dos o más parámetros texturales del ATC.....	119

RESUMEN

Las corrientes piroclásticas de densidad (CPD) son uno de los procesos volcánicos más impresionantes y peligrosos vistos en la naturaleza. Las CPD corresponden a una variedad de flujos granulares secos constituidos por material piroclástico con elevadas temperaturas. En el volcán Popocatepetl en México, el estudio de los depósitos asociados a CPD de la Secuencia Pómez Ocre es muy importante para mitigar el riesgo geológico, comprender su cinemática y descifrar los procesos deposicionales que actúan en este tipo de fenómenos. Una importante contribución para obtener este tipo de información, deriva del análisis textural cuantitativo (ATC). El ATC es el estudio de parámetros texturales como la granulometría, la morfología y la fábrica de forma, en rocas y depósitos, mediante una metodología que proporciona datos cuantitativos. El ATC se basa en el uso de fotografías digitales en alta resolución, su análisis y caracterización mediante el procesamiento y tratamiento de las imágenes, y la interpretación de los datos mediante estudios estadísticos. La investigación realizada, se enfocó en entender las condiciones cinemáticas y reológicas de las CPD que formaron la Secuencia Pómez Ocre, en el instante inmediatamente previo a su deposición. Los estudios granulométricos revelaron procesos de segregación de partículas por densidad y tamaño que originaron gradaciones normales, inversas y de tipo *coarse-tail* observables en las unidades. Además, las características texturales se pudieron relacionar con el aspecto de la paleo-barranca en la que fueron depositados. La granulometría de las unidades estudiadas permitió reconocer que el intervalo granulométrico -2ϕ a 1ϕ corresponde al intervalo de dimensiones de partículas donde ocurre la mayor interacción granular. Los análisis morfológicos permitieron determinar la presencia de un régimen reológico dominado por fricciones en la base y uno dominado por colisiones en el techo, en la mayoría de las unidades estudiadas. Mientras que a partir de los datos proporcionados por la fábrica de forma se pudo determinar la probable presencia de un mecanismo de agregación progresiva (*progressive aggradation*) y un comportamiento del flujo que refleja el comportamiento trenzado en algunos ríos cargados de sedimento. En conjunto, la granulometría, la morfología y la fábrica de forma proporcionan información coincidente y relacionable, confirmando su gran utilidad en descifrar el comportamiento físico de las CPDs a partir de sus depósitos. Los parámetros

texturales se consideran indicadores sensibles al medio en que las corrientes piroclásticas de densidad se depositan. Los análisis texturales permitieron reconstruir la historia de emplazamiento de las corrientes piroclásticas de densidad estudiadas y demuestran que la metodología aplicada permite inferir condiciones acerca del comportamiento y mecanismos deposicionales de ignimbritas y CPDs de volumen grande y pequeño como las producidas por la Pómez Ocre en el Popocatépetl. Un hallazgo muy importante es que ciertos comportamientos del flujo durante su transporte y deposición, observados en el pasado con este método en CPDs de grande volumen, también se reconocen en depósitos de volumen pequeño, indicando que, a pesar de una escala tan diferente, los mecanismos físicos que mueven estos flujos siguen siendo los mismos.

Palabras clave: corrientes piroclásticas de densidad; Secuencia Pómez Ocre Popocatépetl; Análisis Textural Cuantitativo (ATC); depósitos piroclásticos; Reología de corrientes piroclásticas de densidad

ABSTRACT

Pyroclastic Density Currents (PDC) are one of the most dangerous and spectacular volcanic processes. PDC are a dry granular flow type and consist of hot pyroclastic material. The study of pyroclastic deposits associated with PDC at Popocatépetl volcano, in Mexico, is very important for to reduce geological risks, understand the kinematics, and know the depositional process of Secuencia Pómez Ocre. Quantitative textural analysis (QTA) is an important tool to obtain this kind of information. The QTA examines texture parameters such as granulometry, morphology, and shape fabric of particles in rocks and deposits using quantitative data. QTA is based on high resolution photographs, its analysis and characterization through the process of images and their interpretation through statistical parameters. The aim of this study is to understand the kinematic and rheological conditions of the PDCs of Secuencia Pómez Ocre in the last moment of their deposition. Optical granulometry identifies segregation processes by density and size that produce normal, inverse and coarse tail patterns in the studied units. In addition, the textural features can be related to the paleoaspect of the ravine. The extended granulometry shows $-2 - 1 \phi$, as the granulometric interval of the largest granular interactions. Morphological analyses allowed to determine a frictional region at the base and a collisional region at the top of the deposits. Shape fabric results suggest a progressive aggradation mechanism and a braided pattern at the time of emplacement. Granulometry, morphology and shape fabric provide correlative information, and are therefore of great use in describing the kinematics and rheology of the PDC since deposition. The textural parameters are useful indicators of paleotopography. The textural analyses allow reconstructing the emplacement of the studied PDCs and suggesting their rheological behaviour and depositional mechanism of low-volume pumice flows. An important finding of this study is that low-volume PDCs exhibit similar behaviour to high-volume PDCs. This suggests that the physical mechanism is the same in both types of PDCs.

Keywords: Pyroclastic Density Currents (PDC), Secuencia Pómez Ocre Popocatépetl, Quantitative Textural Analyses (QTA), Pyroclastic deposits; PDCs rheology.



INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

DESCRIPCIÓN BREVE

En este capítulo se abordarán conceptos generales acerca de los flujos granulares aplicados a la geología y temas generales del proyecto de investigación presentado como la ubicación del área de estudio, la justificación, el problema de investigación, la hipótesis planteada, los objetivos y algunos estudios pioneros en materia granular.

DESCRIPTION

This chapter contains general concepts of granular flows applied to geology and general aspects of the work such as ubication, justification, investigation problem, hypothesis, objectives and previous studies.

El Análisis Textural Cuantitativo (ATC) consiste en medir las propiedades texturales (granulometría, forma y fábrica de forma) de un sedimento suelto o de una roca compacta constituida por partículas, mediante técnicas que permiten su cuantificación numérica. Se trata de técnicas, generalmente basadas en el análisis de imágenes digitales, que permiten conocer la granulometría de los depósitos a partir de fotografías de los afloramientos, estudiar su morfología mediante el análisis riguroso de su perímetro y estudiar la disposición espacial de las partículas y su orientación (Capaccioni y Sarocchi, 1996; Capaccioni et al., 1997; Sarocchi et al., 2005; Sarocchi, 2006; Sarocchi et al., 2011; Moreno-Chávez et al., 2018; Moreno-Chávez et al., 2020; Zrelak et al., 2020).

El ATC es una investigación de frontera hoy en día, que se ha vuelto de vital importancia en la sedimentología volcánica y otras áreas. Esta metodología permite descifrar las propiedades físicas de los flujos granulares (flujos piroclásticos, epiclásticos, avalanchas, etc) a partir de las propiedades texturales de los depósitos.

Los flujos granulares fueron definidos por Kadanoff (1999) como el movimiento e interacción de grandes cantidades de partículas de diferentes tamaños, formas y densidades que se mueven en un medio líquido o gaseoso. Los flujos granulares en las ciencias geológicas son fenómenos comunes y extremadamente peligrosos, tanto que han llamado la atención de la comunidad científica internacional y año tras año miles de personas se ven afectadas o pierden su vida a causa de estos. Algunos ejemplos de flujos granulares de tipo geológico son los lahares, las avalanchas volcánicas, los aludes, las avalanchas de nieve, las turbiditas, los flujos de escombros, las corrientes piroclásticas de densidad, entre otros.

Uno de los desastres volcánicos más terribles de la historia fue originado por un flujo piroclástico producido por el volcán Pelée en la isla Martinica (Caribe) en 1902. El evento piroclástico del 8 de mayo de 1902 acabó con la vida de más de 29 mil personas de la ciudad de Saint Pierre y alrededores (Lacroix, 1905; Gueugneau et al., 2020). Por otra parte, la erupción de mayo de 1980 del Monte Santa Elena, fue uno de los eventos volcánicos que más ayudó a la comunidad geocientífica a conocer y entender procesos vulcanológicos asociados a erupciones explosivas. Esta erupción se generó a partir del colapso del flanco norte y la cima del volcán, a partir de la inestabilidad producida por el desarrollo de un criptodomo (Smithsonian Institution, 2022a). La actividad volcánica del Monte Santa Elena provocó la muerte de 57 personas, y la destrucción de 200 casas, 47 puentes, 24 km de vías de tren y 300 km de autopistas (USGS, s.f.). Recientemente, el volcán La Soufrière ha causado gran afectación en varias islas del Caribe. En específico, el 9 de abril de 2021 el volcán generó una erupción explosiva, posterior al reconocimiento de

tremores y sismos volcano-tectónicos (Smithsonian Institution, 2022b). Sin embargo, como medidas de prevención se evacuó a la mayor parte de la población en peligro mediante ferries (DW, s.f.).

El territorio Mexicano y algunos países de América Central han sido fuertemente afectados por flujos piroclásticos – corrientes piroclásticas de densidad. Estos eventos representan una amenaza inminente, por lo que es primordial obtener información acerca de su comportamiento físico. Algunos eventos importantes que han sucedido en México y América Central ocurrieron en los volcanes El Chichón, de Fuego, Turrialba y Rincón de la Vieja.

El volcán El Chichón alcanza una altura máxima de 1150 m s.n.m., se encuentra en el estado de Chiapas en territorio Mexicano y su actividad se caracteriza por formar domos de lava (Smithsonian Institution, 2022c). Este volcán tuvo un evento explosivo de tipo Pliniano entre marzo y abril de 1982 que acabó con la vida de 124 personas y la desaparición de 1755 personas (Luhr et al., 1984; Smithsonian Institution, 2022c). El Volcán Fuego es un estratovolcán ubicado en Guatemala con una elevación de 3763 m s.n.m. (Smithsonian Institution, 2022d). El 14 de octubre 1974 este macizo volcánico generó una columna eruptiva de 14 km de altura clasificada como de tipo Sub-Pliniano (Rose et al., 2008). Por último, el volcán Arenal es un estratovolcán que alcanza una altura máxima de 1670 m s.n.m. en territorio Costarricense (Smithsonian Institution, 2022e). Alvarado y Soto (2002) estudiaron los productos volcánicos más peligrosos emitidos por este volcán. Donde, estos correspondieron a explosiones laterales que causaron 78 muertes y la destrucción de las ciudades de Pueblo Nuevo y Tabacón en julio de 1968 (Melson y Sáenz, 1973).

1.1 Ubicación

El área de estudio se localiza en la parte oriental de la zona volcánica conocida como Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM). La FVTM es una secuencia de volcanes y estructuras alineadas E-W hacia la parte central sur de México que responde directamente a la zona de subducción producto de la interacción entre las placas Rivera, Cocos y Norteamericana. En la FVTM se encuentra el volcán Popocatepetl, el cual se clasifica como estratovolcán con forma de cono y tiene una altura máxima de 5393 m s.n.m. (Siebe y Macías, 2006; Smithsonian Institution, 2022c). El área de estudio que corresponde a una porción de terreno de 63,1 km² al NE de este macizo volcánico (Figura 1.1.C). Esta zona es de fácil acceso, debido a que es una vía alterna entre Ciudad de México y Puebla, donde, se encuentra atravesada por la carretera que comunica a Paso de Cortés con Santiago Xalitzintla (Puebla) y está a 30 min del centro poblacional y turístico de Cholula.

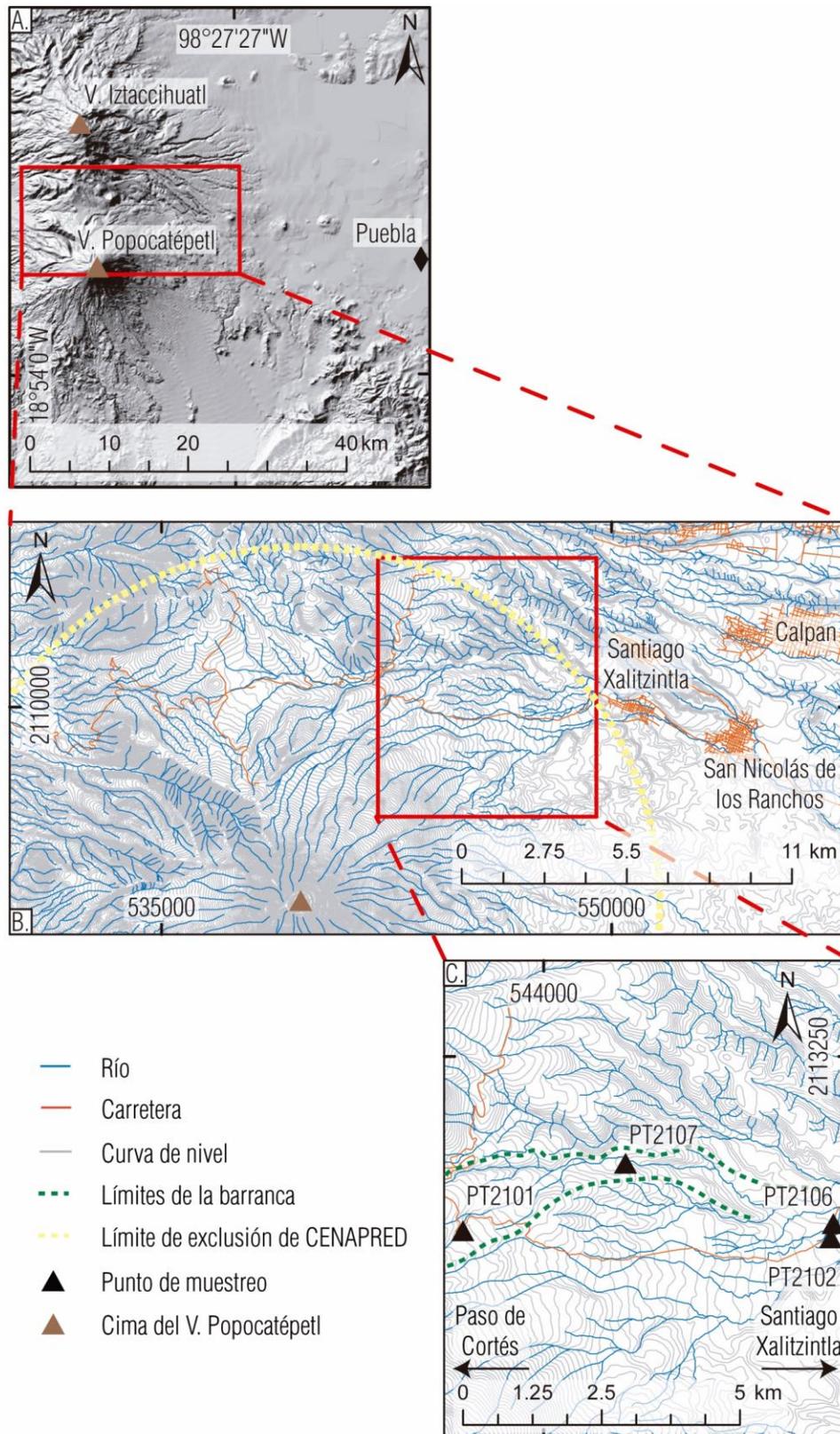


Figura 1.1 Ubicación del área de estudio. A. Vista general del área de estudio. B. Contexto geopolítico del área de estudio. C. Ubicación de los afloramientos estudiados.

Figure 1.1 Location map and outcrops. A. General view. B. Geopolitics context. C. Outcrops studied.

En esta investigación se estudiaron dos unidades de corriente piroclásticas de densidad ubicadas en la Secuencia Pómez Ocre, definida por Arana-Salinas et al. (2010). Las unidades mencionadas se escogieron porque se pueden identificar y reconocer en varios puntos ubicados a diferente distancia del centro de emisión y esto es importante por las comparaciones que la metodología permite realizar. Otro factor importante, es la edad de los depósitos (es relativamente reciente), ya que aún se conservan estructuras y texturas en las unidades estudiadas. Otro motivo, no menos importante es que flujos granulares de este tipo podrían constituir un posible escenario de riesgo futuro en el área, implicando una amenaza real para los poblados cercanos a la zona de estudio. A pesar que durante las erupciones que dieron paso a las unidades estudiadas se hayan emplazado en múltiples barrancas, el énfasis de esta investigación es en una sola barranca, la cual conduce directamente al pueblo de Santiago Xalitzintla, con el fin de obtener datos directamente comparables (Figura 1.1.B).

1.2 Justificación

Las CPD asociadas a flujos piroclásticos son un producto volcánico altamente peligroso y muy difícil de estudiar durante su desarrollo, es decir en tiempo real. Estas pueden ocurrir de forma súbita y su comportamiento es impredecible, las variaciones de dirección pueden ser letales para quien quiera observarlas de cerca. Además, casi siempre es imposible su observación directa debido a que la nube de polvo que las acompaña puede llegar a alcanzar temperaturas muy altas. Hasta la fecha la mayor fuente de información han sido los depósitos que generan al momento de su deposición, donde, estos han sido mayormente estudiados desde la petrología ígnea y la petrología sedimentaria.

A pesar de que el volcán Popocatepetl haya sido objeto de muchos estudios, entre estos no se encuentran relacionados al ATC a detalle para depósitos asociados a corrientes piroclásticas de densidad (CPD; Figura 1.2). Por esta razón se aplicó una metodología que dio un nuevo enfoque en el estudio de los productos de la erupción de la Secuencia Pómez Ocre. Esta metodología ha sido aplicada por primera vez a depósitos de Ignimbritas de gran volumen (Capaccioni y Sarocchi, 1996; Capaccioni et al. 1997; Valentini et al. 2008), donde proporcionó información muy importante acerca de la deposición de las CPDs y el reconocimiento del centro de emisión de las mismas. Zrelak et al. (2020) aplicaron la misma metodología a los depósitos de las CPDs del Monte Santa Helena, producidas durante la crisis volcánica de 1980. Donde, la fábrica de forma no solamente indica la dirección del paleo-flujo, si no que el grado de iso-orientación puede dar indicaciones importantes acerca de la reología y cinemática del flujo instantes antes de depositarse. Estudios enfocados en ATC también han sido realizados en depósitos de flujos granulares húmedos (avalanchas y lahares) demostrando que en estas condiciones reológicas muy

diferentes la fábrica de forma funciona adecuadamente como indicador de paleo-corrientes y que el grado de iso-orientación difiere en diferentes partes de la zona de depósito reflejando cambios en la reología del flujo (Hernández-Rivas et al., 2021). Este estudio, con énfasis en depósitos piroclásticos asociados a CPD concentradas de volumen pequeño ha servido para corroborar la utilidad de esta metodología en condiciones diferentes a las estudiadas anteriormente.

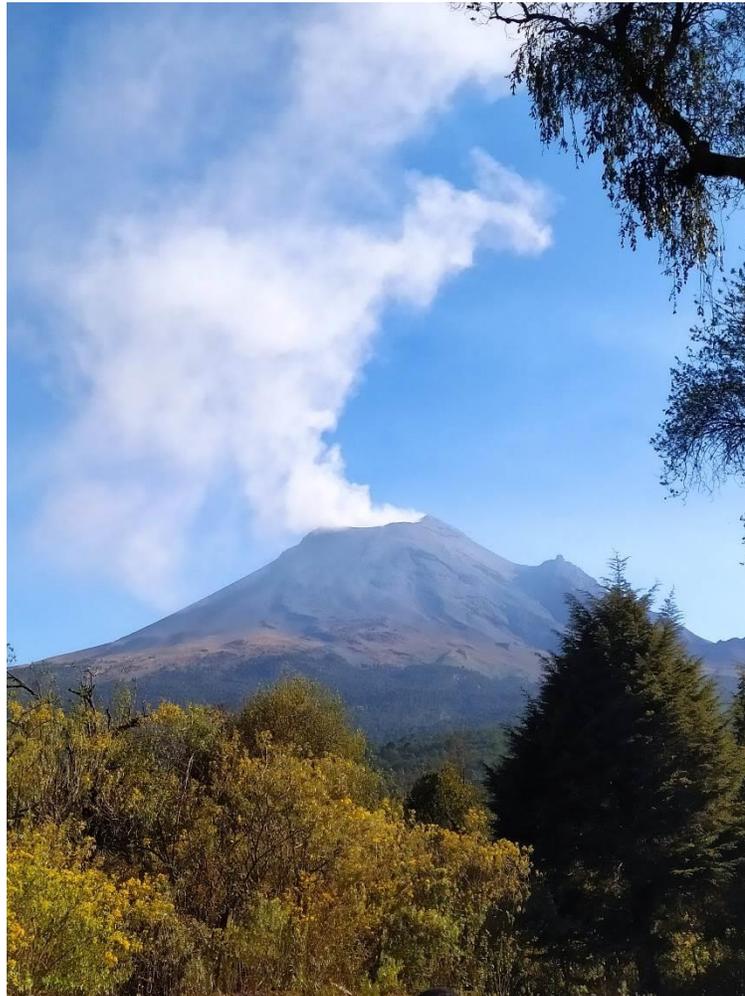


Figura 1.2 Vista del volcán Popocatépetl. A la derecha del cráter principal se reconoce la estructura El Ventorrillo.

Figure 1.2. Popocatépetl volcano view and El Ventorrillo structure.

Estudios enfocados a refinar la estratigrafía de estos depósitos y en aplicar el análisis textural cuantitativo, pueden aportar nuevo conocimiento para inferir acerca de la reología y la cinemática de estos fenómenos. Estudios de este tipo pueden llevar a una mejor comprensión de los fenómenos físicos que ocurren en estos flujos, y una mejor comprensión de la sedimentología a lo largo del transporte y la deposición. Por último, también ayudan a refinar los parámetros de entrada y las interpretaciones

realizadas en programas de simulación numérica y conducir al mejoramiento de los mapas de riesgos disponibles.

El ATC, y en especial el estudio de la granulometría, la morfología de las partículas y la fábrica de forma, es de gran ayuda para conocer la historia eruptiva explosiva de un volcán a través del historial de eventos que queda grabado en sus depósitos. El tamaño de grano de los materiales y su distribución narran de su origen, del transporte que sufrieron, la intensidad de las interacciones durante ese transporte y de los fenómenos de segregación que este material sufrió. La forma de los clastos completa la escritura de esta historia, relacionándose también con el tipo y la intensidad de las interacciones entre partículas, proporcionando datos complementarios. Mientras, la fábrica de forma completa la información proporcionando datos acerca de las direcciones de los paleo-flujos a partir de la disposición de las partículas alargadas. Esta información puede servir para seguir el desarrollo de las corrientes piroclásticas durante su transporte, la forma en que se depositan y en determinar la ubicación de antiguos centros de emisión que sean difíciles de reconocer por problemas de acceso, que hayan sido erosionados o cubiertos por rocas más recientes.

1.3 Problema de investigación

El ATC ha demostrado ser un instrumento muy útil para descifrar el comportamiento de las CPDs a partir de sus depósitos. A partir de los años 80s, un conjunto de métodos analíticos desarrollados en sedimentología clástica y sedimentaria, ha sido aplicados con éxito en estudios de sedimentología volcánica (Fisher y Schmincke, 1984; Lajoie et al. 1989). Estos estudios en su mayoría consistían en análisis granulométricos de ciertas porciones del espectro granulométrico total. Al inicio de los años 90s, la metodología analítica fue perfeccionada, y se amplió el rango granulométrico abarcando partículas finas y los bloques más grandes a partir de técnicas analíticas como los métodos sedimentográficos y los análisis ópticos. Además, se dieron los primeros pasos en el estudio cuantitativo de la forma de las partículas y el estudio de la fábrica de forma, gracias al desarrollo de técnicas de análisis de imágenes (Sarocchi, 1993; Capaccioni y Sarocchi, 1996; Dellino y La Volpe, 1996; Capaccioni et al., 1997).

El ATC ha sido aplicado con éxito a diferentes tipos de depósitos piroclásticos y epiclásticos (depósitos ignimbríticos, CPD diluidas y concentradas, lahares de volumen pequeño e intermedio y depósitos de avalancha). Algunos estudios han utilizado técnicas de granulometría óptica, análisis cuantitativo de la forma, análisis de fábrica de forma, individualmente o con la combinación de dos técnicas (Capaccioni y Sarocchi, 1996; Dellino y La Volpe, 1996; Sarocchi, 2006; Sarocchi et al., 2011; Caballero y Capra, 2011; Zrelak et al., 2020; Moreno-Chávez et al., 2020; Hernández-Rivas et al., 2021;

Rodríguez-Sedano et al., 2022). Sin embargo, hasta la fecha, ningún trabajo ha utilizado las técnicas de ATC de forma completa, es decir, usando conjuntamente y de forma integral la información de granulometría, morfología de las partículas y fábrica de forma. Además, los estudios más cercanos a la investigación desarrollada en este escrito son los aplicados a CPDs de gran volumen (Capaccioni y Sarocchi, 1996; Zrelak et al., 2020).

Las CPD asociadas a la Secuencia Pómez Ocre, en el volcán Popocatepetl solamente han sido estudiadas de manera general y estratigráfica, sin entrar en un enfoque textural cuantitativo y sedimentológico. La Secuencia Pómez Ocre comprende CPDs de volumen pequeño, por tanto, una tipología de CPDs nunca estudiada anteriormente por medio de técnicas de fábrica de forma. Por lo que, representa un ejemplo interesante para comprobar si los patrones sedimentológicos observados en CPDs de volumen grande también se pueden observar también en CPDs de volumen pequeño. Ya que, las CPD de volumen pequeño son más propensas a depositarse por medio de deposición en masa (*en Masse*) o agregación por pasos (*step-wise*) y las CPD de volumen grande tienden a depositarse a partir de un mecanismo de agregación progresiva (Sulpizio et al., 2014). Otra razón de importancia es que a lo largo de la barranca que ha sido estudiada en este trabajo, se encuentran dos de los mayores poblados de la zona (Santiago Xalitzintla y San Nicolás de los Ranchos) con una población cercana a los 2030 habitantes que están expuestos a la amenaza de CPDs (INEGI, s.f.).

Por los problemas metodológicos abiertos, se demuestra la importancia del conocimiento de la física de las CPDs con fines de predicción y mitigación del riesgo y por el caso específico del sector noreste del volcán Popocatepetl, donde existe una amenaza concreta por corrientes piroclásticas de densidad de pequeño volumen, se ha emprendido este estudio de maestría.

1.4 Hipótesis de trabajo

El análisis integrado de granulometría, morfología de partículas y fábrica de forma en depósitos de corrientes piroclásticas de densidad, puede dar información importante acerca de condiciones cinemáticas y reológicas de flujos granulares al momento de su deposición, en congruencia con lo que concluyeron Capaccioni y Sarocchi (1996) y Zrelak et al. (2020) empleando uno o dos de los métodos del ATC y en depósitos de CPDs de gran volumen.

Por lo que, de manera paralela el éxito de esta investigación permitirá comparar información acerca de la reología y dinámica de corrientes piroclásticas de densidad concentradas de volumen pequeño con CPDs diluidas y de volumen variable.

Por último, este estudio permitirá ahondar en el conocimiento de las CPDs asociadas al evento de la Secuencia Pómez Ocre en el volcán Popocatepetl y la información obtenida puede resultar muy útil para predicción de amenazas futuras y su mitigación.

1.5 Objetivos y actividades

1.5.1 Objetivo general

Realizar un estudio mediante técnicas de análisis textural cuantitativo de los depósitos piroclásticos producidos por CPDs relacionadas con la erupción de la Secuencia Pómez Ocre en el volcán Popocatepetl. Esto con el fin de 1) comprobar la eficacia de la metodología con CPDs concentradas y de volumen pequeño, 2) descifrar las condiciones cinemáticas y reológicas durante el transporte y al momento de la deposición y 3) profundizar el conocimiento de estos flujos piroclásticos que representan un posible escenario de amenaza para los poblados en el noreste del volcán.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Afinar la metodología para realizar el Análisis Textural Cuantitativo en depósitos asociados a corrientes piroclásticas de densidad concentradas de volumen bajo.

2. Realizar un estudio estratigráfico de los afloramientos disponibles en el área de estudio para individuar afloramientos donde se encuentren las unidades seleccionadas para la recolección de muestras y toma de fotografías.

3. Estudiar la morfología de partículas en las unidades seleccionadas, mediante fotografías en alta resolución de muestras sueltas y en secciones de muestras consolidadas.

4. Analizar granulométricos en los afloramientos seleccionados, mediante ensayos de tamizados y por vía óptica.

5. Analizar la orientación de las partículas en tres dimensiones mediante cortes preferenciales de muestras orientadas.

1.5.3 Actividades

Los objetivos planteados se alcanzaron a partir de las siguientes actividades.

1. Lectura exhaustiva de la literatura sobre el tema.
2. Estudio de los métodos de análisis textural cuantitativo.

3. Realización de campañas de recolección de muestras orientadas y sueltas (en diferentes posiciones estratigráficas a lo largo de la vertical y longitudinalmente en el depósito) en depósitos de corrientes piroclásticas de densidad de la secuencia Pómez Ocre del volcán Popocatépetl.
4. Preparación y análisis de las muestras orientadas recolectadas de los depósitos.
5. Realización de ensayos de tamizado para conocer las variaciones de tamaño de grano en el intervalo entre -4 y 4Φ según la escala de Krumbein (1934).
6. Realización de granulometrías ópticas mediante fotografías en alta resolución para el análisis de las partículas más gruesas de las unidades muestreadas ($X < -3 \Phi$).
7. Análisis morfológico de partículas de tamaño -3Φ mediante análisis de Fourier.
8. Análisis morfológico de partículas en las imágenes segmentadas de cortes de rocas orientadas.
9. Análisis estadísticos e interpretación de los datos obtenidos.
10. Realización de la tesis.

1.6 Antecedentes sobre análisis textural cuantitativo

En este apartado se mencionarán algunos estudios importantes desde el punto de vista del análisis textural cuantitativo y que conforman la base de los conocimientos texturales en esta propuesta.

El estudio de Wentworth (1919) es el primer intento documentado de un desarrollo experimental para modelar flujos granulares de tipo geológico a partir de un tambor rotatorio. El autor concluyó: (1) el desgaste de las partículas es proporcional a la cantidad, es decir entre más partículas, más desgaste, (2) las partículas más pequeñas se desgastan más que las grandes, (3) una forma idónea de cuantificación de la forma general de las partículas es con la relación entre el radio de la curvatura más convexa y la mitad del diámetro de cada partícula estudiada, y (4) las partículas más grandes provocan más redondeamiento que las pequeñas.

Krumbein (1941) publicó un estudio de importancia para la cuantificación de la forma y esfericidad de las partículas asociadas a depósitos sedimentarios. Estableció una clasificación para determinar la esfericidad de las partículas a partir de la relación entre los tres ejes principales medibles con un gráfico para su clasificación correspondiente (Figura 1.3A). Mientras que, para la forma de las partículas (shape) consideró la clasificación de Zingg, la cual considera relaciones entre los tres ejes principales que puede

tener una partícula y las clasificó entre esféricas, forma de disco, alargadas y esferoides prolados (Figura 1.3B).

Fisher (1961) propone una clasificación granulométrica y no genética para depósitos autoclásticos, piroclásticos y epiclásticos (Figura 1.3C). Para los depósitos autoclásticos identifica dos clasificaciones: autobrecha y tuffisita. Los depósitos piroclásticos los divide en brechas piroclásticas o aglomerados, lapillitas, y tobas. Por último, los depósitos epiclásticos los subdivide en conglomerados y brechas epivolcaniclásticas, areniscas epivolcaniclásticas, limolitas epivolcaniclásticas y arcillolitas epivolcaniclásticas.

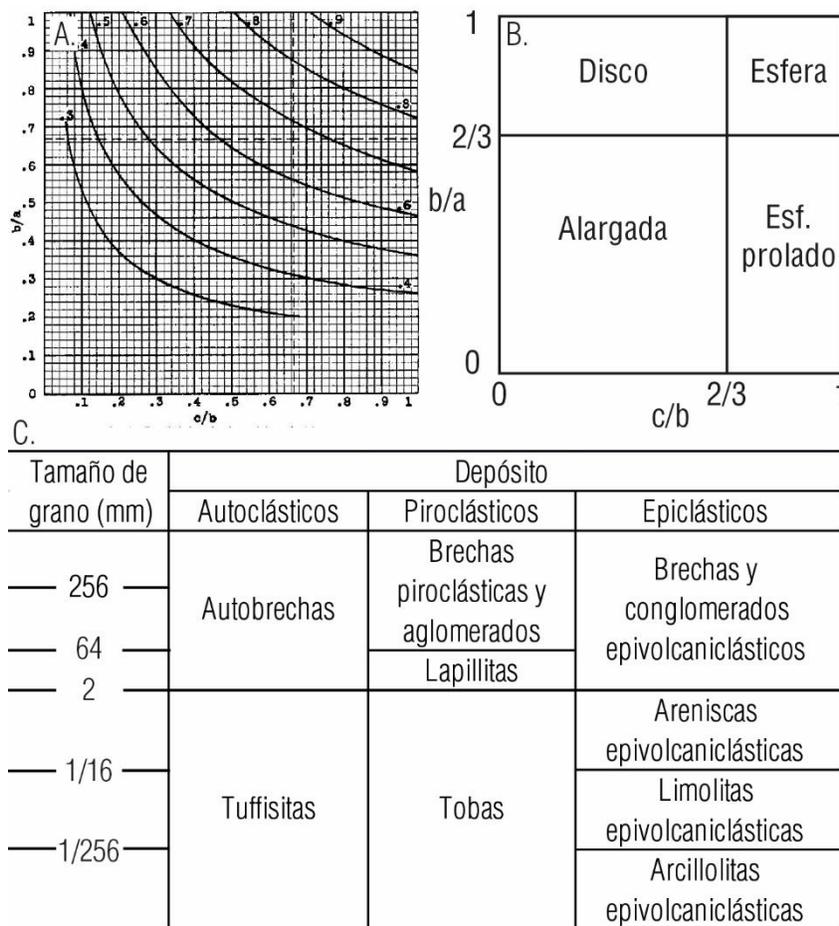


Figura 1.3. Análisis textural cuantitativo. A. Clasificación de la esfericidad de las partículas según Krumbein (1941). B. Clasificación de la forma de las partículas según Krumbein (1941). C. Clasificación granulométrica propuesta por Fisher (1961).
 Figure 1.3. Quantitative textural analysis. A. Sphericity classification by Krumbein (1941). B. Shape classification by Krumbein (1941). C. Granulometric classification by Fisher (1961).

Uno de los primeros estudios en fábrica de forma fue aplicado por Sestini y Pranzini (1965) en rocas sedimentarias. Los autores realizaron una comparación en la orientación preferencial de clastos imbricados y estructuras de tipo *sole mark* para sedimentos asociados a depósitos tipo flysch. Su principal

conclusión fue que si existe una relación entre la dirección de las *sole marks* y la imbricación de las partículas. Sin embargo, mencionan que para obtener resultados estadísticamente confiables de la imbricación se deben tomar un gran número de mediciones. Además, recomiendan replicar estas mediciones en turbiditas como medio para identificar su área fuente.

Por otra parte, Mazzullo et al. (1986) evaluaron los efectos del viento en la clasificación de los depósitos y morfología de granos de tamaño arena y cuarzo. La morfología la evaluaron a partir de armónicos mediante el análisis de Fourier. Sus principales hallazgos fueron: (1) el viento transporta preferencialmente partículas redondeadas y esféricas, (2) en cortas distancias solo se depositan las partículas más redondeadas y esféricas, (3) conforme aumenta la distancia de transporte, también aumenta la redondez y esfericidad de las partículas transportadas, y (4) en partículas con transporte de mucha distancia se genera una textural superficial redondeada, pero las formas generales son irregulares por efecto de la abrasión.

Mazzullo & Magenheimer (1987) realizaron un estudio de la forma de cristales de cuarzo para identificar su área fuente mediante imágenes de microscopio electrónico de barrido (SEM). A partir de sus análisis reconocieron que los cuarzos provenientes de rocas cristalinas, transportados por viento y de rocas cuarzo-cementadas si pueden ser distinguidos e identificados, debido a que son expuestos a procesos erosivos y de meteorización específicos. Sin embargo, los cristales de cuarzo transportados mediante medios acuosos no presentan una forma característica por el hecho de que la abrasión fluvial y marina no modifican la forma de las partículas con un patrón específico.

Mazzullo et al. (1988) estudiaron la redondez y textura superficial para determinar el origen de limos de la plataforma continental en el noreste de Estados Unidos, a partir de análisis de Fourier e imágenes obtenidas a través de un microscopio electrónico de barrido. Con los resultados obtenidos, los autores reconocieron tres poblaciones con diferentes características y génesis: (1) cuarzos redondeados y subredondeados con superficies meteorizadas provenientes de la planicie costera del Atlántico, (2) cuarzos angulares con fracturas y microfracturas provenientes de depósitos glaciales y peri-glaciares, y (3) cuarzos subangulares y subredondeados que conformaron nodos, y con bahías y crecimientos secundarios provenientes de los Montes Apalaches.

Lajoie et al. (1989) estudiaron los depósitos generados por el evento piroclásticos asociado al domo con forma de espina del Monte Pelée en 1902 y emplearon la fracción de tamaño más grande en los depósitos como indicador de la competencia del flujo y la velocidad de cizalla. Como parte de sus

resultados, reconocieron dos facies: una de mayor espesor y clasificada como aglomerado correspondiente a la deposición de un flujo laminar y otra con ceniza y lapilli bien estratificados asociados a un flujo turbulento. Los autores concluyeron que la presencia de clastos tan grandes en los depósitos en distancias largas es producto del emplazamiento de flujos piroclásticos densos y no por la velocidad de la explosión lateral.

Sarocchi (1993) desarrolló un análisis textural completo (granulometría, forma y fábrica de forma) de la ignimbrita Orvieto del Complejo Volcánico Vulsini. En su estudio logró generar y aplicar con éxito una metodología para la cuantificación de los parámetros texturales en depósitos piroclásticos consolidados y no consolidados. Mediante la granulometría clasificó los depósitos según su tamaño de grano, la morfología le permitió entender la interacción entre partículas en función de la distancia y con la fábrica de forma determinó la dirección de los paleo-flujos y la ubicación del sitio de emisión.

Capaccioni y Sarocchi (1996) estudiaron la fábrica de la ignimbrita del Complejo Volcánico Vulsini a partir de análisis textural cuantitativo por medio de imágenes binarias y su procesamiento por computadora. Concluyeron que el área de origen de la ignimbrita se ubica al sur del pueblo de Bolsena, los depósitos fueron controlados por la paleotopografía, la deposición fue mediante el mecanismo de agregación progresiva, donde los paleovalles fueron rellenados de manera discontinua, y reconocieron tres unidades de flujo (Figura 1.4A).

Sarocchi et al. (2005), plantearon un método óptico para cuantificar las variaciones granulométricas de material grueso en depósitos piroclásticos con el fin de comprender los mecanismos de transporte y emplazamiento de flujos granulares. Últimamente que los resultados permitieron reconocer dos unidades de flujo y gradación inversa de bloques que eran imperceptibles a simple vista.

Caballero y Capra (2011) mediante estudios granulométricos y de micro fotografías obtenidas con un microscopio electrónico de barrido (SEM) propusieron una historia de transporte (dinámica y emplazamiento) para las partículas que conforman el depósito de avalancha volcánica El Zaguán en el volcán Nevado de Toluca. Las autoras concluyen que el emplazamiento de la avalancha estuvo condicionada a un flujo estratificado con una base correspondiente a un régimen cinemático friccional reconocido por la presencia de clastos imbricados, megabloques de origen lacustrino deformados y clastos con texturas como rasguños, surcos y labios, y un techo con un régimen cinemático colisional interpretado por la poca cantidad de matriz y a que los clastos muestran un comportamiento frágil evidenciado a partir de fracturas concoides y escalones arqueados.

Sarocchi et al. (2011) desarrollaron un estudio estratigráfico y análisis textural cuantitativo de la erupción del 17 de julio de 1999, mediante métodos de tamaño de grano y de morfología de las partículas, este último mediante imágenes binarias. Concluyen que durante el emplazamiento se desarrollaron dos pulsos que sufrieron un proceso agradacional. Además, determinaron un mecanismo de sedimentación discontinuo con una zona límite de flujo con régimen de tipo flujo granular.

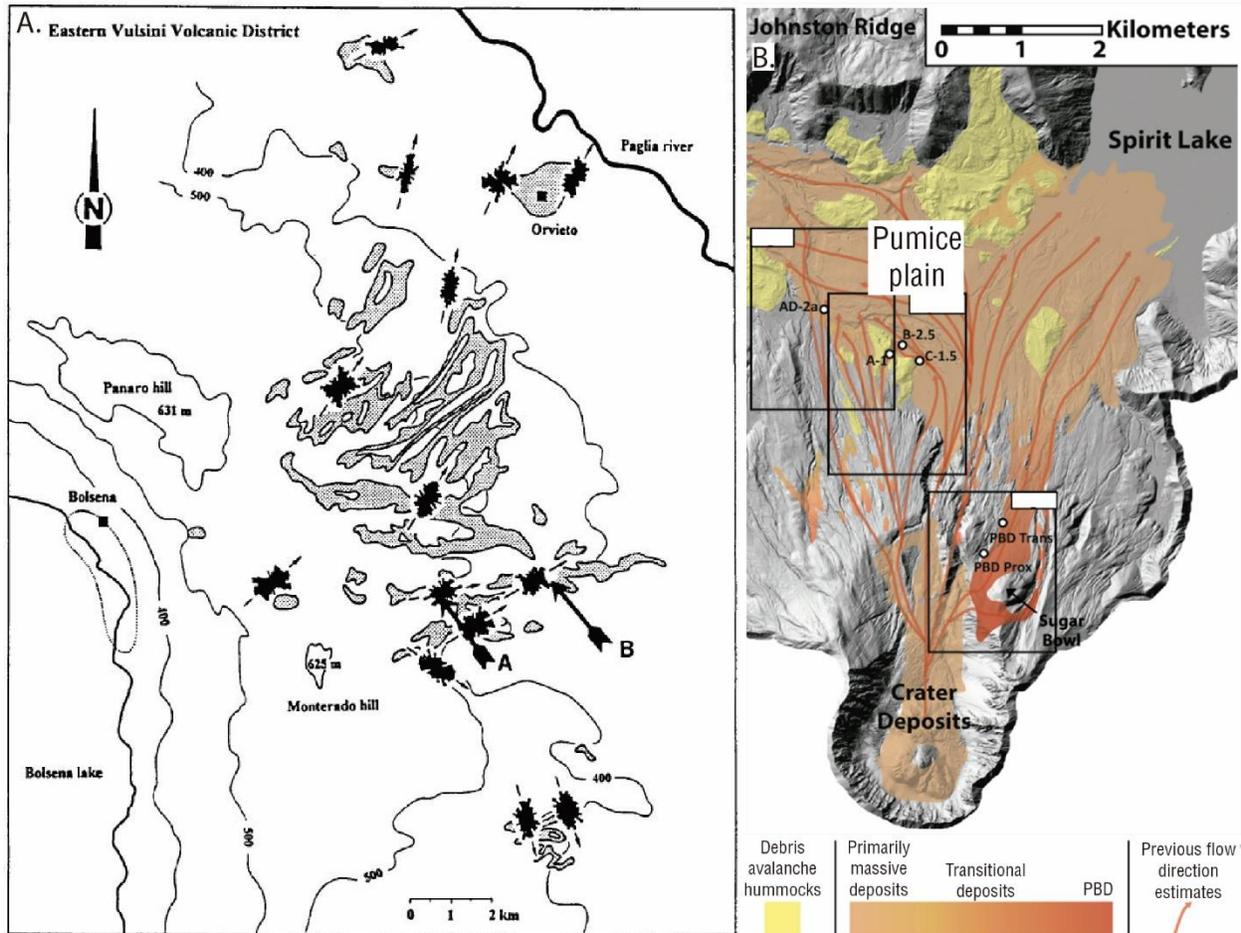


Figura 1.4. Análisis textural cuantitativo. A. Imagen binaria para análisis de fábrica (Capaccioni y Sarocchi, 1996). B. Dirección de flujo de los materiales piroclásticos estudiados por Zrelak et al., (2020).

Figure 1.4. Quantitative textural analysis. A. Binary image for shape fabric (Capaccioni y Sarocchi, 1996). B. Paleoflow directions of studied outcrops by Zrelak et al., (2020).

Cerca (2020) presentó un estudio inédito en el cual construyó una metodología para el estudio de la fábrica de forma en modelos analógicos de flujos de escombros a escala con diferentes cantidades de finos para evaluar la isorientación de los depósitos bajo condiciones de cohesión y no cohesión. La principal conclusión de este estudio es que la cohesión favorece la isorientación de las partículas y aumenta su alcance respecto a la distancia lograda por flujos de escombros no cohesivos.

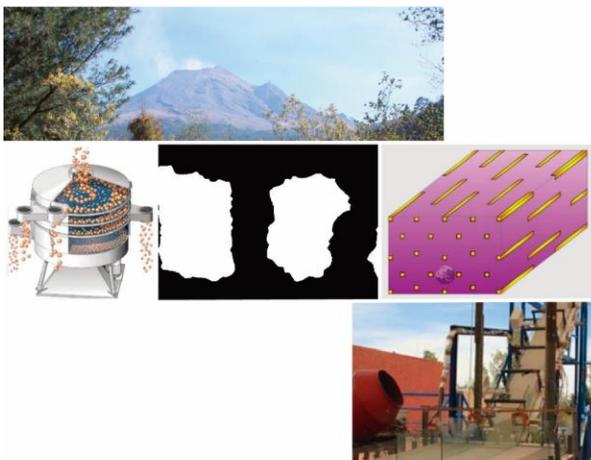
Zaragoza et al. (2020) mediante un estudio geomorfológico, textural y con datos de precipitaciones modelaron numéricamente el lahar Nexpayantla del 4 de febrero de 2010. Donde concluyeron que el disparador del lahar secundario fue un pico en la precipitación con un tiempo de retorno de 27 años y que la evolución del lahar varió entre corriente fluvial, flujo de escombros y corriente diluida conforme aumentó la distancia del sitio de disparo.

Zrelak et al. (2020) buscaron comprender las condiciones de transporte y deposición con base en estratigrafía y fábrica de forma mediante análisis textural cuantitativo de los depósitos de la erupción de mayo de 1980 ocurrida en el Monte Santa Elena, E.U (Figura 1.4B). A partir de sus estudios lograron demostrar que la fábrica de forma puede ser empleada para determinar variaciones de dirección en las corrientes piroclásticas de densidad a pequeña escala, y el desarrollo de la isorientación es mejor hacia la base de los depósitos y en las facies proximales.

Seguidamente, el objetivo de Hernández-Rivas et al. (2021) fue conocer acerca del transporte y origen de grandes flujos de escombros en el Volcán Citlaltépetl a partir del estudio de los depósitos del Lahar del Teteltzingo. Mediante datos morfométricos y morfológicos lograron identificar la distribución, extensión y dinámica de posibles eventos a una escala regional. Por otra parte, identificaron que la isorientación de las partículas tiende a disminuir respecto a la distancia del sitio de disparo del lahar y que la mayor isorientación se presenta en las partículas de tamaño grava.

Por último, Rodríguez-Sedano et al. (2022) emplearon análisis textural cuantitativo (granulometría y morfología) en conjunto con análisis morfométrico, estratigráfico y dataciones para estudiar el comportamiento del evento lahárico posterior a la erupción pliniana de 1913 acontecida en el volcán de Colima en la barranca La Lumbre. Desde el punto de vista del análisis textural encontraron una relación entre la granulometría y la morfología con la morfometría de la barranca La Lumbre.

TEORÍA DEL ANÁLISIS TEXTURAL Y ANTECEDENTES DE LA SECUENCIA PÓMEZ OCRE



DESCRIPCIÓN BREVE

En este capítulo se abarcarán los aspectos teóricos considerados importantes para la consecución del objetivo planteado. Los aspectos teóricos incluyen el Marco Geológico del Macizo Volcánico Popocatepetl y el Análisis Textural Cuantitativo.

DESCRIPTION

In this section, we analyze the theory of Quantitative Textural Analysis and the geology of Popocatepetl volcano.

Este capítulo contempla tres ejes temáticos: Marco Geológico del Macizo Volcánico Popocatepetl, Corrientes Piroclásticas de Densidad y Análisis textural.

2.1 Marco Geológico del Macizo Volcánico Popocatepetl

El volcán Popocatepetl es un estratovolcán con forma cónica que alcanza los 5393 m s.n.m. y se ubica en el límite entre los estados de Ciudad de México y Puebla, en específico a 70 km al SE de ciudad de México y a 40 km al W del centro poblacional de Puebla (Siebe y Macías, 2006; Smithsonian Institution, 2022f). El volcán Popocatepetl es un estratovolcán con depósitos comprendidos por lavas andesíticas y depósitos piroclásticos (Aguilera y Ordóñez, 1895). En su parte superior se pueden reconocer dos estructuras una conocida como Volcán El Fraile y la otra como Cima Popo (Robin y Boudal, 1987).

Macías (2005) realizó un compendio de la geología y la historia eruptiva de algunos volcanes de México, entre ellos el volcán Popocatepetl. El macizo Popocatepetl tiene en su base una secuencia de calizas, areniscas y evaporitas plegadas, durante el Cretácico Tardío al Paleógeno Temprano, que fueron intruídas por granodioritas del Paleógeno (Siebe y Macías, 2006). Robin (1981; 1984) definió dos periodos evolutivos para el volcán Popocatepetl que a su vez subdividió en tres unidades: (1) volcán Primitivo, (2) unidad Andesítica, y (3) como Terminal. Seguidamente, Robin y Boudal (1987) redefinen estratigráficamente el macizo, mediante datos de campo y geoquímica, en dos eventos magmáticos, el primero efusivo (<1 Ma) y el segundo presenta vulcanismo efusivo y explosivo (<30 ka), divididos por una fase caldérica (50 < x < 30 ka) a consecuencia de la presencia de una cámara magmática somera. El piso del primer evento efusivo fue datado por Nixon (1989) en 0,9 Ma por el método de K-Ar. La versión más reciente del mapa geológico fue presentada por Sosa-Ceballos et al., (2015; Figura 2.5).

La historia geológica de la primera fase eruptiva del volcán Popocatepetl ha sido poco investigada. Sin embargo, del primer evento descrito por Robin y Boudal (1987) se reconoce la estructura denominada El Ventorrillo. El Ventorrillo aflora principalmente en el escarpe El Abanico, donde han sido reconocidas lavas, rocas extrusivas y diques de composición variable, con una edad comprendida entre 331 ka y 14 ka, y que muestran evidencias de magma *mixing* (Sosa-Ceballos et al., 2015; Figura 2.5).

La fase eruptiva más reciente es la que conforma la cima actual del macizo, compuesta por lavas y depósitos piroclásticos interdigitados, y algunos conos de escoria y ceniza alineados de este a oeste (Siebe y Macías, 2006). Esta última fase fue descrita desde un punto de vista químico, mineralógico e isotópico por Schaaf et al. (2005), donde fue caracterizada por estar ligada a una subducción activa con contribuciones del *slab*. Además, presenta una cámara magmática longeva con evidencias de interacción

con calizas y xenolitos. Esta fase se caracteriza por registrar al menos 7 erupciones plinianas en los últimos 20 ka y, por tanto, un periodo de recurrencia de al menos 2 ka (Siebe y Macías, 2006). Dos de estas erupciones sucedieron en los 3 ka más recientes y afectaron centros poblacionales cercanos (Siebe et al., 1996a; 1996b). Uno de estos centros poblacionales fue el área arqueológica de Tetimpa, afectado por las Pómez Lorenzo y Rosa (Siebe et al., 1996a; 1996b; Panfil et al., 1999).

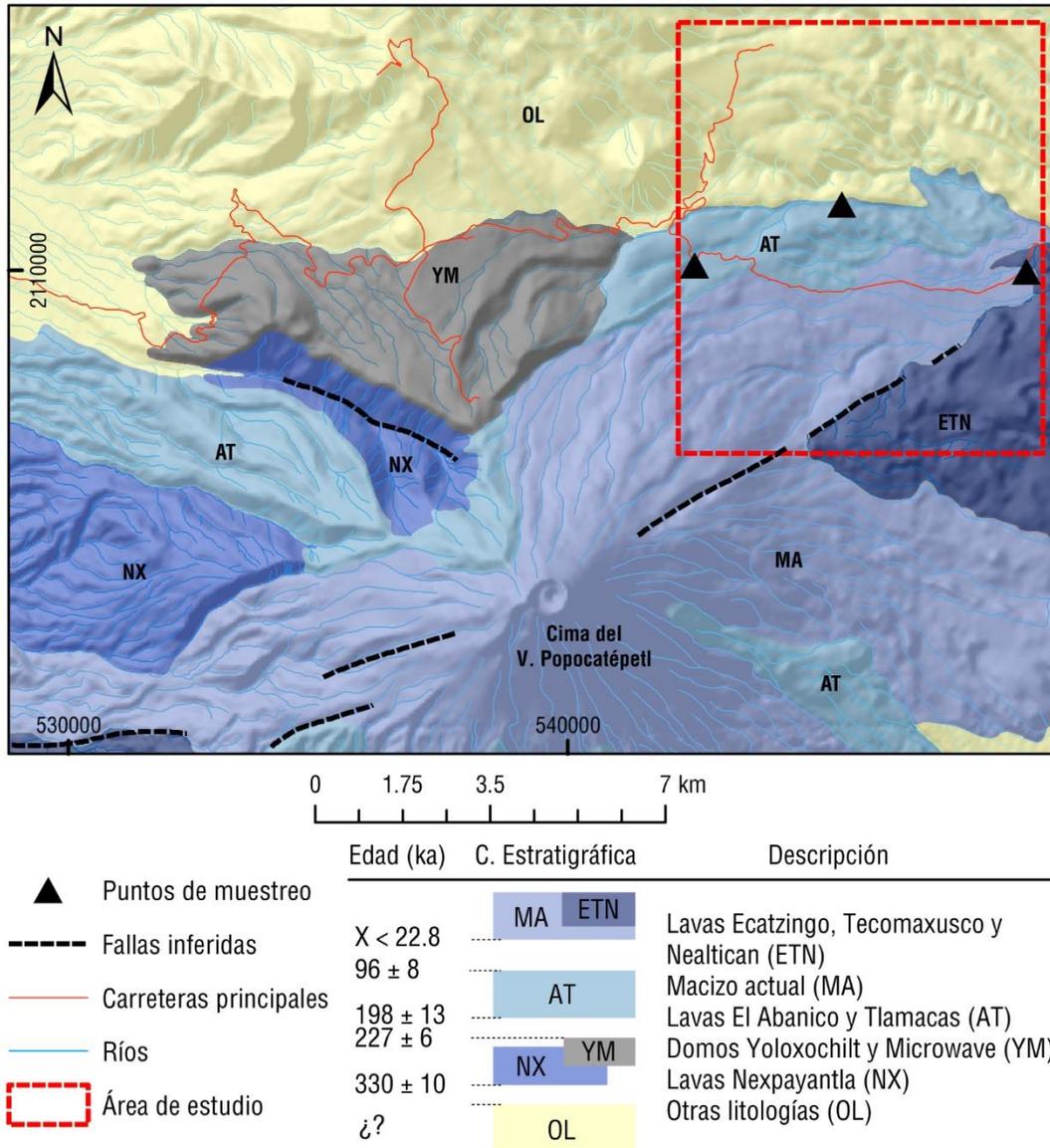


Figura 2.5. Mapa Geológico Regional del Volcán Popocatepetl. Modificado de Sosa-Ceballos et al., (2015) e INEGI.
 Figure 2.5. Geological model of Popocatepetl Volcano. Modified of Sosa-Ceballos et al., (2015) and INEGI.

Algunos de los eventos más representativos y destructivos ocurridos en el macizo Popocatepetl son los conformados por la denominada Erupción Pliniana Tutti Frutti, la Secuencia Pómez Ocre, la Pómez Lorenzo y la Pómez Rosa.

Mooser (1967) definió la pómez con andesita para hacer referencia a una parte de los depósitos de las Pómez Gris, Pómez Lechosa y Pómez Tutti Frutti, que Sosa-Ceballos et al. (2012) redefinieron y agruparon como la unidad Erupción Pliniana Tutti Frutti (TFPE) y los interpretan como procesos asociados a vulcanismo explosivo de flujo y de caída. Siebe et al. (1999) y Siebe y Macías (2006) reconocieron para esta unidad clastos de pómez, granitos, granodioritas, calizas y rocas metamórficas. La edad de estos depósitos es cercana a los 14 ka y son producto de una erupción freato-pliniana que generó un colapso de caldera (Siebe y Macías, 2006; Sosa-Ceballos et al., 2012).

La Secuencia Pómez Ocre o Erupción Pliniana del Precerámico Superior se compone de base a techo por depósitos de caída menores, depósitos de corrientes piroclásticas de densidad diluidas producidas por de explosiones hidromagmáticas, depósitos de caída con una dispersión NE y por último depósitos de corrientes piroclásticas de densidad concentradas canalizadas en paleovalles topográficos (Siebe et al., 1996a,b; Arana-Salinas et al., 2010; Bonasia et al., 2014; Franco-Ramos, et al., 2017; Figura 2.6). Es importante mencionar que los depósitos estudiados en esta investigación corresponden a dos depósitos de corrientes piroclásticas de densidad concentradas asociadas a esta Secuencia.

Arana-Salinas et al. (2010) datan esta secuencia en 4900 ± 250 años A.P. e indican que uno de los componentes principales de esta secuencia es la presencia de pómez con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno, olivino (muy característico en esta secuencia), óxidos y apatito. Además, mencionan que los depósitos muestran evidencias de mezcla de magmas y asimilación de rocas del basamento.



Figura 2.6. Secuencias piroclásticas recientes. Sec.: Secuencia. Póm.: Pómez.
Figure 2.6. Recent pyroclastic sequences. Sec.: Sequence. Póm.: Pumice.

Sobreyaciendo a la Pómez Ocre se identifica la Secuencia Erupción Pliniana del Cerámico Inferior (LCPES; Siebe et al. 1996a) redefinida por Siebe y Macías (2006) como Pómez Lorenzo (Figura 2.6). Esta Unidad está compuesta por la siguiente secuencia de base a techo: (1) depósitos de tobas de caída y corrientes piroclásticas de densidad de espesor pequeño, (2) depósitos de pómez de caída con clastos de

pómez amarilla a café, con líticos de rocas metamórficas de color verde claro y una matriz de ceniza rica en cristaloclastos, y por último (3) depósitos de corrientes piroclásticas de densidad y lahares asociados a su erosión (Siebe et al. 1996a; Panfil et al., 1999; Siebe y Macías, 2006). La edad de estos depósitos fue determinada mediante dataciones ^{14}C , con resultados entre 800 y 215 años A.C. (Siebe et al. 1996a).

El techo de la secuencia la compone la *Upper Ceramic Plinian eruptive Sequence* (UCPES), Eruptive Sequence II o Pómez Rosada (Siebe et al., 1996a; 1996b; Panfil et al., 1999; Siebe y Macías, 2006; Figura 2.6). Siebe et al. (1996a) y Siebe y Macías (2006) definen el evento de base a techo por depósitos de caída inferiores, de corrientes piroclásticas de densidad concentradas, de lahares, de corrientes piroclásticas de densidad diluidas y tres depósitos de caída superiores. En detalle, los depósitos de caída se caracterizan por poseer pómez rosadas a grises y blancas a amarillas claro, sin gradación, con plagioclasa, dos tipos de piroxeno, olivino, óxidos y una composición andesítica (Siebe et al., 1996a; Panfil et al., 1999; Siebe y Macías, 2006; Roberge et al., 2018). Desde el punto de vista petrológico, Siebe et al. (1996a) interpretan la presencia de olivino forsterítico como la continua inyección de magma básico a uno más sílico previo.

2.2 Materiales granulares, su flujo y las corrientes piroclásticas de densidad (CPDs)

Los materiales granulares son conjuntos de partículas macroscópicas como bolas de vidrio o arenas sin movimiento (Mitarai y Nori, 2006; Figura 2.7). Donde, su movimiento depende de una fuerza externa que produzca un cambio interno en los esfuerzos como una vibración o el efecto de la gravedad (Mitarai y Nori, 2006; Darías, 2014). Una vez producido el primer movimiento las condiciones de equilibrio se rompen y generan flujos granulares.

Kadanoff (1999) define los flujos granulares como el movimiento e interacción de grandes cantidades de partículas de diferentes tamaños, formas y densidades que se mueven en un medio líquido o gaseoso. La interacción de partículas en los flujos granulares es un proceso complejo, ya que puede ser de tipo colisional, friccional o hasta pueden llegar a comportarse en un estado cuasi-sólido cuando se deslizan y ruedan (Drake, 1990; Darías, 2014). En un estudio a detalle, Drake (1990) identificó que para bajos ángulos de inclinación y elevados flujos de partículas, que un flujo granular se caracteriza por tener una región inferior con régimen friccional y una región superior con régimen colisional (Figura 2.8). El mismo autor divide la región friccional en dos zonas: una cuasiestática y una de deslizamiento de bloques superpuesta a la primera. Mientras que, la región con régimen colisional la divide en una zona inferior de deslizamiento de partículas, una zona media con movimientos aleatorios y una zona superior con contactos de tipo saltacional. Por tanto, un flujo granular puede llegar a tener propiedades de fases sólidas, líquidas y gaseosas al mismo tiempo. Los flujos granulares son muy aplicados a la vida cotidiana

desde el uso de silos para la acumulación de grandes cantidades de material hasta el vaciado de una bolsa de arroz en la preparación de alimentos (Figura 2.7).



Figura 2.7. Materiales y flujos granulares. A. Arena. B. Bolsa de arroz. C. Anillos de Saturno.
Figure 2.7. Granular materials and flows. A. Sand. B. Rice. C. Saturn rings.

Dentro del ámbito geológico se reconocen flujos granulares en las rocas sedimentarias como en el caso de las turbiditas, olistostromas y en rocas asociadas a eventos explosivos y erosivos en volcanes como lo son las avalanchas volcánicas, las columnas eruptivas, los flujos de escombros y las corrientes piroclásticas de densidad (CPDs). Estos son fenómenos comunes y peligrosos, tanto que han llamado la atención de la comunidad científica internacional y causan grandes pérdidas a la humanidad cada año como decenas de miles de víctimas y millones en pérdidas económicas.

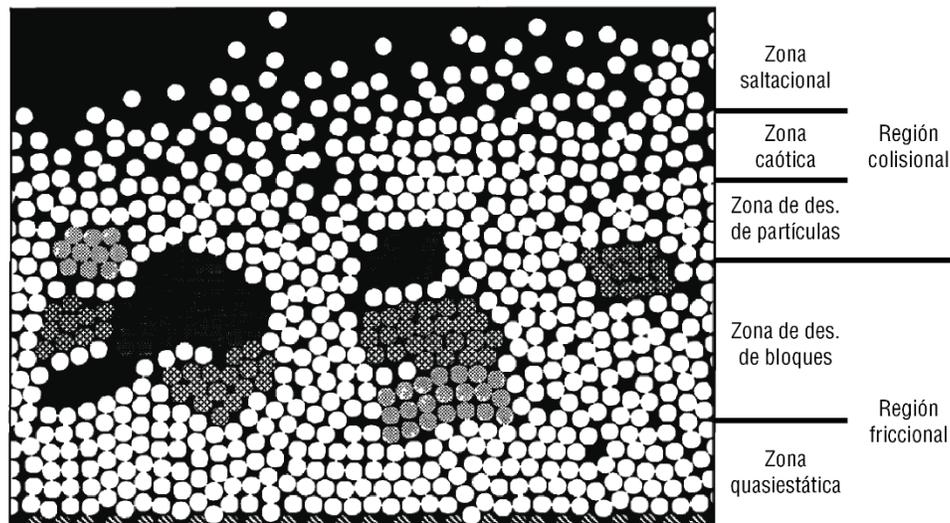


Figura 2.8. Regímenes de un flujo granular según Drake (1990).
 Figure 2.8. Granular flow regions by Drake (1990).

2.2.1 Nomenclatura de corrientes piroclásticas de densidad

A lo largo del tiempo se han empleado diversos términos en la nomenclatura de las corrientes piroclásticas de densidad y se enumeran a continuación. Primeramente, Lacroix (1905) describió el proceso por el cual una corriente piroclástica de densidad descendía del Mt. Pelée y lo denominó como nube ardiente (Figura 2.9B).

Marshall (1935) fue el primero en emplear el término ignimbrita, para referirse a rocas producto de un proceso eruptivo común en el cual, debido a la temperatura los clastos son adheridos entre sí. Además, las caracteriza como rocas coherentes de textura fina uniforme, con disyunción columnar pronunciada y textura eutaxítica en microscopía, así como ausencia de capas (Figura 2.9A).



Figura 2.9. Nomenclatura de rocas piroclásticas. A. Ignimbrite. B. Nueé Ardente, Pyroclastic flow, Pyroclastic density current.

Figure 2.9. Pyroclastic rocks nomenclatura. A. Ignimbrite. B. Nueé Ardente, Pyroclastic flow, Pyroclastic density current.

Seguidamente, Smith (1960) introdujo el término *ash flow* como una clasificación granulométrica para un flujo piroclástico (Figura 2.9B). Dentro de este incluye términos genéticos como: *tuff flow*, *incandescent tuff flow*, *sand flow*, *pumice flow*, *scoria flow*, *block and ash flow*, *gas and ash flow*, *hot ash*

flow, glowing avalanche, deposits of the St. Vincent vertical type, deposits of the Nueé Ardente du katmaiennes, deposits of the Valley of Ten Thousand Smokes type, Aso lava, ignimbrites Hai ishi, tuff lava, welded tuff, welded mud lava, schmelatuff, piperno, shirasu, sillar, entre otros. Al ser un término para referirse al proceso y no al depósito Ross y Smith (1961), definen los términos *ash flow* y *ash flow tuff*, el primero para hacer mención al proceso y el segundo para el depósito. Por lo tanto, un *Ash flow* se refiere a la mezcla turbulenta de gas y materiales piroclásticos de alta temperatura, expulsados de forma explosiva de un cráter o una fisura, que viajan por la ladera de un volcán a través de una superficie. Mientras que se denomina *Ash flow tuff* a los depósitos consolidados de un *ash flow*.

Sparks *et al.* (1973), redefinen el término ignimbrita, como una roca piroclástica compuesta predominantemente de material juvenil vesicular (pómez y trizas vítreas – *shards*), con evidencias que indican un origen por flujo piroclástico. Similar a la definición de Sparks *et al.* (1973), Walker (1983), describe una ignimbrita como un depósito piroclástico compuesto predominantemente de material pumíceo, con evidencia de haber sido emplazado a través de un flujo caliente y seco.

Fisher y Schmincke (1984) definen flujo piroclástico como corrientes de densidad comprendidas por partículas calientes y gaseosas de origen volcánico. Además, indican que los depósitos que generan estos eventos pueden ser clasificados en depósitos de flujos piroclásticos o depósitos de oleadas piroclásticas según las características que exhiban a escala de afloramiento.

Por otra parte, Cas y Wright (1987) dividen los depósitos según su composición en depósitos de flujos piroclásticos en depósito de flujo de pómez o ignimbrita, depósito de flujo de escoria y depósito de flujo de ceniza y bloques. Este último para hacer mención de flujos producto del colapso de domos, coladas de lava y columnas de ceniza de tipo vulcanianas.

Sato *et al.* (1992) subdividen los colapsos de domos en tres tipos según la variación entre la resistencia a la tracción (T_s) y el exceso de presión de poro (P_e). Estos tipos son: (1) tipo Merapi ($P_e < T_s$) para hacer mención de flujos provocados por la caída de fragmentos de domo, generada por el aumento de ceniza y gas, y pequeñas erupciones; (2) tipo Peleana ($P_e \leq T_s$ y localmente $P_e > T_s$) detonada por el flujo forzado de lava y la distribución heterogénea de presión de poro y agua en el domo; y (3) tipo Soufrière ($P_e > T_s$) producto de la explosión del domo y su erupción Vulcaniana asociada por el exceso de presión de poro.

Branney y Kokelaar (2002), introducen el término corriente piroclástica de densidad (CPD), definido como: mezclas de gas y partículas volcánicas heterogéneas que fluyen de acuerdo a su densidad

y la gravedad terrestre. Incluyen dentro de este término ignimbritas (*pumice flow*), depósitos de oleadas piroclásticas y flujos de bloques y ceniza (*ash and block flow*).

Brown y Andrews (2015) redefinen los conceptos de ignimbrita y corriente de densidad piroclástica. Ignimbrita: corriente de densidad piroclástica compuesta de proporciones variables de pómez, ceniza y líticos, usualmente usados para depósitos formados durante erupciones explosivas de gran tamaño. Corriente de densidad piroclástica: corriente de densidad de gas y partículas derivadas de una erupción caliente que se mueve lateralmente por la tierra (Figura 2.9B).

Por último, Palladino (2017) propone el término corriente piroclástica para englobar el espectro total de procesos que pueden generar una CPD. Ya que, según las definiciones anteriores solo contemplan el caso de corrientes piroclásticas regidas por densidad; sin embargo, también existen corrientes piroclásticas donde la densidad no juega un papel importante y las partículas se encuentran suspendidas en el aire como las zonas de *jet* y plumas.

En la presente investigación se consideró emplear el término corrientes piroclásticas de densidad (CPD) para hacer mención del proceso que dio origen a los depósitos estudiados, porque investigaciones previas en el área de estudio reconocen la presencia de varios depósitos desencadenados por corrientes piroclásticas regidas por densidad, es decir producto del colapso de columnas eruptivas.

2.2.2 Tipos de corrientes piroclásticas de densidad

La terminología más reciente de las corrientes piroclásticas de densidad (CPD) las divide en dos tipos según las características de los depósitos que forman (Branney y Kokeelar, 2002). Ya que, estas características responden a la reología del flujo y por tanto a su sedimentología. Branney y Kokeelar (2002) describen los tipos de corrientes piroclásticas de densidad, algunas propiedades de estas se resumen a continuación:

↩ **Corrientes piroclásticas de densidad diluidas completamente:** son corrientes en las cuales la interacción colisional entre partículas tiene un pequeño efecto sobre el soporte de las partículas, la segregación y la reología. El transporte y soporte de las partículas está dominado por la fase fluida, lo cual permite el desarrollo de flujos turbulentos. A nivel de afloramiento presentan estratificación y laminación donde pueden ser paralela o cruzada. Generalmente conforman los depósitos de oleadas piroclásticas, sin embargo, se pueden ubicar como facies subordinadas en ignimbritas, es decir en corrientes piroclásticas de densidad basadas en flujos granulares (Figura 2.10A).

↳ **Corrientes piroclásticas de densidad basadas en flujos granulares:** son el tipo de corrientes a donde la interacción entre partículas domina sobre el escape de fluidos y por tanto dominan la reología del flujo. Pueden generar depósitos masivos, estratificados, estratificados difusamente o tener diferentes patrones de gradación (Figura 2.10B).

Es necesario aclarar que Sulpizio et al. (2014) consideran llamar al segundo tipo CPD como corrientes piroclásticas de densidad concentradas y no corrientes piroclásticas de densidad basadas en flujos granulares.

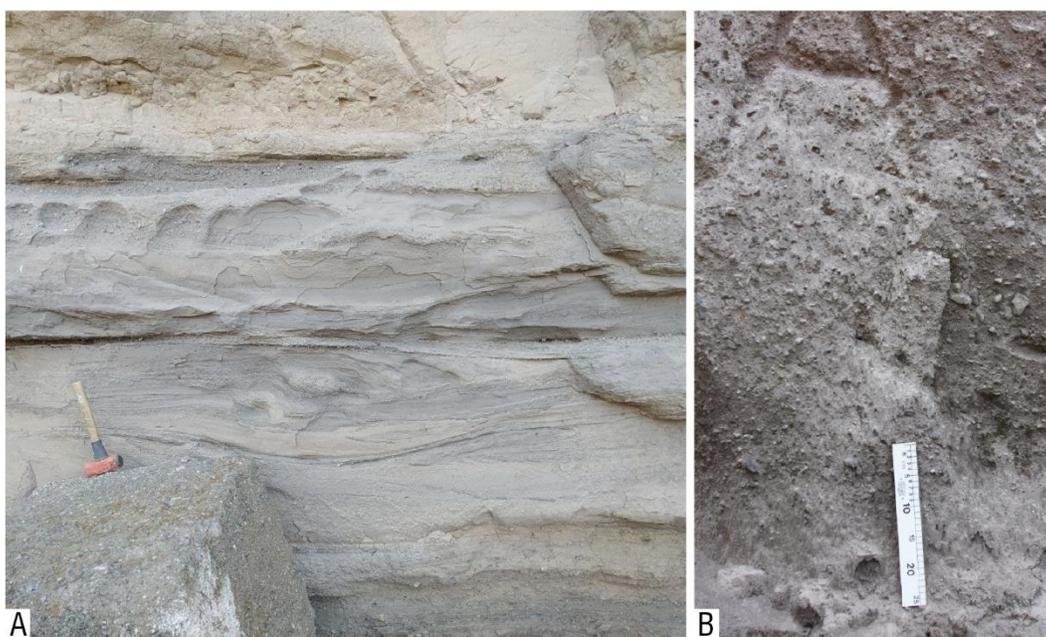


Figura 2.10. Tipos de corrientes piroclásticas de densidad. A. Diluidas. B. Basadas en flujos granulares - concentradas.
Figure 2.10. CPDs (Pyroclastic Density Currents) types. A. Dilute. B. Based on concentrated granular flows.

2.2.3 Mecanismos de generación de CPDs

2.2.3.1 Mecanismos de transporte y sedimentación de las corrientes piroclásticas de densidad

Las CPDs son flujos granulares complejos que tienen fases sólidas y fluidas coexistentes; estas son modificadas según (1) variaciones de aporte en tiempo y espacio, (2) segregación, (3) diferentes características de la zona límite de flujo, (4) absorción de aire, (5) influencia topográfica, y (6) procesos de sedimentación o erosión a lo largo de la pendiente (Branney y Kokeelar, 2002). La fase fluida soporta partículas sólidas a partir de los siguientes mecanismos: suspensión por turbulencia, saltación intermitente, tracción y soporte por fluido – fluidización; otros mecanismos de soporte de partículas son colisiones partícula-partícula y soporte por matriz (Sulpizio y Dellino, 2008).

Además, es importante mencionar que las diferentes combinaciones de los mecanismos de soporte de partículas pueden generar cambios en las concentraciones de los clastos, variar la intensidad de la zona de cizalla, influenciar los procesos de segregación y determinar la velocidad de sedimentación de las partículas (Sulpizio y Dellino, 2008). Por otra parte, la segregación tiene un efecto directo sobre la intensidad de la estratificación y las litofacies de los depósitos (Branney y Kokeelar, 2002; Sulpizio y Dellino, 2008).

Algunas combinaciones de mecanismos son: soporte por suspensión debido a turbulencia en el fluido, régimen de escape de fluidos y soporte por matriz, y soporte por interacción de partículas.

2.2.3.1.1 El soporte por suspensión debido a turbulencia en el fluido

Algunas propiedades de este mecanismo las han detallado Branney y Kokeelar (2002) y Sulpizio y Dellino (2008):

- ↖ La turbulencia funciona como mecanismo de soporte a partir de las fuerzas de arrastre y elevación del fluido.
- ↖ Los clastos al estar en un medio dominado por la turbulencia se segregan verticalmente.
- ↖ La turbulencia solo transporta partículas con velocidad terminal baja que se relacionan directamente a tamaños de ceniza fina, a excepción de las CPDs con grandes cantidades de energía.
- ↖ Las partículas con una velocidad terminal alta son parcialmente transportadas y se relacionan a tamaños mayores a limo.
- ↖ Se puede presentar en zonas a donde hay fuertes interacciones entre partículas y la presión dispersiva es importante.

Por otra parte, la velocidad terminal alta es producto de fluctuaciones de velocidad de las partículas en la zona límite de flujo, por tanto, toman parte en la sección inferior de la corriente, dando paso a la saltación (Schmeeckle y Nelson, 2003; Sulpizio y Dellino, 2008). La saltación es el movimiento de partículas con soporte intermitente por turbulencia (Sulpizio y Dellino, 2008).

2.2.3.1.2 Régimen de escape de fluidos y soporte por matriz

Sulpizio y Dellino (2008) determinan este mecanismo, algunas características son las siguientes:

- ↖ La fluidización de las CPDs está fuertemente relacionada a la cantidad de gas, la densidad de las partículas y al tamaño de las partículas presentes en el evento, por lo que este régimen se identifica en CPDs concentradas.

- ↩ La cantidad de fluido depende de la desgasificación de los juveniles y la permanencia de este en el flujo está directamente ligada a la porosidad de las rocas.
- ↩ Este régimen es común en flujos ricos en ceniza y con pocos clastos de gran tamaño a excepción de la pómez por su densidad.
- ↩ Pueden llegar a desarrollar cohesión con la presencia de arcillas.

2.2.3.1.3 Soporte por interacción de partículas

La interacción de partículas y la dispersión de energía que estas generan producen dispersión en cualquier dirección; donde el aumento de presión, la transferencia de masa y el *momentum* se relaciona directamente a la temperatura granular (Sulpizio y Dellino, 2008). La temperatura granular se refiere al grado de vibración entre clastos (Savage, 1984; Iverson, 1997). Por tanto, a valores altos de temperatura granular la presión mantiene la CPDs en un estado líquido y produce segregación por tamaño de grano (Sulpizio y Dellino, 2008). Los flujos de escombros no cohesivos son un ejemplo de corrientes dominadas por la temperatura granular (Postma, 1986). Este mecanismo también puede generar escombros de caída (debris - fall) producto de la interacción de partículas de gran tamaño que se mueven por efectos de la gravedad y su momentum (Sohn y Chough, 1993). Para este tipo de eventos y depósitos el tamaño de partícula es más importante que la densidad y la interacción de partículas se da principalmente por saltación y colisión (Drahn y Bridgewater, 1983; Branney y Kokeelar, 2002).

2.2.4 Modelos de sedimentación – Procesos depositacionales en CPDs

Previo a mencionar los modelos de sedimentación es necesario mencionar la manera en que se puede presentar la deposición de las CPDs. Ya que, puede ser de tres maneras diferentes (Branney y Kokeelar, 2002; Sulpizio y Dellino, 2008; Sulpizio et al., 2014; Figura 2.11A):

- ↩ Continua (*Steady*): el espesor del depósito aumenta de manera continua. Genera depósitos masivos (Figura 2.11C).
- ↩ Discontinua (*Discontinuous*): fluctuaciones en el espesor del depósito respecto al tiempo. Produce depósitos formados por las corrientes piroclásticas de densidad diluidas (Figura 2.11D).
- ↩ Escalonada (*Stepwise*): periodos de aumento constante o abrupto alternados con periodos de no deposición. Es común que constituyan depósitos estratificados (Figura 2.11B).

Según estos tipos de deposición se reconocen dos modelos de sedimentación: *masse freezing* y *progressive aggradation* (Branney y Kokeelar, 2002; Sulpizio y Dellino, 2008; Sulpizio et al., 2014; Figura 2.12).

La congelación masiva – *masse freezing* es provocada por flujos detenidos de manera abrupta que forman casi de manera instantánea los depósitos (Branney y Kokeelar, 2002; Sulpizio y Dellino, 2008; Sulpizio et al., 2014). Frentes lobulados son una morfología común en este modelo de sedimentación (Sulpizio et al., 2014).

La agregación progresiva – *progressive aggradation* es un modelo que establece que el depósito crece progresivamente por el suministro continuo de material (Branney y Kokeelar, 1992; Branney y Kokeelar, 2002; Sulpizio y Dellino, 2008; Sulpizio et al., 2014). Genera capas en los depósitos de ignimbritas más grandes (Sulpizio y Dellino, 2008) y por tanto se reconocen ciclos de secuencias fácilmente representados como laminaciones o estratificaciones finas (Sulpizio et al., 2014).

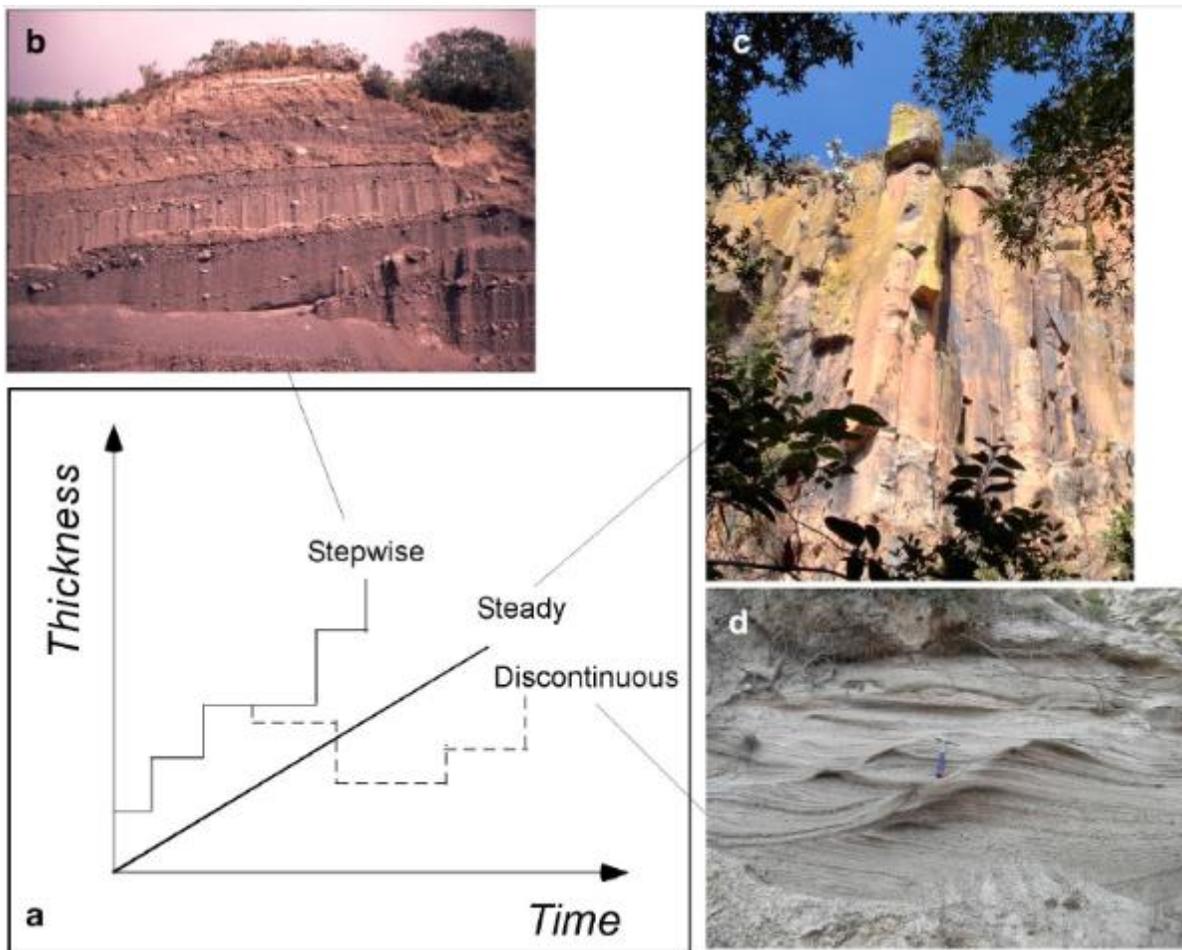


Figura 2.11. A. Maneras de deposición. B. Escalonada. C. Continua. D. Discontinua. Tomada de Sulpizio et al., (2014).
Figure 2.11. A. Deposition patterns. B. Stepwise. C. Steady. D. Discontinuous. Modified of Sulpizio et al., (2014).

2.2.5 Litofacies

Según algunos estudios recientes (Branney y Kokeelar, 2002; Sulpizio y Dellino, 2008; Sulpizio et al. 2014; Rodríguez-Sedano et al., en prensa; Dávila-Harris, en prensa; Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en

prensa) los depósitos piroclásticos asociados a flujos pueden ser caracterizados desde la sedimentología. Esto porque la sedimentología se encarga del estudio de los procesos de formación, transporte y deposición de material que se acumula en ambientes continentales y marinos (Nichols, 2009). Por lo que, es válido agrupar las rocas piroclásticas en facies, bajo el concepto de que corresponden a cuerpos de roca con características específicas que pueden ayudar a determinar su proceso de formación (Reading y Levell, 1996; Nichols, 2009).

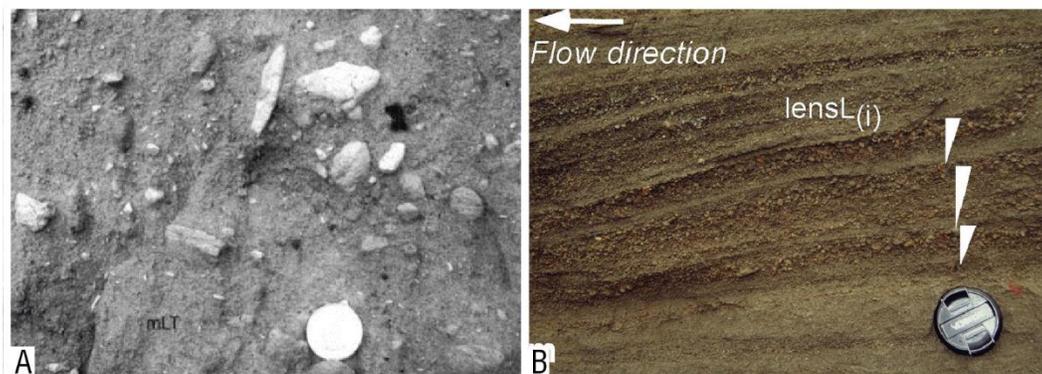


Figura 2.12. Modelos de sedimentación. A. Congelación masiva. B. Agregación progresiva. Tomado de: Branney y Kokeelar (2002) y Sulpizio et al., (2014).

Figure 2.12. Sedimentation models. A. Masse freezing. B. Progressive aggradation. Modified of Branney y Kokeelar (2002) and Sulpizio et al., (2014).

En específico, este término lo adoptaron Branney y Kokeelar (2002), en un panorama de rocas piroclásticas, y lo utilizaron para describir e interpretar depósitos. Esta caracterización se rige de acuerdo a la sedimentología clásica con base en propiedades como estructura, textura, organización interna, geometría y composición (Németh y Martin, 2007).

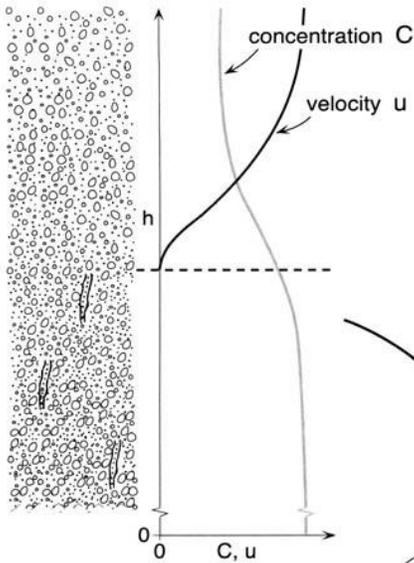
2.2.6 Arquitectura de litofacies

Las propiedades finales de los depósitos son la consecuencia de diferentes procesos físicos que involucran a las partículas y el medio en el que se propaguen. De manera más precisa, el ordenamiento de las partículas refleja las condiciones del flujo justo antes de su deposición (Sulpizio et al., 2014; Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en prensa). En el apartado vulcanológico se hace mención de la arquitectura de litofacies. Donde, la arquitectura de litofacies se relaciona a los procesos físicos ocurridos en la fase final de transporte de flujos granulares asociados a secuencias vulcano-sedimentarias (Sulpizio et al., 2014). Su estudio resulta una herramienta potente para la descripción, interpretación y entender las variaciones espacio temporales de los depósitos piroclásticos (Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en prensa).

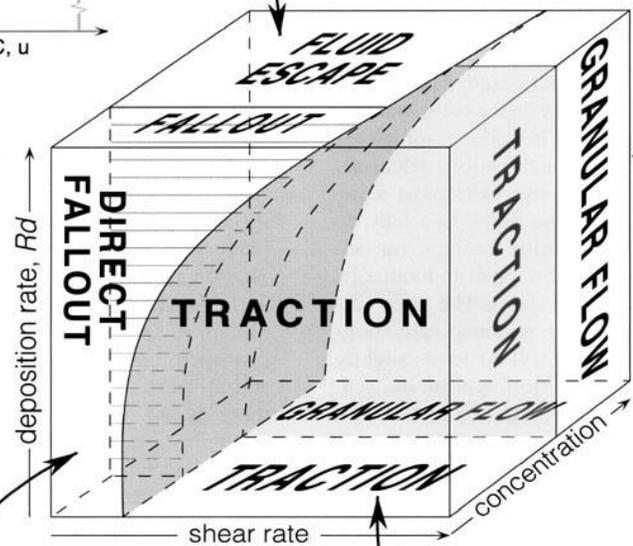
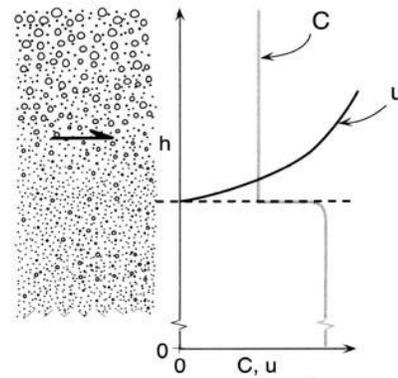
2.2.7 Zona límite de flujo – *Flow boundary zone (FBZ)*

La arquitectura de litofacies se encuentra controlada por las interacciones llevadas a cabo en la zona límite de flujo (*Flow Boundary Zone – FBZ*). Este término fue introducido por Branney y Kokelaar, (2002) y se refiere a la interacción entre el flujo y la base del depósito. La FBZ describe las interacciones partícula-partícula en la parte inferior de las CPDs durante su última etapa de transporte y es independiente al espesor de flujo o el comportamiento de la parte superior del flujo (Branney y Kokeelar, 2002; Sulpizio et al., 2014). Al estar gobernada por un régimen colisional (partícula-partícula), condiciona las litofacies del depósito final a partir de estructuras sedimentarias, tamaño de grano, clasificación – selección y composición (Sohn y Chough, 1989; Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en prensa). La FBZ es clasificable en cuatro diferentes regímenes: régimen de escape de fluido (CPDs con diferentes grados de concentración), régimen de caída directa (CPDs que forman nubes de ceniza de baja velocidad), régimen de flujo granular y régimen semi-turbulento (CPDs diluidas e ignimbritas); según la tasa de cizalla, la tasa de deposición y la concentración de partículas (Branney y Kokelaar, 2002; Figura 2.13). La Tabla 2.1 muestra un resumen de las características de cada uno de estos regímenes y algunas estructuras desarrolladas por sus litofacies asociadas.

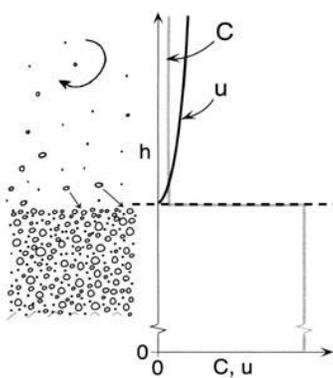
fluid escape-dominated flow-boundary zone



granular flow-dominated flow-boundary zone



direct fallout-dominated flow-boundary zone



traction-dominated flow-boundary zone

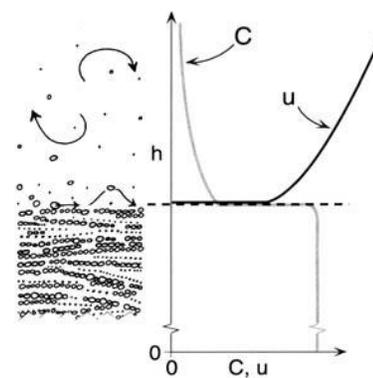


Figura 2.13. Conceptualización de los cuatro tipos de FBZ en una deposición continua. Tomada de: Branney y Kokeelar (2002).
 Figure 2.13. Types of flow boundary zone. Modified of Branney y Kokeelar (2002).

Tabla 2.1. Características de los regímenes de las zonas límite de flujo (Branney y Kokeelar, 2002; Sulpizio et al., 2014; Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en prensa).

Table 2.1. Characteristics of types of flow boundary zones (Branney y Kokeelar, 2002; Sulpizio et al., 2014; Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en prensa).

Régimen	Características sedimentológicas	Estructuras de la litofacies asociada	Otras características
De escape de fluido	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elevada concentración 2. Elevada tasa de cizalla 3. Elevada tasa de deposición 4. Granulometría fina 5. Contenido alto de fluidos 	<ul style="list-style-type: none"> ↙ Chimeneas de desgasificación ↙ Apariencia masiva ↙ Baja gradación inversa en pómez y normal en líticos 	<ul style="list-style-type: none"> ↙ Generan soporte por clastos por las altas concentraciones de partículas y bajas tasas de cizalla ↙ A altas tasas de escape se forman las chimeneas y estas solo se conservan en el depósito cuando son formadas bajo la FBZ ↙ El flujo superior a la FBZ se comporta como laminar y su espesor depende de la velocidad de la corriente, la concentración, el tamaño de grano y la tasa de deposición
De caída directa	<ol style="list-style-type: none"> I. Baja concentración II. Baja tasa de cizalla III. Variable tasa de deposición 	<ul style="list-style-type: none"> ↙ Masivos ↙ Lapilli acrecional ↙ Estratificación pobre 	<ul style="list-style-type: none"> ↙ Desarrollan patrones de fábrica débiles ↙ Las partículas se depositan con efectos despreciables de rodamiento, deslizamiento, saltación, colisión y efectos del escape de fluidos
De flujo granular	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elevada concentración 2. Elevada tasa de cizalla 3. Elevada tasa de deposición 4. Granulometría tiene a ser gruesa 5. Bajo contenido de fluidos 6. Temperatura granular puede ser elevada 	<ul style="list-style-type: none"> ↙ Imbricación ↙ Gradación inversa ↙ Rampas inclinadas 	<ul style="list-style-type: none"> ↙ Soporte por clastos generado por la alta concentración de partículas y la intensidad de cizalla ↙ Conservan características como fábrica de forma, patrones tipo <i>cluster</i> e imbricación a consecuencia de la cizalla granular en la FBZ ↙ En este grupo se ubican CPDs con diferentes grados de concentración de partículas y estar asociadas a mecanismos de transporte de suspensión por turbulencia en la parte superior de la CPD y mecanismos de soporte por interacción de partículas en la parte inferior de la CPD
Semi-turbulento	<ol style="list-style-type: none"> I. Baja concentración II. Elevada tasa de cizalla III. Baja tasa de deposición IV. Granulometría variable V. Corriente estratificada 	<ul style="list-style-type: none"> ↙ Dunas alternadas con estructuras tractivas ↙ La parte superior es bien seleccionada con alta cantidad de finos ↙ Lentes e imbricación de clastos alineados a la base ↙ Estratificación cruzada ↙ Laminación paralela y cruzada 	<ul style="list-style-type: none"> ↙ Las partículas se deslizan, ruedan o saltan durante su transporte ↙ Clasificación – selección moderada a buena ↙ Mecanismo de transporte por turbulencia de fluidos

2.2.8 Interpretación de litofacies

Para las ignimbritas, Branney y Kokeelar (2002) describen e interpretan once tipos de litofacies. Las mismas fueron resumidas y reinterpretadas por Brown y Andrews (2015). En la Tabla 2.2, se enumeran las litofacies, las características de los depósitos y la interpretación general propuestas por Branney y Kokeelar (2002) y Brown y Andrews (2015).

Tabla 2.2. Litofacies piroclásticas y sus características según Branney y Kokeelar (2002) y Brown y Andrews (2015).
 Table 2.2. *Pyroclastic lithofacies and characteristics by Branney y Kokeelar (2002) and Brown y Andrews (2015).*

Litofacies	Características de los depósitos	Interpretación general
Toba lapillítica masiva – Ignimbrita masiva	Mala a muy mala selección – clasificación Media de tamaño de grano es ceniza Pómez redondeada por abrasión y fragmentación Pueden tener diferentes tipos de gradación o no tenerla Los clastos llegan a ser de tamaño bloque Desarrollan fábrica Distribuciones de tamaño de grano gaussianas y polimodales Puede formar capas de orden centimétrico a métrico Pómez redondeada por abrasión	Las partículas experimentan un grado de cizalla mínimo Mala selección y ausencia de estratificación indican una FBZ con escape de fluidos La elutriación en los depósitos hace que la matriz tenga más cristales que las pómez Los cristales en la matriz pueden evidenciar procesos de fragmentación por la expansión de inclusiones fluidas durante la compresión eruptiva Evidencias de <i>progressive aggradation</i> : (1) variaciones laterales de los depósitos a litofacies estratificadas, (2) variaciones gradantes en la vertical de tamaño de grano, selección, composición química y fábrica, (3) variaciones complejas de gradación y selección y (4) por traslape entre zonificación composicional y topografía Las variaciones en el espesor se deben a inestabilidad de la tasa de deposición; mientras que un espesor constante se debe a una tasa de deposición continua El régimen de escape fluidos genera la pérdida de fábrica
Aglomerado masivo	Soporte por matriz o clastos Cognados de escoria densa a vesicular con lapilli accidental y <i>spatter clasts</i> Mala selección – clasificación Emplazamientos calientes y dúctiles Imbricación de clastos pobre Tienen a gradar a brechas líticas en la lateral e ignimbritas pumíceas Las formas de los clastos son muy variables Los clastos pueden presentar deformación dúctil y fracturas de enfriamiento Pueden presentar soldamiento	Deposición rápida en FBZs de alta concentración con régimen variable entre escape fluidos, semi-turbulento y de flujo granular Son comunes en zonas proximales, cerca de anillos de calderas Depósitos no soldados indican una tasa de enfriamiento rápida Se diferencian los aglomerados de flujo de los de caída por: (1) imbricación, (2) control topográfico en sus depósitos, (3) presencia de zonas con abundante matriz pumícea, y (4) gradaciones locales a litofacies masivas y brechosas Fueron corrientes ricas en ceniza y pómez, debido a la presencia de <i>life-raft structures</i> , clastos angulosos, horizontes ricos en finos, chimeneas de desgasificación y transiciones a ignimbritas ricas en pómez Los clastos cognados tienen un comportamiento similar a los bloques en depósitos proximales
Tobas estratificadas y con estratificación cruzada – Ignimbrita estratificada y con estratificación cruzada	Bien a mal seleccionada – clasificada Estratificación y estratificación cruzada bien definidas Estratos cíclicos de capas finas y gruesas que varían de tamaño ceniza a lapilli Estratos discontinuos de orden centimétrico a métrico Estratos truncados por erosión de bajo ángulo Estratos con buzamientos mayores a los 40° Su extensión varía de decímetros a metros	Estratificación subparalela, estratificación cruzada y buena selección son indicativos de un régimen de tipo semi-turbulento La estratificación subparalela es diferente de la laminación de caída porque tiene extensión limitada y tiene fábrica Los clastos finos son soportados por turbulencia del fluido, mientras los clastos más grandes saltan, se deslizan o ruedan sobre el sustrato Gradación inversa y lentes indican deposición discontinua y segregación de clastos en FBZ dominadas por flujos granulares

Continuación Tabla 2.2. Continuation Table 2.2.

Litofacies	Características de los depósitos	Interpretación general
Brechas líticas masivas a estratificadas	<p>Se pueden encontrar a cualquier altura dentro de los depósitos</p> <p>Mala selección – clasificación</p> <p>Soportadas por matriz o clastos</p> <p>Matriz con cantidades muy variables de finos</p> <p>Los clastos líticos provienen de la erosión del cono volcánico</p> <p>Clastos de hasta orden métrico</p> <p>Clastos aplastados e imbricados</p> <p>Bloques angulares a subredondeados</p> <p>Lentes</p> <p>Estratificación, estratificación difusa o cruzada</p> <p>Dunas</p> <p>Estructuras en flama y de carga</p> <p>Chimeneas de desgasificación</p> <p>Diferentes tipos de gradación</p> <p>No presentan pómez de gran tamaño</p>	<p>Generalmente son facies proximales o intermedias</p> <p>Se desarrollan en ambientes controlados por la topografía</p> <p>Las chimeneas y otras estructuras de segregación son producto de variaciones en el tamaño de grano y selección – clasificación</p> <p>La fragmentación y abrasión de los clastos baja son debido a un régimen colisional limitado</p> <p>Mala selección y ausencia de estratificación indican una FBZ con escape de fluidos</p> <p>Los bloques provienen de: erosión del macizo, avalanchas adentro de la corriente piroclástica de densidad, y erosión del sustrato</p> <p>La alteración hidrotermal de los clastos proviene de la alteración presente en el macizo</p> <p>La estratificación cruzada es producto de una FBZ con un régimen semi-turbulento</p> <p>Laminación paralela, falta de fábrica y estructuras de impacto son a consecuencia de una FBZ con un régimen de caída directa</p> <p>Variaciones en el espesor son fruto de un régimen granular o de escape de fluidos</p> <p>Las chimeneas y formas irregulares por segregación son producto de elutriación y carga durante episodios de deposición rápida</p> <p>La presencia de altos contenidos de ceniza y pómez es consecuencia directa del transporte y soporte a los que fueron sometidos los líticos en donde pudo pasar: (1) soporte boyante que incremento la densidad efectiva del fluido, (2) el aumento de viscosidad en un régimen de escape de fluidos, y (3) el incremento de la densidad general del flujo</p> <p>La estratificación e imbricación son producto de un régimen semi-turbulento con bloques rodando y saltando</p> <p>Los lentes son producto de la supresión de FBZ con régimen semi-turbulento</p>
Litofacies con estratificación difusa y laminación – Ignimbrita con estratificación difusa	<p>Estratos difusos de ceniza y lapilli</p> <p>Engrosamiento o adelgazamiento gradual de estratos</p> <p>Los estratos pueden ser continuos desde decímetros hasta metros</p> <p>Estratificación cruzada de bajo ángulo</p> <p>Mala selección – clasificación</p> <p>Gradación inversa o normal</p> <p>Espesores de orden métrico</p> <p>Puede ser subparalela</p>	<p>Han sido reportadas como litofacies subordinadas en ignimbritas</p> <p>Es una estratificación difusa producto de variaciones en el tamaño de grano y pueden mostrar gradaciones</p> <p>Son producto de tasas de flujo discontinuas, por tanto, variables. Estas son a consecuencia de: diferentes ondas – oleadas en un evento, efectos de fricción intrínseca en una FBZ, dominada por un régimen dominado por un flujo granular y corrientes internas que afectan la FBZ</p> <p>Deposición de FBZs con condiciones intermedias entre regímenes de escape de fluidos y semi-turbulento</p>

Continuación Tabla 2.2. Continuation Table 2.2.

Litofacies	Características de los depósitos	Interpretación general
Litofacies pobres en finos: chimeneas de desgasificación, capas y <i>pods</i> – Chimeneas de elutriación	<p>Chimeneas subverticales de orden milimétrico a métrico</p> <p>Capas y zonas de acumulación de clastos</p> <p>Márgenes sinuosos o rectos</p> <p>Son facies pobres en finos y ricas en líticos, cristales y pómez de tamaño lapilli</p> <p>Las chimeneas han sido ampliamente reportadas sobre sustratos húmedos</p> <p>Algunas chimeneas de desgasificación muestran alteración hidrotermal y oxidación, producto de fumarolas activas en los depósitos en la fase enfriamiento</p>	<p>Son producto de la segregación de clastos por pérdida de finos en corrientes verticales de gases o FBZ con régimen de escape de fluidos</p> <p>Los gases provienen de poros, vapor de ebullición de sustratos húmedos y la combustión de materia vegetal</p>
Capas ricas en pómez, lentes y <i>pods</i> – Ignimbrita rica en pómez	<p>Muy buena a muy pobre selección – clasificación</p> <p>Clasto soportado</p> <p>La matriz de ceniza puede no estar presente</p> <p>Gradación normal e inversa</p> <p>Se pueden ubicar a cualquier altura del depósito y las fases proximal, intermedia o distal</p> <p>Pueden generar frentes de flujo y levees</p> <p>Son horizontes subordinados</p> <p>No presentan clastos de gran tamaño</p>	<p>Son producto de corrientes piroclásticas de densidad ricas en pómez o producto de la segregación de pómez durante el transporte y deposición</p> <p>Se forman a partir de: (1) deposición discontinua, (2) FB que permitan la deposición de pómez de gran tamaño, y (3) deposición no uniforme</p> <p>La segregación puede darse por tamaño de clasto o por densidad</p>
Depósitos masivos y con estratificación paralela de lapilli	<p>Muy buena selección a moderada</p> <p>Predominantemente tienen pómez angular con líticos y ceniza subordinados</p> <p>Espesor de hasta orden métrico</p> <p>Masivos y pueden tener gradación</p> <p>Los contactos basales pueden mostrar estructuras de impacto de tamaño lapilli</p>	<p>Las litofacies con buena selección son producto de depósitos de caída de plumas eruptivas</p> <p>Capas paralelas son producto de deposición discontinua pero cercana a continua</p> <p>Patrones de gradación revelan cambios en la dinámica de la pluma eruptiva</p> <p>Las litofacies con grados de selección moderada son depósitos proximales de la pluma eruptiva</p>
Ignimbrita con lapilli acrecional	<p>Lapilli laminados y concéntrico en ignimbritas masivas o estratificadas</p>	<p>Producto de plumas eruptivas o nubes de ceniza coignimbríticas con deposición en una ignimbrita agradacional</p>

Continuación Tabla 2.2. Continuation Table 2.2.

Litofacies	Características de los depósitos	Interpretación general
Tobas con estratificación y laminación paralela	<p>Su granulometría varía entre ceniza fina y gruesa</p> <p>Las capas pueden ser masivas o mostrar patrones de gradación</p> <p>Se ubican a cualquier altura del depósito de la ignimbrita</p> <p>Muy buena a moderada selección – clasificación</p>	<p>Incluye depósitos de caída de plumas y depósitos ricos en ceniza de CPDs</p> <p>Para discriminar entre uno y otro: (1) revisar si los depósitos mantienen su tamaño de grano y espesor uniforme, (2) correlación de capas en diferentes lugares para ver si conservan espesores y tamaños de grano, (3) se siguen para determinar cambios laterales entre estratificación y estratificación cruzada, y (4) pómez con evidencia de rodamiento provienen de CPDs</p> <p>Laminación o estratificación paralela con selección moderada puede ser producto de un régimen de FBZ de caída directa en una CPD muy diluida</p>
Litofacies exutaxítica, reomórfica y tipo lava	<p>La fábrica eutaxítica es producto de la deformación de juveniles</p> <p>Algunas texturas eutaxíticas son producto de diagénesis en los depósitos</p> <p>La densidad y la tasa de deformación influyen directamente en el grado de soldamiento</p>	<p>Variaciones en soldamiento responden a variaciones reológicas durante mecanismos de agregación progresiva</p> <p>Las condiciones que controlan el comportamiento del soldamiento son: composición, contenido de volátiles, temperatura, tamaño de grano y contenido de líticos</p> <p>El desarrollo del soldamiento es durante el depósito</p> <p>Cuando el soldamiento sucede de una manera rápida se le nombra aglutinación y se evidencia con una fábrica inclinada, truncado de fábrica y el modelado análogo</p> <p>La aglutinación depende de la viscosidad de los piroclastos</p> <p>Altas temperaturas granulares en zonas donde hay cizalla rápida reduce la aglutinación</p> <p>Los procesos de FB no son afectados por el soldamiento postdeposicional, pero si son afectados por la aglutinación.</p> <p>El soldamiento previene la elutriación</p> <p>Una baja permeabilidad de los depósitos puede provocar soldamiento</p> <p>La disolución de gases (vapor de agua o halógenos), altos contenidos de álcalis y altas temperaturas ayudan a mantener la viscosidad baja y provocan el reomorfismo</p>

2.2.8.1 Tobas estratificadas secas vs. húmedas

En el caso específico de las tobas estratificadas Branney y Kokeelar (2002) delimitaron características de los depósitos según fueran emplazados de manera fría ($x \leq 100$ °C) o caliente ($x > 100$ °C). Estas características se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.3. Tobas estratificadas secas vs. húmedas.
Table 2.3. Stratified tuffs: dry vs. wet.

Depósitos fríos – corrientes húmedas ($x \leq 100$ °C)	Depósitos calientes – corrientes calientes ($x > 100$ °C)
Presentan vesículas, lapilli acrecional, estructuras de carga, estructuras de impacto, <i>ripples</i> , marcas de impacto de lluvia Son ricas en finos Mala selección – clasificación Los depósitos son duros y competentes	Las vesículas y el lapilli acrecional generalmente están ausentes Deposición en pendientes mayores a los 35° es difícil La ceniza fina puede ser abundante o escasa Su selección – clasificación es moderadamente buena

2.2.8.2 Interpretación de patrones de gradación

Para litofacies masivas Branney y Kokeelar (2002) proponen diferentes interpretaciones para los tipos de gradaciones según el componente involucrado (pómez y líticos). La Tabla 2.4 resume estas interpretaciones.

Tabla 2.4. Patrones de gradación e interpretaciones posibles.
Table 2.4. Gradational patterns and interpretations.

Gradación	Interpretaciones posibles
Normal de líticos	Pérdida de energía de la CPD Disminución en la cantidad de líticos por: (1) agregación progresiva de la CPD, (2) reducción de la erosión en el conducto o sitio fuente, (3) reducción en la capacidad erosiva de la CPD, y (4) canalización de la CPD Segregación en presencia de una FBZ con régimen de escape de fluidos Aumento en la tasa de cizalla en la FBZ que produce un aumento en la segregación granular
Inversa de líticos	Capacidad de la CPD de transportar clastos de gran tamaño Disponibilidad de clastos de gran tamaño en el sustrato Cambios en la FBZ que permitan la deposición de los clastos
Inversa en pómez	Capacidad de la CPD de transportar clastos de gran tamaño al igual que en el caso de los líticos Incremento en la disponibilidad de pómez Segregación por densidad y tamaño de grano Flotación de pómez
Diferentes patrones en líticos y pómez	Depósitos laterales en forma de capas Cambios en la disponibilidad de pómez vs. clastos Cambios en los regímenes de la FBZ

2.3 Análisis Textural Cuantitativo (ATC)

La textura, la composición y la estructura son algunas de las propiedades básicas de las rocas. En específico, la textura corresponde al análisis de partículas desde su dimensión, forma y arreglo geométrico tridimensional (Pettijohn, 1975; Sarocchi, en prensa). Mediante la textura se pueden caracterizar depósitos, comprender los mecanismos de formación de partículas, determinar el modo de transporte y deposición de partículas y comprender las propiedades mecánicas de las rocas que estas forman (Sarocchi, en prensa).

La textura abarca tres aspectos fundamentales: granulometría, forma y fábrica de forma (Sarocchi y Rodríguez – Sedano, en prensa). Donde estos parámetros texturales generalmente se obtienen de análisis de laboratorio y no en campo como las características estructurales (Sarocchi, en prensa). En las últimas décadas se han hecho esfuerzos por cuantificar de manera idónea el análisis textural. Algunos trabajos de importancia son: Moreno-Chávez et al., (2018); Moreno-Chávez et al., (2020), Cerca (2020) y Hernández-Rivas et al., (2021).

2.3.1 Granulometría

El arreglo tridimensional de las partículas es uno de los aspectos más importantes en el análisis de depósitos piroclásticos y sedimentarios (Capaccioni et al., 1997). La granulometría corresponde al estudio del tamaño de los granos, sus distribuciones y el grado de uniformidad de las dimensiones de las partículas que constituyen una roca (Sarocchi y Rodríguez – Sedano, en prensa; Sarocchi, en prensa).

El tamaño de las partículas está relacionado a su origen y es condicionado por los mecanismos de transporte y deposición. Por lo que al realizar comparaciones entre diferentes afloramientos y unidades para determinar cambios sedimentológicos a lo largo de los depósitos (Sarocchi et al., 2005; Sarocchi y Rodríguez – Sedano, en prensa; Sarocchi, en prensa). La escala granulométrica más usada en la actualidad es la que propuso Krumbein (1934; Figura 2.14) en la cual define el parámetro phi como $\phi = -\log_2 \text{diámetro de la partícula (mm)}$.

Debido a que no hay un método que abarque todo el espectro granulométrico, la descripción de este requiere de varios métodos de medición (Sarocchi y Rodríguez – Sedano, en prensa; Sarocchi, en prensa). Una forma de abarcar el espectro granulométrico total es combinar diferentes técnicas como: granulometría óptica (-13 a 1 phi), tamizado seco (-4 a 4 phi) y con métodos sedimentográficos (4 a 9 phi; Sarocchi et al., 2011).

Sin embargo, los análisis granulométricos pueden presentar problemas. Sarocchi et al. (2011) enumeran algunos de estos problemas:

- ↖ El afloramiento no es accesible para el muestreo
- ↖ En depósitos con cierto grado de competencia no se puede aplicar el tamizado

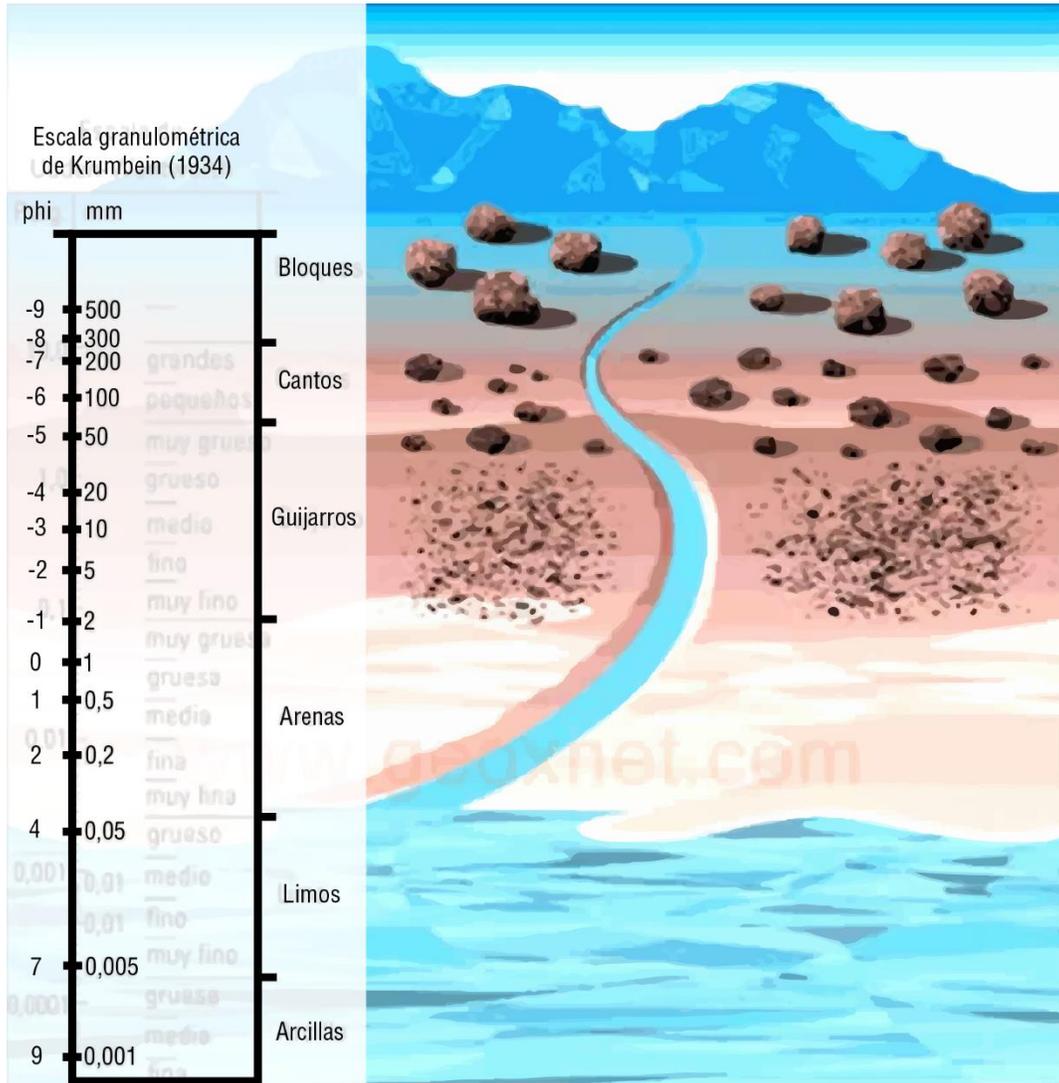


Figura 2.14. Escala granulométrica de Krumbein (1934). Tomado y modificado de: <https://post.geoxnet.com/>
Figure 2.14. Granulometric scale by Krumbein (1934). Modified of: <https://post.geoxnet.com/>

2.3.1.1 Técnicas de medición del tamaño de las partículas

2.3.1.1.1 Métodos por sedimentación

Este tipo de métodos toman como base las velocidades con las que las partículas se mueven en un líquido bajo la interacción de fuerzas de tracción (Sarocchi, en prensa). Esta velocidad permite

mediante la ley de Stokes medir de una forma indirecta el tamaño de las partículas cuando se sedimentan en un medio líquido (Sarocchi, en prensa).

Algunos errores relacionados al análisis por sedimentación son (Allen, 1997; Sarocchi, en prensa):

- ↖ Cantidad de muestra utilizada
- ↖ Formación de agregados de partículas
- ↖ Variaciones de viscosidad
- ↖ Convección en el líquido
- ↖ Representatividad de la muestra

Algunas técnicas que aplican el principio por sedimentación son:

Método de las pipetas: consiste del muestreo de soluciones a diferentes profundidades en un envase graduado (Figura 2.15), donde estas soluciones son representativas de la concentración real de partículas en el punto de muestreo, por lo que es posible construir curvas de concentración en función del tamaño o curvas granulométricas acumulativas (Lewis y McConchie, 1994; Sarocchi, en prensa).



Figura 2.15. Método de las pipetas. Tomado de: <http://www.lapacacr.com/>
Figure 2.15. Pipettes method. Modified of: www.lapacacr.com/

↖ Método fotosedimentográfico: este método emplea un haz de luz proyectado hacia a una fotocelda a una distancia conocida, donde la refracción de la luz provocada por la interacción de las partículas con el haz genera diferentes longitudes de onda según su tamaño y cantidad (Sarocchi, en prensa).

↩ Métodos de análisis mediante *stream scanning*: son métodos a donde el tamaño de las partículas es medido de acuerdo a una propiedad física específica como: acústica, luminiscencia, eléctrica, etc (Sarocchi, en prensa).

↩ Método del *Coulter – Counter*: es un tipo de análisis que emplea el *stream scanning* y comprende la medición de la impedancia eléctrica que generan las partículas al atravesar un campo eléctrico (Sarocchi, en prensa).

2.3.1.1.2 Método del Tamizado

Es el método más práctico, sencillo y fácil de reproducir (Sarocchi, en prensa). Consiste de colocar una muestra sobre un tamiz con un patrón abertura conocido (Figura 2.16). Con una posterior agitación los sedimentos de tamaño menor a la abertura conocida atravesarán el tamiz y los de tamaño mayor quedarán retenidos en la malla. El proceso se lleva a cabo con varios tamices, colocados verticalmente uno sobre otro, con aberturas relacionadas directamente a la escala propuesta por Krumbein (1934). Por lo que, al final del tamizado se conocen las relaciones porcentuales en peso de los diferentes tamaños de grano de interés.

En el caso de materiales volcánicos friables como pómez, se debe considerar un corto periodo de tiempo de tamizado para evitar que las partículas tengan desgaste por vibración (Sarocchi, en prensa). Además, para depósitos monolitológicos no es necesario hacer correcciones por densidad (Sarocchi et al., 2011).



Figura 2.16. Tamices. Tomado de: <https://www.directindustry.es/>
Figure 2.16. Sieves machine. Modified of: www.directindustry.es/

Algunas causas de error asociadas al tamizado de partículas son (Ludwick y Henderson, 1968; Allen, 1997):

- ↖ La forma de las partículas
- ↖ Irregularidades en las mallas o tamices
- ↖ Tiempo y tipo de tamizado según el material y el tipo de tamiz
- ↖ Factores relativos a la reducción de los datos
- ↖ No usar la cantidad de material proporcional a la capacidad del tamiz

2.3.1.1.3 Métodos ópticos

El método óptico es el único que puede ser aplicado en rocas competentes o duras y requiere de un número elevado de mediciones para que sea significativo (Sarocchi, en prensa). Además, pueden ayudar en situaciones donde los afloramientos sean de difícil acceso para efectuar análisis granulométricos sin recolección de muestras (Sarocchi, 1993; Sarocchi et al., 2005; Sarocchi et al., 2011). El método normalmente se emplea para medir clases granulométricas grandes ($< -3 \Phi$), sin embargo, cambiando la óptica puede ser aplicada a cualquier escala (Sarocchi et al., 2005).

Este tipo de métodos han sido ampliamente discutidos y aplicados en diferentes tipos de depósitos piroclásticos, aunque la literatura sobre el tema es todavía limitada (Sarocchi et al., 2005; Sarocchi et al., 2011; Rodríguez -Sedano et al., 2022; Sarocchi, en prensa). Otra ventaja de estos métodos, es que son aplicables en entornos donde el contraste de tono y de color entre clastos y matriz es muy bajo (Sarocchi et al., 2005).

Sarocchi et al. (2005) propusieron una metodología sistemática para la toma de imágenes, donde se toma en cuenta la perspectiva para la corrección de las deformaciones asociadas.

Para ser aplicado el análisis óptico se debe utilizar una conversión probabilística del dato en 2D para obtener información volumétrica. Esto se realiza por medio de la estereología, una rama de la topología matemática que se encarga de extrapolar de dato observable en dos dimensiones a un dato volumétrico. A continuación, se enumeran algunos de ellos:

Algunos métodos que emplean la óptica son:

- ↖ **Conteo de puntos:** propuesto por Thomson (1930) consiste de colocar una malla de puntos sobre una imagen de interés. Cada punto estará sobre un componente específico, por lo que la suma de puntos sobre componentes del mismo tipo se puede emplear para calcular los porcentajes en peso sobre todo el depósito.

↙ Intercepciones: presentado por Rosiwal (1898). Esta técnica fue descrita por Sarocchi et al. (2005) y Sarocchi et al., (2011) y consiste en sobreponer una malla equiespaciada a una fotografía de un afloramiento de interés (Figura 2.17). Seguido se miden las intercepciones de las líneas con los clastos que estas líneas de la malla atraviesen. La relación entre las intercepciones de cada clase y la longitud total de las líneas, está directamente relacionada con la relación entre el volumen de las partículas en la clase considerada y el volumen total de partículas. Cuando esta medición se aplica a cada línea, se pueden obtener perfiles granulométricos a lo largo de la vertical en el depósito. (Sarocchi et al., 2005; Sarocchi et al., 2011; Rodríguez -Sedano et al., 2022).

↙ Intercepciones de Lord y Willis: es un método que permite obtener una distribución tridimensional de las partículas a partir de secciones bidimensionales de poblaciones polidispersas de objetos esféricos (Sarocchi, en prensa). Mediante una aproximación De Hoff y Rhines (1968) adaptaron este método para partículas de cualquier forma.



Figura 2.17. Método de Rosiwal. Tomado de: Sarocchi et al., (2005).
Figure 2.17. Rosiwal method. Modified of: Sarocchi et al., (2005).

↳ Despliegue de las esferas – de Saltikov: es un método que permite la caracterización en 3D de distribuciones a partir de la medición de partículas en cortes 2D (Scheil, 1931). Posteriormente, Saltikov (1958) mejoró el método y por ende se debe su nombre. El método se basa en medir las áreas de las partículas en cortes bidimensionales, sin embargo, para obtener un dato correcto a partir de las áreas, es necesario aplicar una matriz de corrección.

Los métodos ópticos pueden ser usados a cualquier escala y sus limitantes se reducen a la resolución de las imágenes y la calidad general de la imagen (Sarocchi et al., 2005). Pero, su empleo más común ha sido para completar el espectro granulométrico en la componente gruesa de la distribución granulométrica (Sarocchi et al., 2011; Rodríguez-Sedano et al., 2022).

El dato granulométrico general de la componente gruesa de los depósitos permite realizar Perfiles Granulométricos Ópticos (OGP). Estos perfiles se obtienen mediante el método de intercepciones propuesto por Rosiwal (1898). En este caso la malla se orienta paralelamente a la estratificación y de cada línea se obtienen parámetros granulométricos estadísticos como media, mediana, selección / clasificación, percentiles y la tasa de bloques vs. matriz (Sarocchi et al., 2011).

Los perfiles permiten describir las características de tamaño de grano de los depósitos en la vertical permitiendo apreciar variaciones sedimentológicas a veces no visibles a simple vista (Sarocchi et al., 2011).

2.3.2 Morfología – Forma

La morfología de una partícula se relaciona directamente a su composición – naturaleza, el ambiente y el tiempo de transporte y sedimentación (Sarocchi, en prensa; Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en prensa). Además, la forma es susceptible a diferentes procesos físicos, típicos en flujos granulares, como colisiones, abrasión, fricción, pulverización, presencia o no de agua, entre otros (Caballero et al., 2014; Moreno-Chávez et al., 2020).

Barret (1980) cambió radicalmente la corriente de pensamiento de los análisis morfológicos cuantitativos, donde menciona que la morfología de las partículas puede ser descrita a partir de su forma general, redondez y textura superficial. La forma general indica variaciones en las proporciones generales de la partícula, la redondez refleja variaciones en los ángulos principales del perfil perimetral, y la textura superficial estudia las irregularidades más finas de las partículas (Sarocchi, en prensa; Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en prensa).

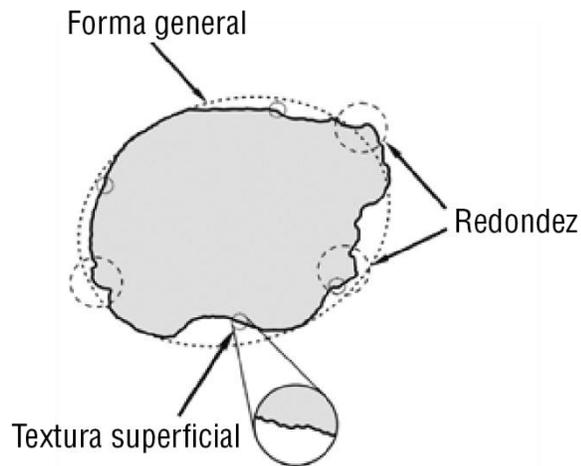


Figura 2.18. Propiedades de la morfología de la partícula. Modificado de Moreno-Chávez et al., (2020).
 Figure 2.18. Morphological properties of a particle. Modified of Moreno-Chávez et al., (2020).

El orden de los parámetros morfológicos es jerárquico donde la textura superficial no afecta la redondez y la forma general, pero la forma general influencia directamente a la redondez y la textura superficial (Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en prensa; Figura 2.18). Como factores adicionales, la redondez y la textura superficial dependen de la abrasión debida a la fricción y la alteración química (Moreno-Chávez et al., 2020).

Un tipo de medición morfométrica en 2D de amplio uso y efectividad es el Análisis de Fourier (Sarocchi, en prensa), donde este análisis permite la cuantificación de la forma general, la redondez y la textura superficial a partir de amplitudes armónicas (Barrett, 1980; Sarocchi et al., 2011; Moreno-Chávez et al., 2020). Esta cuantificación se obtiene a partir, de la generación de un perfil o histograma del perímetro de las partículas respecto a las coordenadas polares (Sarocchi, 2011).

Los resultados obtenidos son de fase y amplitud, donde los primeros armónicos (3-6) se relacionan a la forma general, los armónicos intermedios (7-15) a la redondez y los últimos armónicos (16-50) corresponden a la textura superficial de las partículas (Sarocchi, 2011; Rodríguez-Sedano et al., 2022).

2.3.3 Fábrica de forma

La fábrica de forma se refiere a la orientación y el grado de isorientación en 3D de clastos y cristales de forma alargada (Moreno-Chávez et al., 2018; Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en prensa). Esta se puede presentar en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas ígneas se debe a la hidrodinámica viscosa del magma (Herrero-Bervera et al., 2001), en rocas sedimentarias es producto del ambiente deposicional y las interacciones entre partículas (Mulchrone y Meere, 2015) y en rocas

metamórficas es a consecuencia de efectos combinados de deformación y reacciones mineralógicas (Spry, 1969).

Un objetivo de la fábrica de forma es permitir conocer acerca de la dirección de flujo, magnitud, su polaridad y cuando sea posible inferir la velocidad de los desplazamientos de las fuerzas que han actuado en la roca (Capaccioni et al., 1997; Moreno-Chávez et al., 2018; Sarocchi y Rodríguez-Sedano, en prensa; Figura 2.19). Donde, en los primeros estudios ha sido usada en inferir la dirección de flujo de las turbiditas y otras secuencias sedimentarias (Davies y Walker, 1974).

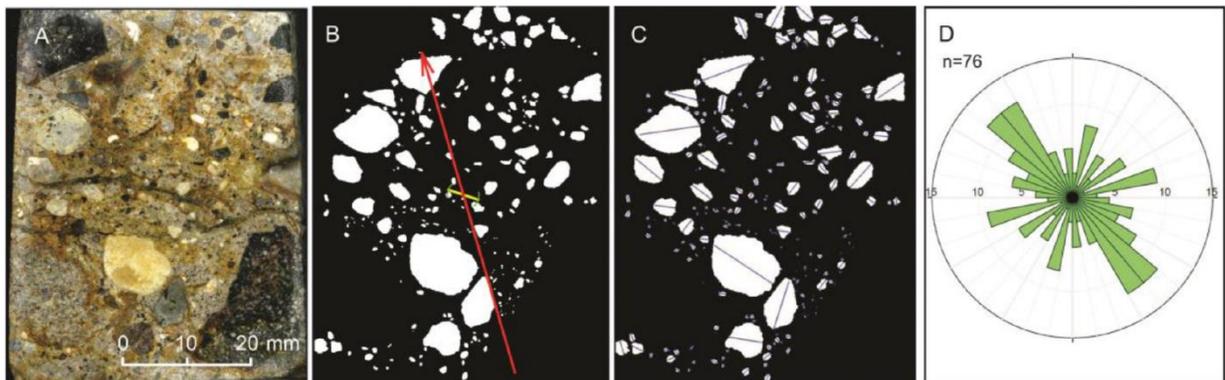


Figura 2.19. Análisis de fábrica de forma. A. Corte de roca pulido. B. Orientación de la imagen binaria. C. Orientación de los ejes mayores. D. Diagrama de rosas que muestra la orientación y la isorientación de las partículas. Tomado de: Hernández-Rivas et al., (2021).

Figure 2.19. Shape fabric analysis. A. Polished rock cut. B. Oriented binary image. C. Orientation of principales axes of particles. D. Rose diagram. Modified of: Hernández-Rivas et al., (2021).

La medición de este parámetro textural puede ser de dos maneras diferentes: partícula a partícula o en roca total (Zrelak et al., 2020). Los de partículas requieren de determinar la orientación espacial partícula a partícula, mientras que los de roca total se limitan a la anisotropía de susceptibilidad magnética (Capaccioni et al., 1997). La medición de la fábrica de forma puede ser en campo a partir de la medición de la orientación de ejes largo, corto e intermedio o en laboratorio mediante muestras orientadas y los resultados de estos son representados con diagramas de rosas que emplean redes de Schmidt, porque permiten trabajar con “nubes” de datos (Cerca, 2020).

La fábrica de forma puede ser dividida en: (1) microfábrica para referirse a la isorientación de minerales, clastos y cristales, y (2) macrofábrica para hacer mención de la orientación de ejes de pliegues, foliaciones, lineaciones y diaclasas (Moreno-Chávez et al., 2018).

Algunos estudios pioneros llevados a cabo con éxito en el ámbito vulcanológico son los de:

↳ Capaccioni y Sarocchi (1996) estudiaron la fábrica de forma de la ignimbrita del Complejo Volcánico Vulsino en Italia a partir del análisis textural cuantitativo asistido por computadora. Concluyeron

la ubicación del sitio de origen y mecanismos de agregación progresiva en los depósitos. Posteriormente, Capaccioni et al., (1997) validaron estos resultados mediante estadística circular.

A partir de este trabajo y la metodología aplicada se han realizado una serie de trabajos de investigación. A continuación, se mencionan los principales trabajos llevados a cabo mediante variantes de esta metodología.

↩ Cerca (2020) implementó una metodología para determinar el efecto de la arcilla en la isorientación de partículas en flujos de escombros modelados analógicamente. La autora afirma que la metodología es satisfactoria para y demostró que los flujos de escombros cohesivos desarrollan patrones de isorientación de partículas mejor definidos que los flujos no cohesivos.

↩ Zrelak et al. (2020) cuyo objetivo fue identificar las condiciones de transporte y deposición de las partículas de los eventos piroclásticos ocurridos en el Monte Santa Helena durante mayo de 1980 desde el punto de vista estratigráfico y de fábrica de forma. Los autores encuentran que los depósitos presentan buenos grados de isorientación de partículas correspondientes con la dirección de las corrientes piroclásticas de densidad. Sin embargo, esta isorientación se pierde en la vertical de los depósitos debido a cambios en la interacción entre partículas.

↩ Hernández-Rivas et al. (2021) buscan determinar la interacción entre la geomorfología y los mecanismos de transporte, mediante el análisis de fábrica de forma, en los depósitos del lahar del Tetelzingo. Los autores reconocen que la isorientación está mejor conservada en la zona proximal que en la distal de los depósitos, donde a su vez los clastos más gruesos son los más sensibles a orientarse.



METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS TEXTURAL CUANTITATIVO

DESCRIPCIÓN BREVE

En este capítulo se mencionarán los materiales y métodos empleados necesarios para el desarrollo de esta investigación. Los principales temas abordados son: recopilación bibliográfica, trabajo de campo, preparación de muestras, análisis textural cuantitativo y el análisis de resultados.

DESCRIPTION

This chapter describes the materials and methods used in this research. The main topics of this section are: Bibliography, Fieldwork, Sample preparation, Quantitative Textural Analysis and Results Analysis.

El apartado metodológico de la presente investigación contempla varias fases para alcanzar la etapa de conclusiones y recomendaciones. Estas fases se representan en el diagrama de flujo presentado a continuación (Figura 3.20). Algunas de estas contemplaron el uso de materiales e instrumentación específica, por lo que también se procede a indicar las calidades y cualidades de los mismos. En el Apéndice II se detallan las características de los programas empleados.

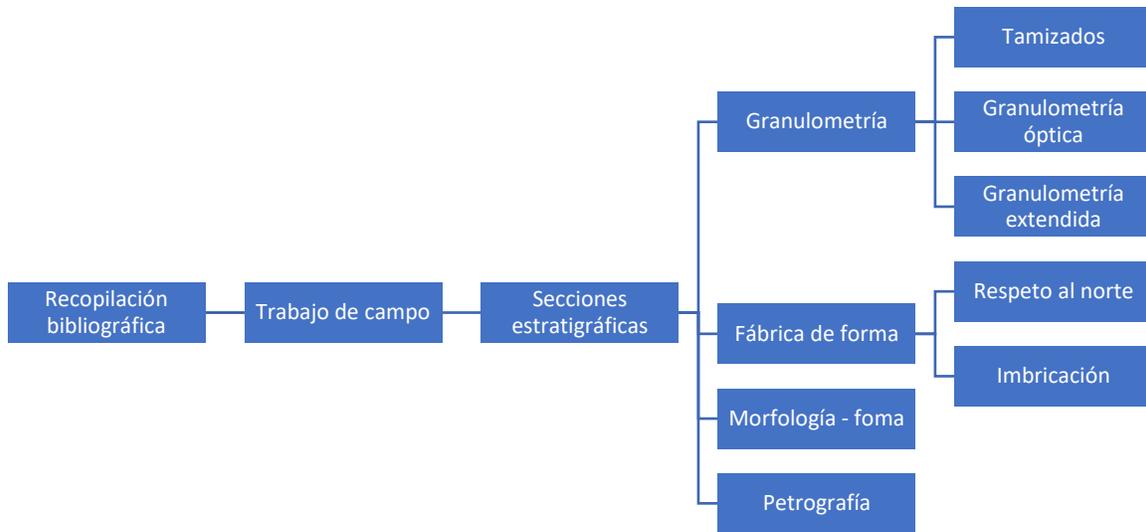


Figura 3.20. Secuencia metodológica y actividades principales a desarrollar.
 Figure 3.20. Methodology and activities.

3.1 Recopilación bibliográfica

Se hizo una recopilación bibliográfica enfocada en el Análisis Textural Cuantitativo (ATC) y el marco geológico regional del Volcán Popocatepetl. La recopilación incluyó artículos científicos, libros, capítulos de libros, tesis de diversos grados e informes técnicos especializados. Para el ATC se tuvo un enfoque en fábrica de forma, análisis morfológico y granulometría, sus implicaciones físicas en depósitos de CPDs y metodologías empleadas. Mientras que, respecto al volcán Popocatepetl se investigó sobre una perspectiva regional de tipo estratigráfica del macizo volcánico y un conocimiento específico y detallado sobre las unidades de la Secuencia Pómez Ocre.

3.2 Trabajo de campo

El trabajo de campo fue llevado a cabo en dos visitas al campo. La primera visita constó de la búsqueda, descripción y muestreo parcial de afloramientos de una secuencia piroclástica completa y representativa a lo largo de la Barranca Seca. Esta se ubica cercana al camino que comunica Santiago

Xalitzintla y Paso de Cortés en el sector NE del Macizo Popocatepetl en la Carta Topográfica Huejotzingo E14B42. La segunda visita consistió de completar la descripción y muestreo de los sitios a estudiar.

En detalle la búsqueda de afloramientos se hizo en vehículo y mediante caminatas en los lugares más inaccesibles. La selección de los afloramientos constó de buscar sitios representativos con indicadores estratigráficos relevantes que permitieran reconocer la secuencia Pómez Ocre completa (Figura 3.21).

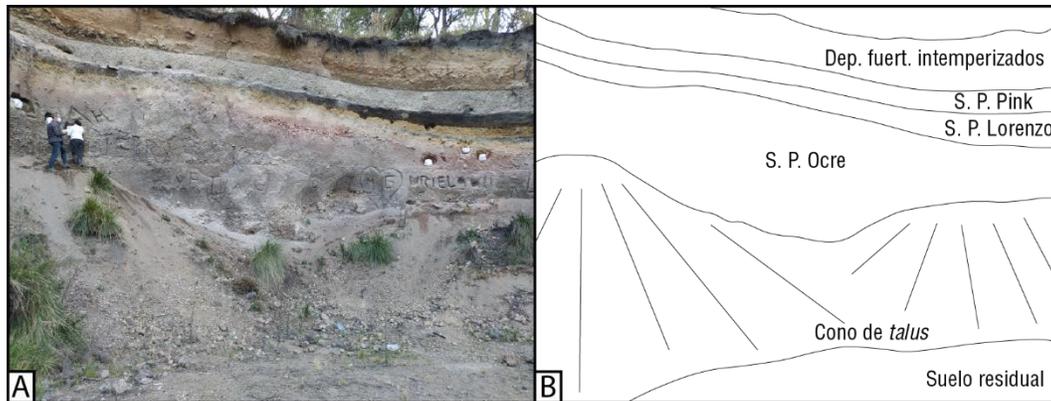


Figura 3.21. A. Afloramiento de estudio representativo (PT2101 – 542534/2110104). B. Esquema interpretativo. Dep.: Depósito. Fuert.: Fuertemente. S.: Secuencia. P.: Pómez.

Figure 3.21. Representative outcrop (PT2101 – 542534/2110104). B. Interpretative cartoon. Dep.: Deposit. Fuert.: Strongly. S.: Sequence. P.: Pumice.

3.2.1 Secciones estratigráficas

El levantamiento de secciones estratigráficas fue basado en la descripción a detalle de las diferentes unidades y subunidades reconocidas. En específico, se tomaron datos relevantes como ubicación (mediante un dispositivo GPS con alcance a la red GLONASS), generalidades del afloramiento, presencia o no de estratificación, grado compactación de las unidades, geometría del estrato, estructuras sedimentarias, textura de las unidades y el análisis de componentes.

La creación de esquemas básicos de campo a partir de dibujos permitió la identificación de la secuencia Pómez Ocre de manera rápida y sencilla en las fotografías tomadas en el campo (Figura 3.21). Además, permitió ubicar los sitios de muestreo que fueron definidos en función de su accesibilidad y representatividad. Para cada afloramiento se muestrearon dos unidades de corrientes piroclásticas de densidad.

3.2.1.1 Petrografía

Se hicieron 12 láminas delgadas en clastos de pómez y líticos de los afloramientos PT2106 y PT2107 para el análisis de los componentes principales y así ratificar la estratigrafía previamente correlacionada. Los afloramientos PT2101 y PT2102 no fueron muestreados, debido a que Arana-Salinas

(2011) y Arana-Salinas et al. (2010) reportan la paragénesis mineral de las pómez y litoclastos juveniles de los depósitos de caída de estos sitios. Los análisis de las secciones delgadas fueron llevados a cabo por la Doctora Lilia Arana-Salinas en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

3.2.1.2 Granulometría

El análisis granulométrico constó de ensayos de tamizado y granulometría óptica.

3.2.1.2.1 Granulometría óptica

Para la granulometría óptica se hicieron tomas fotográficas de la totalidad de los afloramientos con su escala respectiva. En total se tomaron 8 fotografías en alta resolución (Figura 3.22). Rodríguez-Sedano et al. (2022) emplearon esta misma metodología para análisis ópticos en depósitos laháricos provenientes del Volcán de Colima.



Figura 3.22. Ejemplo de fotografía de alta resolución para granulometría óptica.

Figure 3.22. High resolution photography for optical granulometry.

El procesamiento de las imágenes obtenidas se realizó con el software Image-Pro Plus 6.0. El procesamiento de imágenes consta de su escalamiento y preparación de una malla para proceder a las mediciones respectivas. La malla debe encontrarse en función de la geometría del afloramiento, donde si las capas se encuentran basculadas la malla debe seguir la dirección de los estratos (Figura 3.23).

Posteriormente, se tomaron mediciones mediante la digitalización de las partículas sobre la malla previamente construida. Se exportaron los datos en un archivo de tipo .txt. Se introdujeron los datos obtenidos en una hoja de cálculo y se obtuvieron los parámetros estadísticos (media, mediana, desviación estándar, percentil 5 y percentil 95) para cada línea de la malla y para cada unidad en general (Figura 3.24). Por último, se construyeron perfiles verticales por cada parámetro estadístico. La Figura 3.25 muestra uno de estos perfiles, sus partes y algunos datos claves para su lectura adecuada.

3.2.1.2.2 Tamizados

En el caso de los ensayos de tamizado, se recolectó material representativo por unidad y afloramiento visitado (mínimo 1 kg). En total se recolectaron 8 muestras.

Los ensayos fueron llevados a cabo en el laboratorio de sedimentología del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Previo a los tamizados (1) se secaron las muestras en un horno a 60 °C o al aire libre según las condiciones meteorológicas, (2) se cuartearon las muestras para la selección aleatoria del material a tamizar, y (3) se calculó la masa del material a tamizar. El tamizado fue realizado en la tamizadora eléctrica (RO-TAP) del laboratorio de sedimentología (Figura 3.26A). Por último, se calculó la masa del material retenido en cada criba empleada.

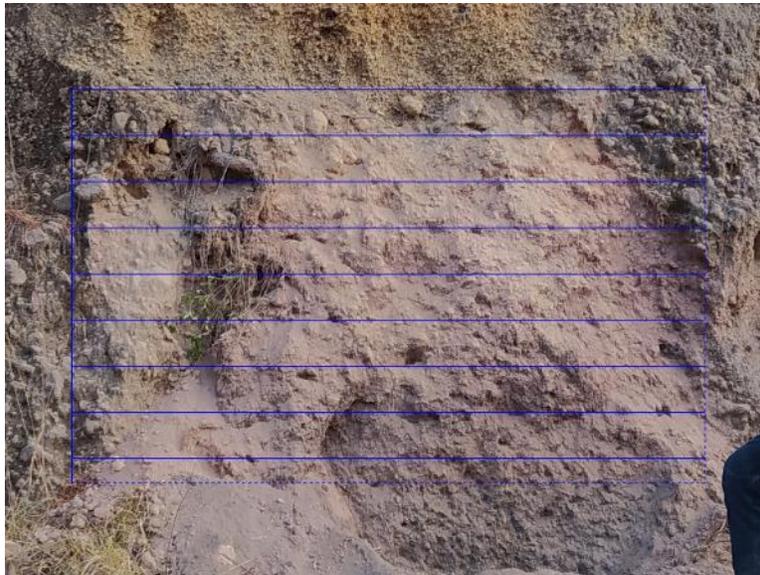


Figura 3.23. Malla para granulometría óptica.

Figure 3.23. Granulometric grid.

Con los pesos obtenidos, se calcularon las frecuencias relativas y acumuladas por cada afloramiento y unidad muestreados mediante hojas de cálculo.

3.2.1.2.3 Granulometría extendida

Para esta investigación la granulometría extendida corresponde a la integración de la granulometría óptica y los tamizados y ambos conjuntos de datos fueron integrados mediante una hoja de cálculo. Seguidamente, se empleó el software DECOLOG 6.0 para la obtención de parámetros estadísticos como promedio, desviación estándar, curtosis, asimetría y la eficiencia del modelo que mejor describe las curvas granulométricas acumuladas (<https://www.lorenzo-borselli.eu/decolog/>). La eficiencia del modelo se obtuvo a partir del coeficiente función multi-objetivo, el cual depende del tipo de distribución y el número de parámetros empleados para modelar las curvas granulométricas. Se eligió una distribución tipo Weibull, debido a que esta es la que mejor caracteriza los flujos granulares de tipo geológico. Además, se corrieron resultados para uno, dos y tres parámetros con el fin de identificar el número de poblaciones granulométricas presentes en las unidades estudiadas.

3.2.1.3 Fábrica de forma

El desarrollo metodológico para la obtención de las muestras y su procesado fue basado principalmente en la metodología propuesta por Capaccioni y Sarocchi (1996) y las adaptaciones posteriores a esta hechas por Moreno-Chávez et al. (2018), Cerca (2020), Zrelak et al. (2020) y Hernández-Rivas et al., (2021). Sin embargo, por la afinidad de los depósitos a contener grandes proporciones de ceniza se modificaron algunos aspectos de las metodologías previamente documentadas.

El muestreo consistió de 18 cuboides. Los sitios de muestreo pueden presentar litologías competentes o no competentes. La presencia de un tipo específico de muestra está dada por las características de la roca *in situ* y condiciona de manera relevante los pasos seguir con el muestreo.

Muestras competentes o consolidadas son de roca dura o no deleznales. La obtención de estas se limita a la orientación, mediante una brújula, y la extracción inmediata de la roca. Muestras no competentes o deleznales son rocas suaves que no se pueden extraer de una manera directa sin realizar un trabajo previo en los depósitos. La metodología de su extracción se detalla a continuación:

1. Preparación del afloramiento para la toma de la muestra: se moldea una forma de cubo de mínimo 10 cm³, con el uso de la piqueta u otras herramientas de albañilería (según el tipo de consistencia del material; Figura 3.27A y 3.27B).
2. Cobertura lateral: se cubren las paredes del cubo moldeado con una mezcla de yeso y vendas (Figura 3.27C).

3. Baños de consolidante: se dan baños de silicato de sodio (*waterglass*) en la parte descubierta de la muestra para lograr una mayor competencia en la muestra que permita su extracción como una sola pieza. La cantidad de baños es variable según la porosidad del material.

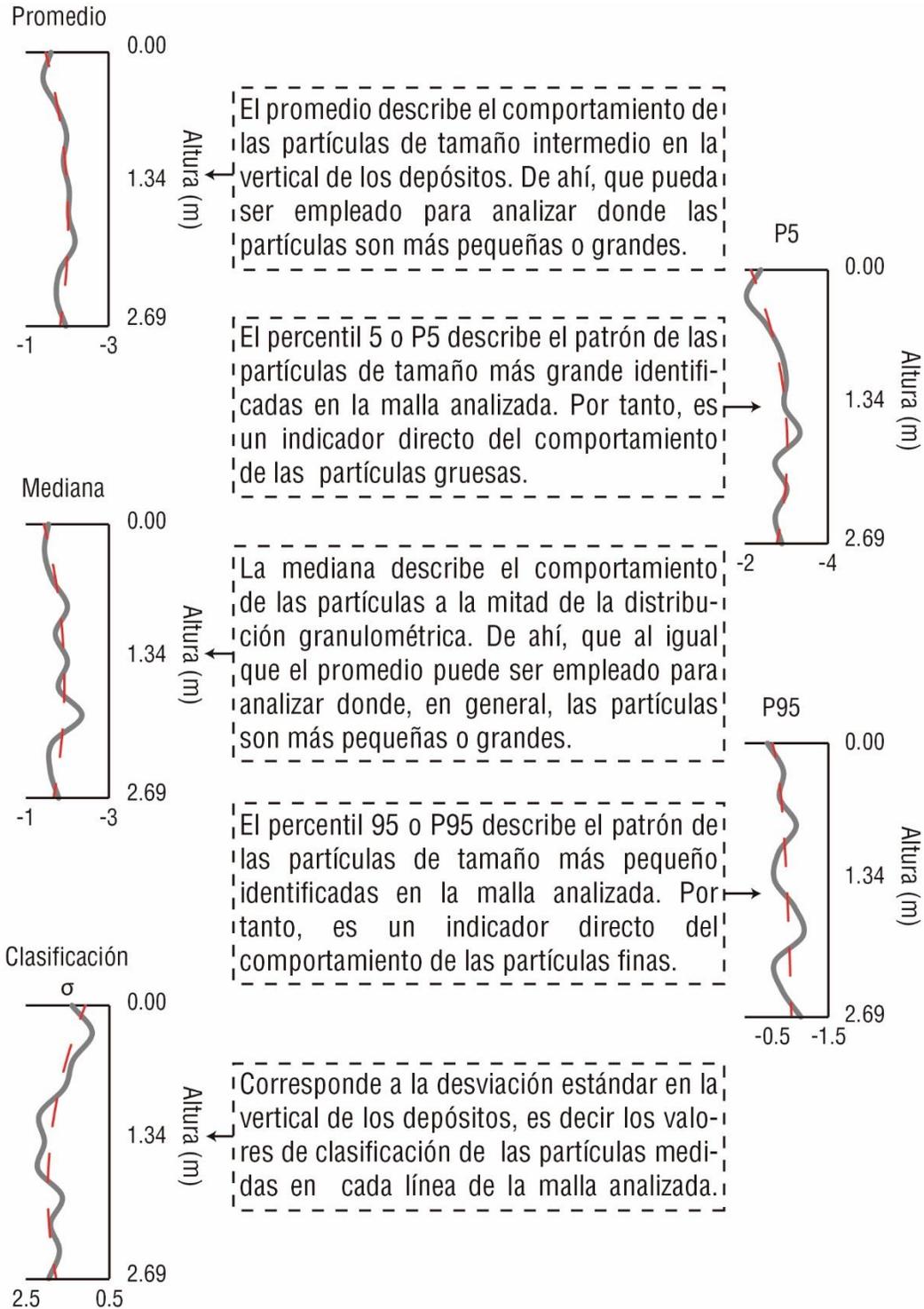


Figura 3.24. Parámetros estadísticos de los perfiles granulométricos verticales.
Figure 3.24. Statistical parameters of vertical granulometric profiles.

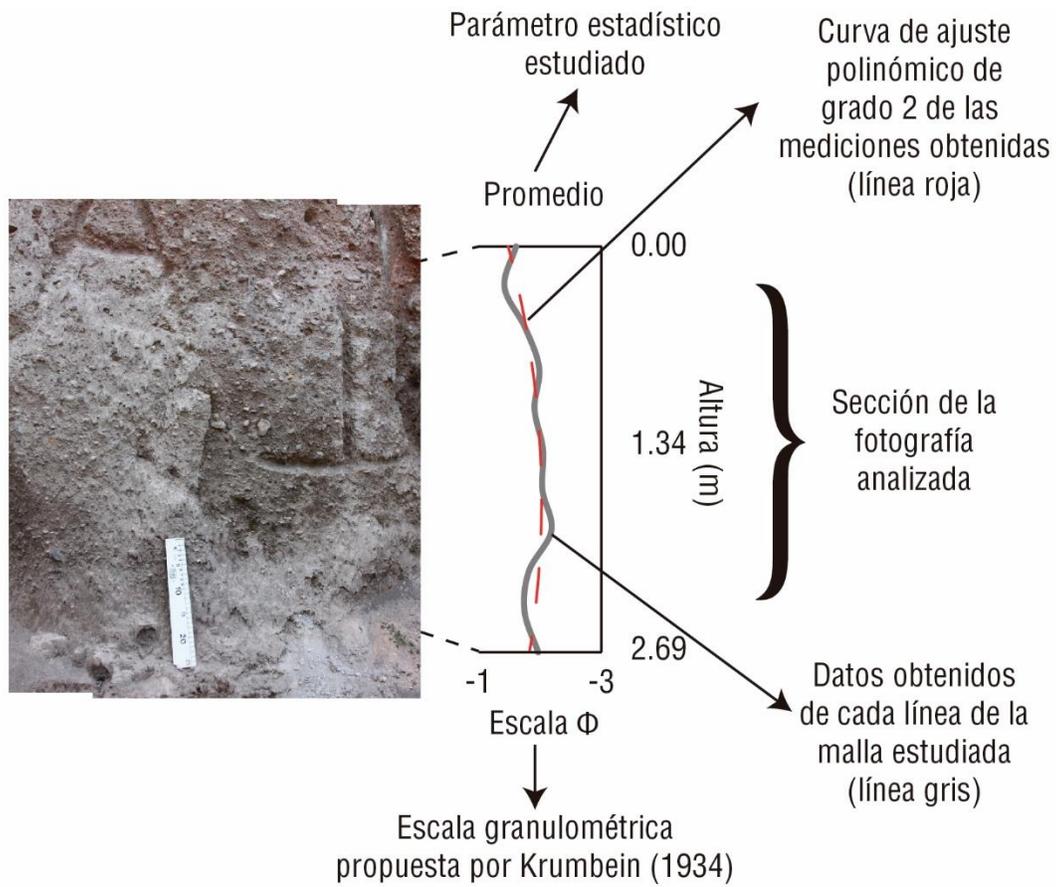


Figura 3.25. Partes de un perfil granulométrico vertical.
 Figure 3.25. Vertical granulometric profile parts.

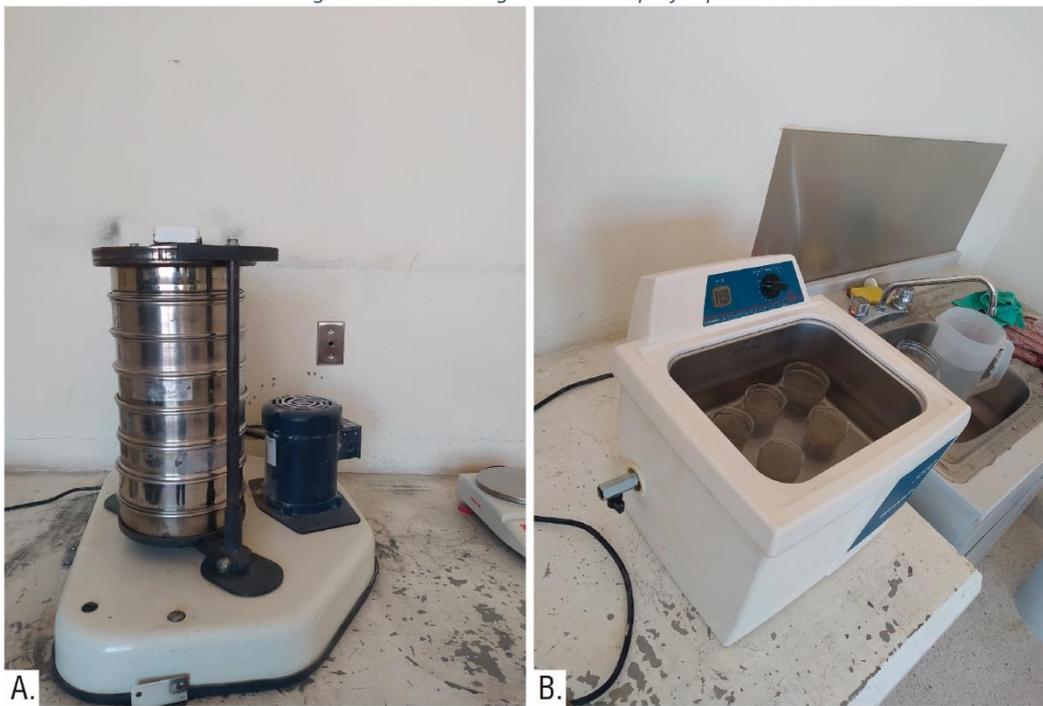


Figura 3.26. Preparación de muestras. A. Tamizadora eléctrica. B. Baños ultrasónicos.
 Figure 3.26. Sample preparation. A. Electric sieve shaker. B. Ultrasonic sieve cleaner.

4. Cobertura superior: se procede a cubrir con yeso la sección faltante del cubo.
5. Secado: se deja secar la muestra bajo condiciones naturales.
6. Extracción: se orienta la muestra con ayuda de una brújula sobre una cara lateral (de la misma manera que se orientan muestras de roca para láminas delgadas) y posteriormente se extrae.



Figura 3.27. Técnica de muestreo. A. Preparación del afloramiento previo al muestreo. B. Cuboide de 10 cm³. C. Cobertura de yeso y Orientación de la Muestra.

Figure 3.27. Sample techniques. A. Outcrop preparation. B. ~10 cm³ Cube. C. Gypsum coverage.

Se recomienda que la orientación de la muestra contenga una flecha que indique la dirección obtenida por la brújula y una línea perpendicular que proporcione la posición relativa del techo y la base del afloramiento.

El procesado de las muestras se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis de Imágenes y Modelado Analógico (LAIMA). Una vez extraídas las muestras en campo y de los experimentos analógicos, se trasladaron al laboratorio y se procedió a realizar una serie de baños con silicato de sodio en la parte superior de las muestras para continuar con el proceso de endurecimiento. Seguido se hicieron una serie

de hoyos en la parte superior y lateral de las muestras con ayuda de un taladro de carpintería para aplicar silicato de sodio y lograr una consolidación en profundidad (Figura 3.28A y 3.28B).

Con una competencia de las rocas asegurada se efectuaron cortes preferenciales con ayuda de una sierra eléctrica manual y una sierra profesional con un disco diamantado de precisión. Estos cortes fueron rectos y perpendiculares a las orientaciones medidas en campo. Posteriormente, se volvieron a aplicar baños de silicato de sodio en las muestras cortadas. Seguido, se impregnaron fragmentos de roca obtenidos. La impregnación fue mediante una bomba de vacío (Figura 3.28C) y como aditivo se empleó silicato de sodio (*waterglass*), con el objetivo de rellenar todos los poros de las muestras sin alterar la configuración inicial de las partículas. La dilución aplicada fue de 50% de solvente para asegurar una impregnación total.

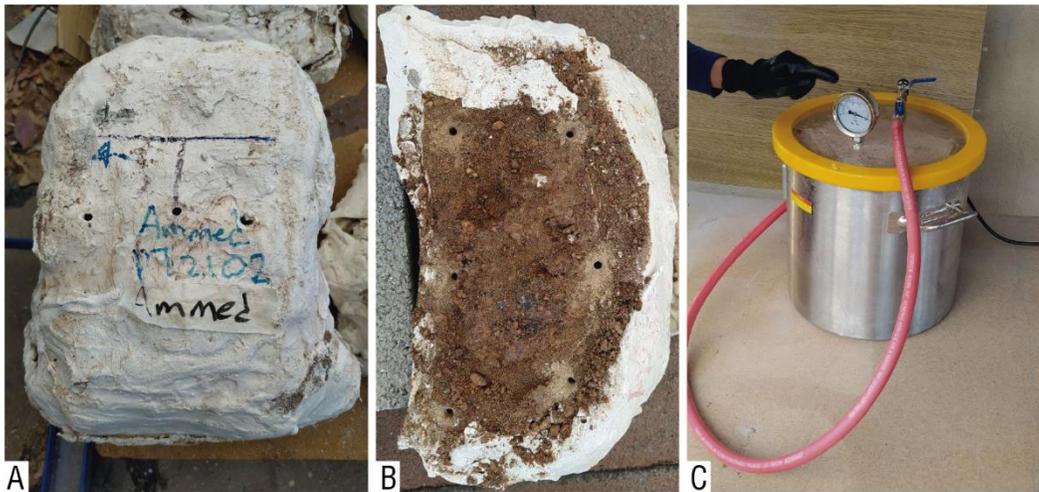


Figura 3.28. Preparación de muestras. A. Hoyos laterales. B. Hoyos superiores. C. Bomba de vacío.
Figure 3.28. Sample preparation. A. Lateral holes. B. Upper holes. C. Vacuum pump.

Después del proceso de impregnado se cortaron las muestras. En función de la calidad de los cortes a las superficies generadas se les volvió a aplicar silicato de sodio en las superficies cortadas. Cada superficie cortada fue pulida mediante un esmeril de uso común equipado con un disco de pulimento y aceite. El pulimento permite una mejor visualización de los componentes de la roca y la generación de superficies completamente planas. Para finalizar, se pulieron manualmente las muestras con una lija #600 y aceite para la limpieza final de los cortes.

Previo a las tomas fotográficas se remarcaron las orientaciones en las muestras (Figura 3.29D.). Para esto se debe considerar la posición de la superficie a fotografiar, ya que se pueden obtener datos invertidos. Las tomas fotográficas de alta resolución se efectuaron con una cámara profesional y una mesa

con iluminación propia (Figura 3.29A-D) con el fin de evitar errores por la presencia de sombras en el ambiente y otros tipos de ruidos fotográficos.

Con las tomas fotográficas obtenidas, las imágenes fueron procesadas con software libres fotográficos como PhotoPea y GIMP. Este tipo de programas especializados permiten resaltar las partículas respecto a la matriz a partir de filtros y el ajuste de la tonalidad de la imagen con el comando niveles. Seguidamente, las imágenes fueron segmentadas con el objetivo de crear imágenes binarias (Figura 3.30C). Este tipo de programas emplean la herramienta de selección rápida, la cual permite ubicar y delimitar regiones de las fotografías por medio de la paleta de colores y por tanto proporciona una rápida delimitación de matriz y partículas (Figura 3.30A).

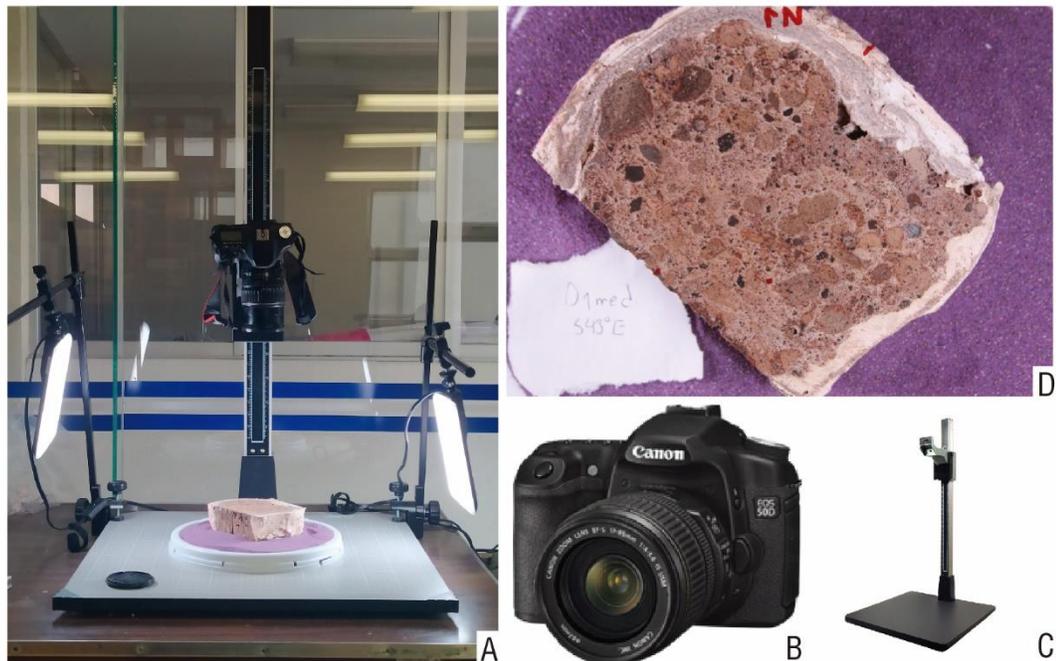


Figura 3.29. Preparación del ambiente fotográfico. A. Configuración para la toma de fotografías. B. Cámara empleada. Tomada de: <https://www.canon.es/>. Canon EOS 50D. C. Mesa fotográfica Smith-Víctor. Tomada de: <https://bachimport.com/>. D. Fotografías obtenidas.

Figure 3.29. Photographic preparation. A. Photographic configuration. B. Camera (<https://www.canon.es/>). C. Photographic table Smith-Víctor (<https://bachimport.com/>). D. High resolution photography.

Una vez se tuvo segmentada la matriz o los clastos de la muestra, se procedió con el ajuste de tono y saturación. Para la matriz se usó una configuración de tono = 0, saturación = -25 y luminosidad = -100 (Figura 3.30B); mientras que para las partículas fue de tono = 0, saturación = -25 y luminosidad = 100.

La siguiente etapa del análisis de fábrica de forma consistió en el uso del software FabricS desarrollado por el Laboratorio de Análisis de Imágenes y Modelado Analógico (LAIMA). Mediante este

software se pueden obtener diferentes parámetros estadísticos como Valor P, el número de partículas analizadas, y el grado y orientación preferencial de las partículas (Moreno-Chávez et al., 2018).

El valor P es una medida de estadística circular que evalúa la fuerza de los resultados donde se comprueba la posibilidad de rechazar una hipótesis nula (Arsham, 1988). En el caso de los materiales piroclásticos muestreados la hipótesis nula corresponde a la no orientación de las partículas en las unidades. Burdette y Gehan (1970) generaron un esquema de interpretación del Valor P (Tabla 3.5). En función de este esquema y los resultados de Zrelak et al. (2020) para depósitos piroclásticos del Monte Santa Elena, en esta investigación se discriminaron los resultados a partir de valores P menores o mayores a 0,05. Donde solo los valores menores a 0,05 presentan una evidencia moderada a fuerte para rechazar una hipótesis nula.

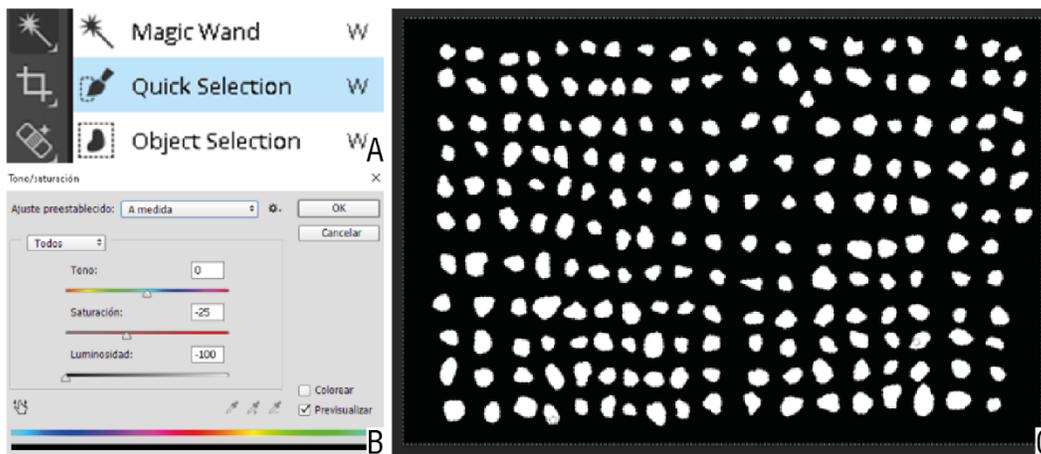


Figura 3.30. Procesamiento de imágenes en PhotoPea. A. Herramienta de selección rápida. B. Ajustes de saturación y luminosidad de las imágenes. C. Imagen binaria. Capturas tomadas de: photopea.com.

Figure 3.30. Binarization in PhotoPea. A. Quick selection. B. Saturation adjustments. C. Binary image. Captures of photopea.com

Tabla 3.5. Interpretaciones de P-Value de Burdette y Gehan (1970).

Table 3.5. P-Value interpretations by Burdette y Gehan (1970).

P-value	Interpretación
$P < 0,01$	Evidencia fuerte contra la hipótesis nula
$0,01 \leq P < 0,05$	Evidencia moderada contra la hipótesis nula
$0,05 \leq P < 0,10$	Evidencia sugestiva contra la hipótesis nula
$0,10 \leq P$	Sin evidencia contra la hipótesis nula

El número de partículas es el conteo del total de partículas previamente segmentadas y este varía según los filtros de tamaño y excentricidad que pueden ser modificados en el software FabricS. El filtro de tamaño se seleccionó a partir del resultado granulométrico, debido a que la bimodalidad representada en las curvas granulométricas indica el rango de tamaño de partículas que se ven más influenciadas por la interacción entre partículas (Caballero, 2012; Caballero et al., 2012; Figura 3.31A). Según esta aseveración se hizo la comparación entre el rango granulométrico -4 y 4ϕ y los rangos obtenidos según la bimodalidad

de las unidades estudiadas. La excentricidad es una razón adimensional empleada para conocer qué tan cercana es la forma de las partículas a esferas. En el caso, del software FabricS valores de excentricidad cercanos a cero indican partículas más esféricas, y valores cercanos a 1 indican partículas más alargadas (Moreno-Chávez et al., 2018). Hernández-Rivas et al. (2021) demostraron que la isorientación de las partículas se ve afectada por la granulometría de los depósitos. Por tanto, resulta de importancia la calibración idónea de estos dos parámetros previo al análisis de fábrica de cada muestra.

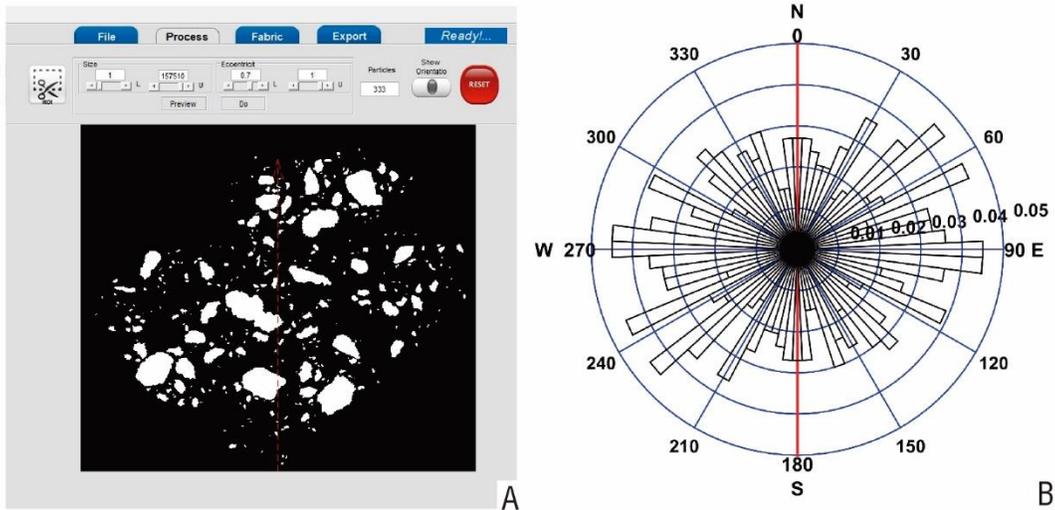


Figura 3.31. Uso de FabricS y resultados. A. Parámetros de tamaño y excentricidad. B. Diagrama de rosas.
Figure 3.31. FabricS and results. A. Eccentricity and size parameters. B. Rose diagram.

La isorientación es el mayor porcentaje de partículas orientadas en una dirección específica. El programa FabricS reporta el mayor porcentaje, sin embargo, una misma muestra puede tener varias modas de orientación de partículas. Por lo que, para determinar la presencia de muestras multimodales se debe considerar el diagrama de rosas correspondiente. Además, para el caso de los diagramas de rosas obtenidos que presentan dos modas representativas, se consideró que la dirección predominante de las partículas corresponde a la línea que cruza la mitad del ángulo más pequeño que se forme entre las modas respectivas.

En resumen, los resultados de interés obtenidos con el proceso de análisis de fábrica de forma fueron: (1) diagramas de rosas (Figura 3.31B), (2) orientación preferencial de las partículas, (3) grado de isorientación, (4) estadísticos como media, mediana y moda, y (5) pruebas estadísticas para la validación de los datos obtenidos. Para este último parámetro se obtuvieron mejores resultados con grados de excentricidad mayores a 0,7.

Como parte de los resultados presentados se hicieron perfiles verticales que muestran la variación de la dirección preferencial de las partículas en las unidades estudiadas. La Figura 3.32 es un diagrama para entender las partes de cada perfil.

3.2.1.4 Morfología – forma

La metodología usada en este apartado fue modificada de las presentadas por Moreno-Chávez et al. (2020) y Rodríguez-Sedano et al. (2022), debido a que la naturaleza de las muestras obtenidas es diferente y para abarcar un intervalo granulométrico mayor.

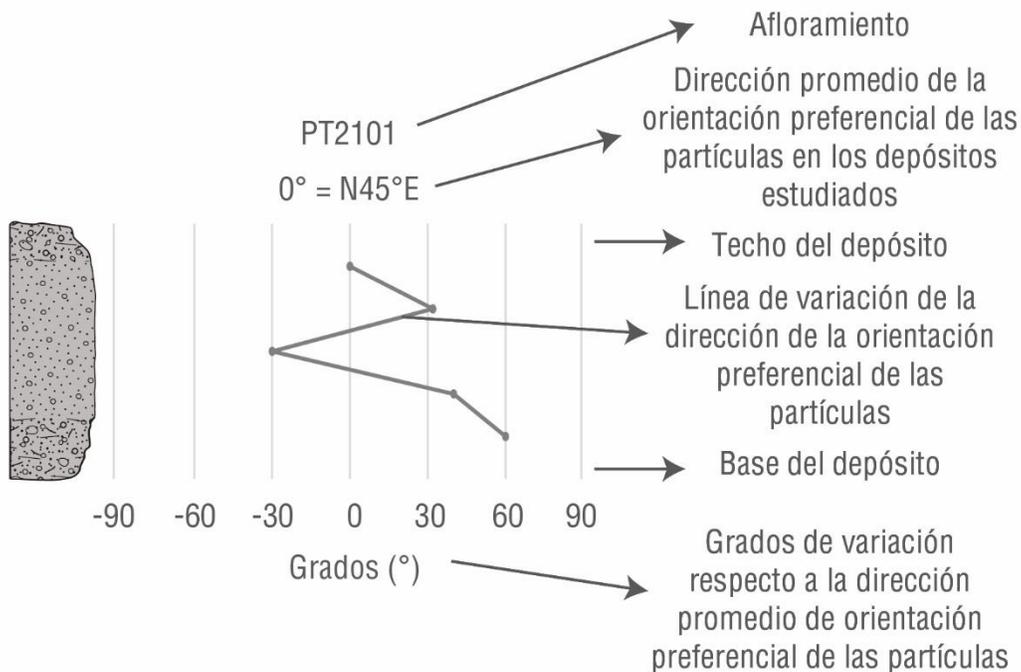


Figura 3.32. Partes de un perfil vertical de la dirección preferencial de las partículas respecto al N.
 Figure 3.32. Parts of a shape fabric vertical profile.

Los análisis morfológicos se llevaron a cabo en partículas del rango granulométrico -3ϕ (para las variaciones longitudinales) y en las imágenes binarias obtenidas para la fábrica de forma (para las variaciones verticales). Las partículas de tamaño -3ϕ fueron seleccionadas de manera aleatoria en los afloramientos respectivos y colocadas en cajas con algodón para evitar pérdidas en su forma durante el transporte hasta el laboratorio respectivo. Además, se seleccionaron las partículas de tamaño -3ϕ debido a la facilidad de muestrearlas aleatoriamente y que presentan un tamaño idóneo obtener fotografías con una alta resolución. En total se realizaron 8 muestreos con un mínimo de 98 partículas.

Una vez las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Análisis de Imágenes y Modelado Analógico (LAIMA) se procedió a la limpieza de las partículas mediante baños ultrasónicos (Figura 3.26B). Seguido, se secaron las muestras en un horno a una temperatura de 60 °C.

Con las fotografías en alta resolución obtenidas, se procedió con la segmentación respectiva de las partículas para su binarización empleando las mismas técnicas que se usaron en análisis de fábrica de forma. Las imágenes binarias resultantes se analizaron en el software FSA. Este programa permite la medición de parámetros como forma general, redondez y textura superficial a partir de armónicos (Moreno-Chávez et al., 2018). Los armónicos se definieron en los rangos: (1) 3 - 6 para la descripción de la forma general, (2) 7 – 15 para la redondez, y (3) 16 – 50 para la textura superficial, según los criterios propuestos por Moreno-Chávez et al. (2020) y los resultados obtenidos por Rodríguez-Sedano et al. (2022). Seguidamente el software FSA permite conocer los valores de media, mediana y varianza para cada partícula analizada, los cuales fueron exportados para su análisis posterior.

Se calculó el error estándar en las mediciones correspondientes a la morfología de las partículas. El error estándar es el producto de la división de la desviación estándar entre la raíz cuadrada de la muestra (Eq. 1):

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma_x / \sqrt{N} \quad (1)$$

Donde σ_x es la desviación estándar y N la muestra.

Los resultados incluyen perfiles verticales morfológicos. Para la mayor comprensión de los datos se normalizaron los resultados y se hizo un diagrama que muestra todas sus partes (Figura 3.33).

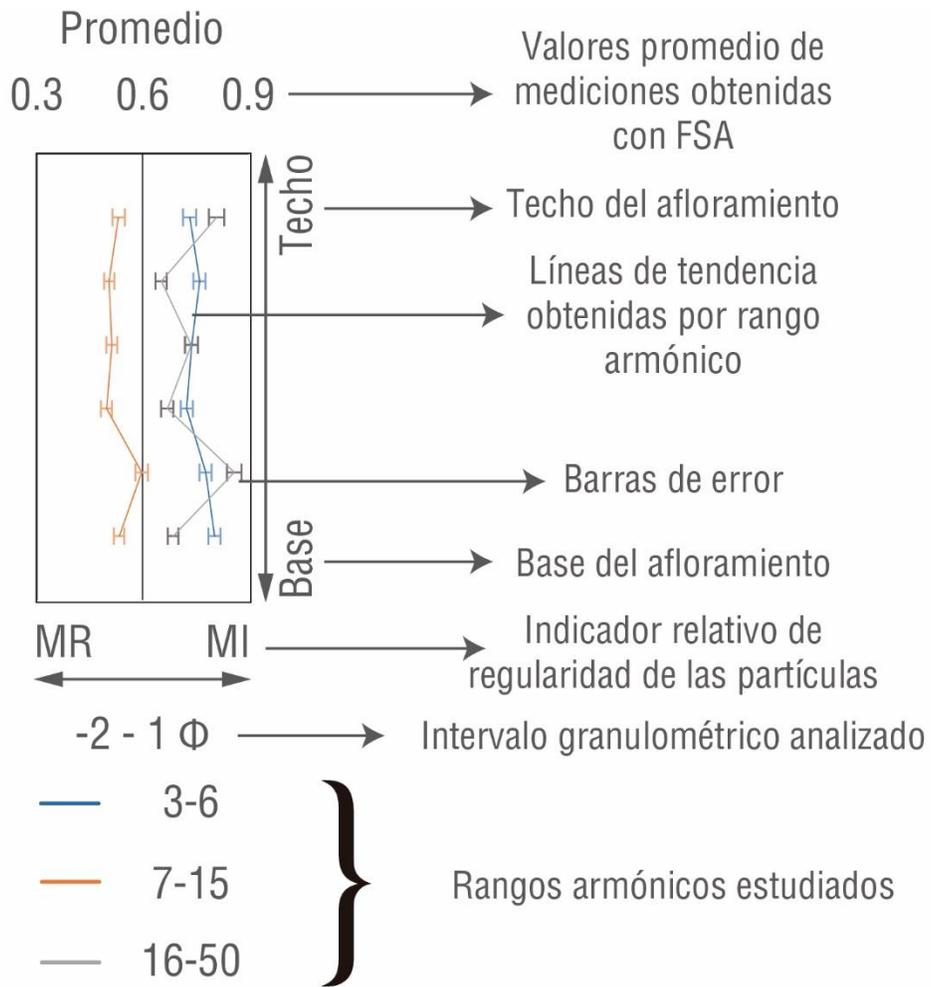
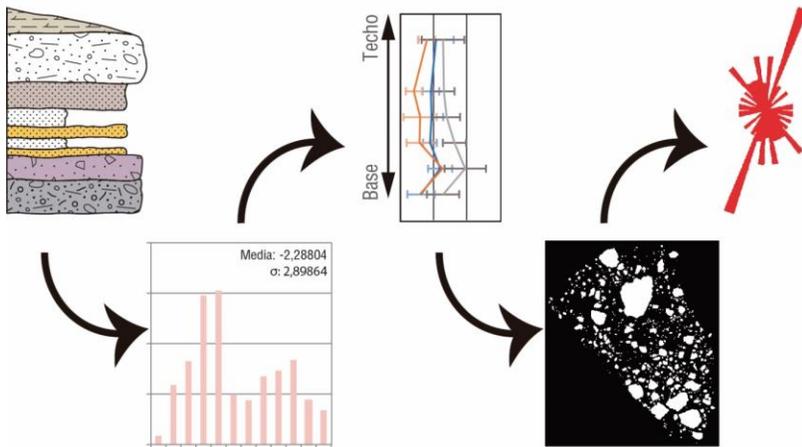


Figura 3.33. Partes de un perfil morfológico vertical.
 Figure 3.33. Parts of a morphological vertical profile



RESULTADOS ESTRATIGRÁFICOS, PETROGRÁFICOS Y TEXTURALES

DESCRIPCIÓN BREVE

En este capítulo se detallan los productos obtenidos a partir de la metodología empleada. Los resultados se dividen en geología local, petrografía, granulometría, morfología y fábrica de forma.

DESCRIPTION

In this section, we present the results. These results are divided into local geology, petrography, granulometry, morphology and shape fabric.

En este capítulo se describen los resultados obtenidos al aplicar la metodología descrita anteriormente. En total se analizaron cuatro afloramientos (PT2101, PT2102, PT2106 y PT2107; Tabla 4.6) ubicados en la barranca estudiada. Las descripciones litológicas contemplan la caracterización de componentes, medición de los 5 clastos de mayor tamaño por componente, identificación de estructuras sedimentarias, descripción de los contactos entre unidades, forma y color de los materiales piroclásticos, entre otras características.

Tabla 4.6. Coordenadas planas de los afloramientos visitados y número de análisis totales realizados. Sistema UTM 14N. An.: Análisis.

Table 4.6. Outcrops coordinates and number of total analyses. UTM 14N. An.: Analysis.

Afloramiento	Coordenada	Coordenada	Análisis	Análisis	An. Fábrica
	X	Y	Granulometría*	Morfológicos*	de forma*
PT2101	542534	2110104	4	38	54
PT2102	549185	2109973	4	37	54
PT2106	549227	2110236	4	37	54
PT2107	545478	2111329	4	37	53

*Los números representan la cantidad de análisis hechos sobre las 8 fotografías para granulometría óptica, las 8 muestras para el análisis de forma y las 19 muestras para fábrica de forma.

Los muestreos llevados a cabo se dividieron en función del análisis a realizar. Mediante la granulometría se construyeron curvas granulométricas en el intervalo entre -7 y 4 ϕ . Los resultados morfológicos se presentan a partir de gráficas para evaluar la angulosidad de las partículas respecto a la distancia y en la vertical de las unidades estudiadas. Por último, para la fábrica de forma, los productos obtenidos se resumen a manera de tablas y gráficas para evidenciar las variaciones en dirección preferencial de las partículas y su grado de orientación respecto a la distancia del sitio de emisión de las corrientes piroclásticas.

4.1 Geología local

Este apartado contempla la descripción de las secciones estratigráficas levantadas en campo y una caracterización detallada de las unidades estudiadas.

4.1.1 Secciones estratigráficas y su correlación

Desde el punto de vista estratigráfico en la zona de estudio afloran productos piroclásticos asociados a la fase eruptiva más reciente del volcán Popocatepetl (Siebe y Macías, 2006). Estos materiales fueron asociados a las Secuencias Pómez Ocre, Pómez Lorenzo y Pómez Rosada. Dos secciones

estratigráficas en las cuales se reconocen rasgos típicos de estos tres eventos eruptivos corresponden a los afloramientos PT2101 y PT2102 (ver Figuras 4.34 y 4.35).

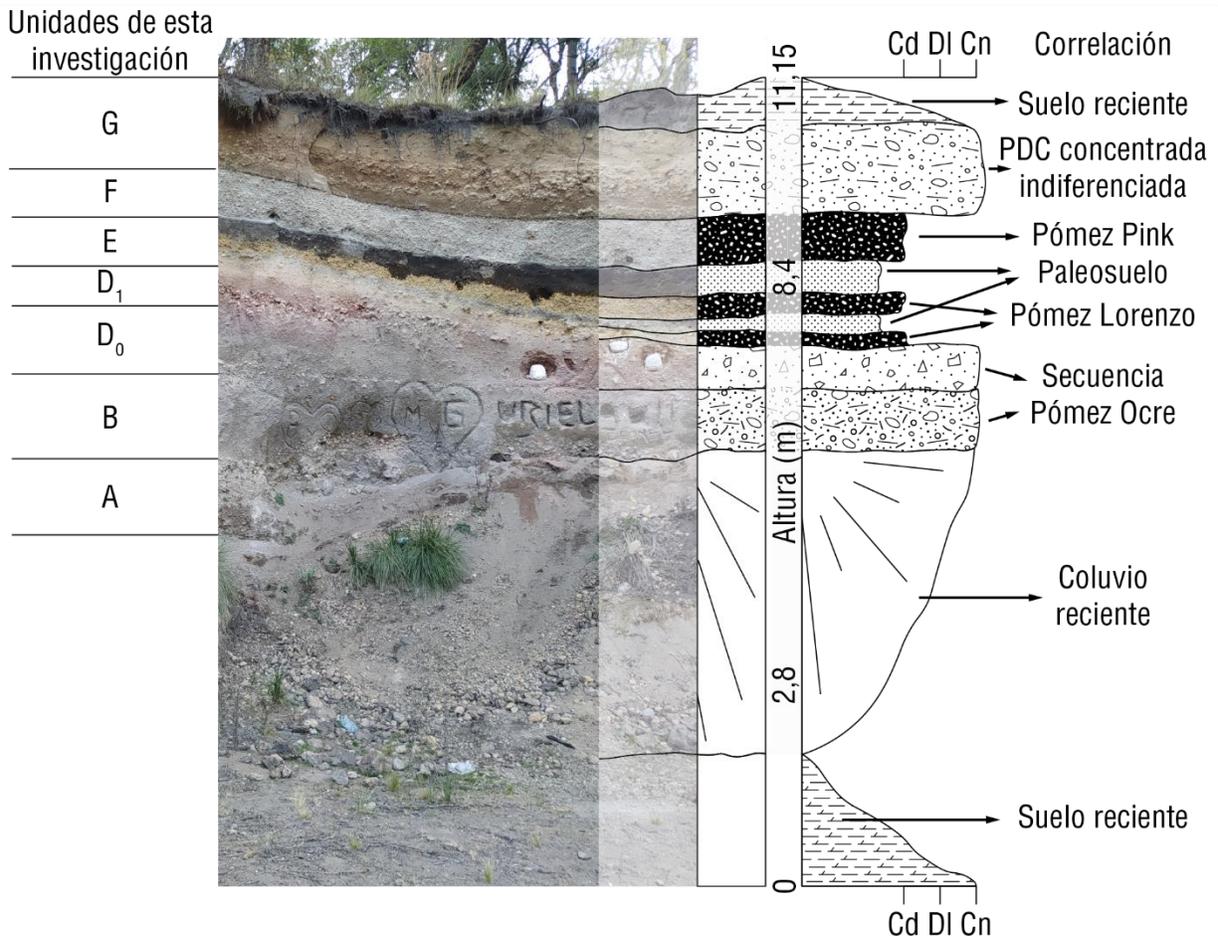


Figura 4.34. Afloramiento PT2101 y su correlación. Cd: Depósito de caída. DI: Depósito de corriente piroclástica diluida. Cn: Depósito de corriente piroclástica concentrada.

Figure 4.34. Outcrop PT2101 and correlation. Cd.: Fallout deposit. DI.: Pyroclastic density current dilute deposit. Cn.: Pyroclastic density current of high concentration deposit.

A continuación, se presentan descripciones generales, hechas en campo, de las Secuencias Pómez Lorenzo y Pómez Rosada visibles en los afloramientos visitados.

4.1.1.1 Secuencia Pómez Lorenzo

Corresponde a un depósito de color amarillo – ocre y monolítico. Los depósitos asociados a esta Unidad se observan con una apariencia masiva. Los clastos son de pómez con vesículas redondeadas y alargadas, y fenocristales máficos (20%) y plagioclasa (<15%). El tamaño máximo de los clastos de pómez es de 8 cm. La unidad presenta soporte clasto a clasto y una selección de moderada a buena. El contacto inferior de la unidad es irregular y el espesor promedio de la capa es de 45 cm. Además, se reconocieron bombas de pómez de hasta 12 cm.

4.1.1.2 *Secuencia Pómez Rosada*

Se interpretó como una secuencia de caídas y oleadas que se puede subdividir en dos unidades.

1. Depósito Inferior: depósito de color amarillo claro con clastos de pómez (90%) y lavas (10%). Las lavas son gris oscuras, angulosas de hasta 1,4 cm. El soporte del material es clasto a clasto, presenta gradación simétrica (inversa a normal) y el contacto basal es con depósitos de CPDs diluidas ricas en ceniza.
2. Depósito Superior: depósito de color amarillo claro a rojizo y monolitológico. Se compone de pómez angular. El soporte del depósito es clasto a clasto y presenta una gradación incipiente de tipo inversa. Su contacto inferior es concordante, no erosivo y bien diferenciado.

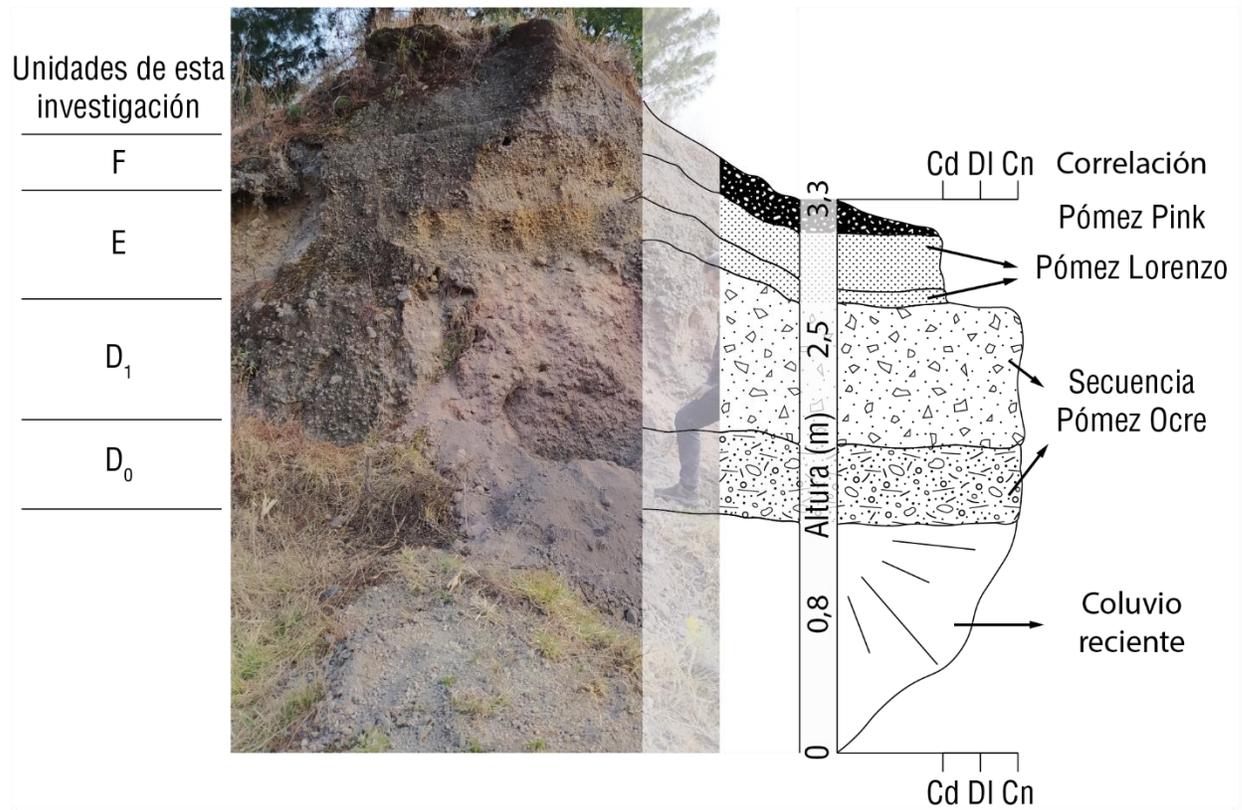


Figura 4.35. Afloramiento PT2102 y su correlación. Cd: Depósito de caída. DI: Depósito de corriente piroclástica diluida. Cn: Depósito de corriente piroclástica concentrada.

Figure 4.35. Outcrop PT2102 and correlation. Cd.: Fallout deposit. DI.: Pyroclastic density current dilute deposit. Cn.: Pyroclastic density current of high concentration deposit.

Por último, en la Figura 4.36 se presenta la correlación estratigráfica de los cuatro afloramientos visitados.

4.1.2 Descripción de las unidades asociadas a corrientes piroclásticas de la Secuencia Pómez Ocre

4.1.2.1 Unidad Gris

Depósito piroclástico de color gris, con una proporción de matriz – clastos variables entre 60% – 40% y 50% – 50%, por lo que el soporte del material es por matriz. El espesor promedio de esta unidad es de 1,25 m, donde el mayor espesor reportado se encuentra en el afloramiento PT2106. La matriz es de ceniza media a gruesa y llega a ser limosa por intemperismo. Los principales clastos en la unidad son pómez color café, escoria negra y líticos lávicos. La pómez color café posee vesículas redondeadas y fenocristales (30%) de anfíboles oxidados, plagioclasa y olivino. La escoria negra tiene vesículas redondeadas e interconectadas, y fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol oxidado. Por último, las lavas son de color gris y tienen textura porfírica con fenocristales de plagioclasa y olivino. Los porcentajes de los componentes sin tomar en cuenta la matriz del depósito se calcularon mediante conteos de puntos y se obtuvieron: escoria negra (27%), pómez café (22%), líticos lávicos (33%), plagioclasa (6%), cristales máficos (4%), cuarzo (7%) y olivino (1%).

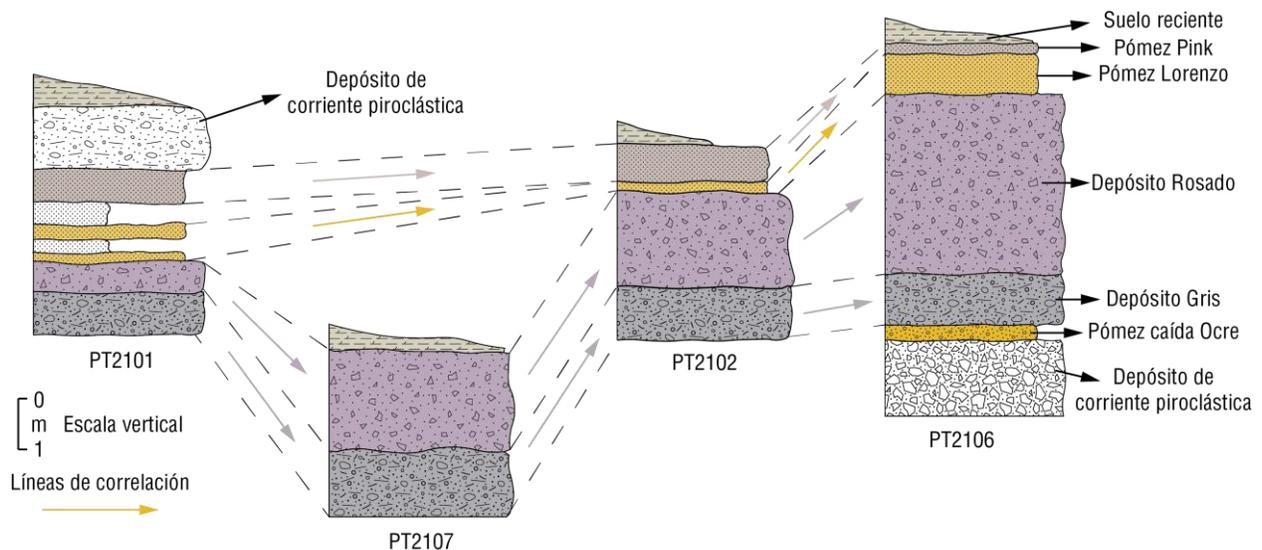


Figura 4.36. Correlación estratigráfica de las secciones levantadas en el trabajo de campo.

Figure 4.36. Stratigraphic chart.

Está en contacto difuso con la Unidad Rosada y los líticos presentan gradación normal (determinada a simple vista) en el afloramiento PT2107. Hacia la base se reconocieron pómez color ocre a café de transición de hasta 20 cm redondeadas. En detalle, las pómez de transición son muy vesiculadas y densas, y se interpretan como juveniles donde aún la desgasificación no era tan efectiva para generar pómez más ligeras. En general esta unidad presenta una apariencia masiva, es decir sin estructuras

sedimentarias reconocibles, y en el afloramiento PT2101 muestra un acuñaamiento, es decir una reducción progresiva en su espesor.

4.1.2.2 Unidad Rosada

Depósito piroclástico de color rosado. La matriz está constituida por ceniza de tamaño fina a gruesa. El tamaño máximo de la pómez es de 22 cm y de los líticos es de 5 cm. La unidad se encuentra soportado por matriz y su espesor promedio es de 1,45 m. Sin embargo, el espesor máximo reportado es de 3,55 m en el afloramiento PT2106. El clasto predominante es pómez de color ocre, gris, amarilla clara y rosada, es subangular a redondeada, con textura fibrosa y cristales de plagioclasa, cristales máficos y cuarzo (Figura 4.37A). Otros clastos presentes son líticos lávicos gris oscuro y escoria negra subredondeadas a redondeadas, ambos con fenocristales de plagioclasa (Figura 4.37B). A partir de conteos de puntos se obtuvieron los porcentajes de los componentes descritos: pómez (44%), escoria negra (18%), líticos lávicos (17%), plagioclasa (6%), cristales máficos (6%), cuarzo (8%) y olivino (1%).

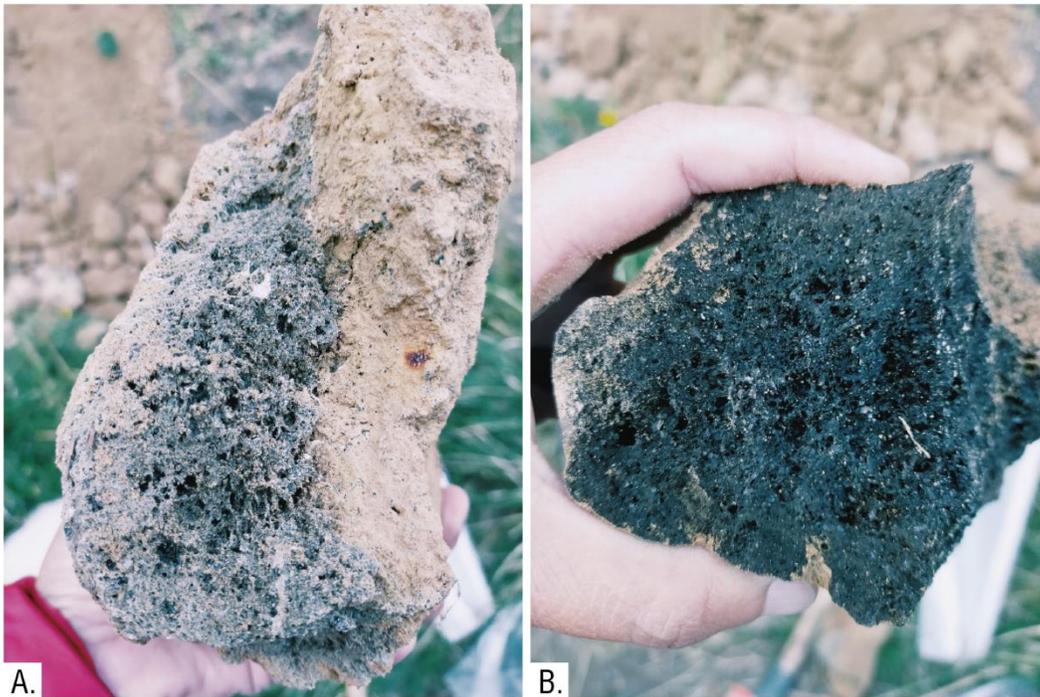


Figura 4.37. Componentes de la Unidad Rosada. A. Pómez. B. Escoria.
Figure 4.37. Rosada Unit components. A. Pumice. B. Scoria.

En la base de la unidad es mayor la cantidad de líticos angulosos del tamaño de bloques y pómez (también del tamaño de bloque) muy redondeadas ligeramente más pequeñas que los líticos. En el afloramiento PT2106 se reconoció a la base de la unidad líticos angulosos y pómez (ligeramente más pequeñas que los líticos) del tamaño de bloques. Esta Unidad también presenta una apariencia masiva, es decir sin estructuras sedimentarias visibles.

4.1.3 Petrografía de las unidades estudiadas

Los análisis petrográficos evidencian una paragénesis compuesta por fenocristales de plagioclasa (mineral más abundante), clinopiroxeno – augita, ortopiroxeno, óxidos y olivino para los líticos juveniles y los fragmentos de pómez muestreados. Algunas de estas fases minerales se presentan en la Figura 4.38.

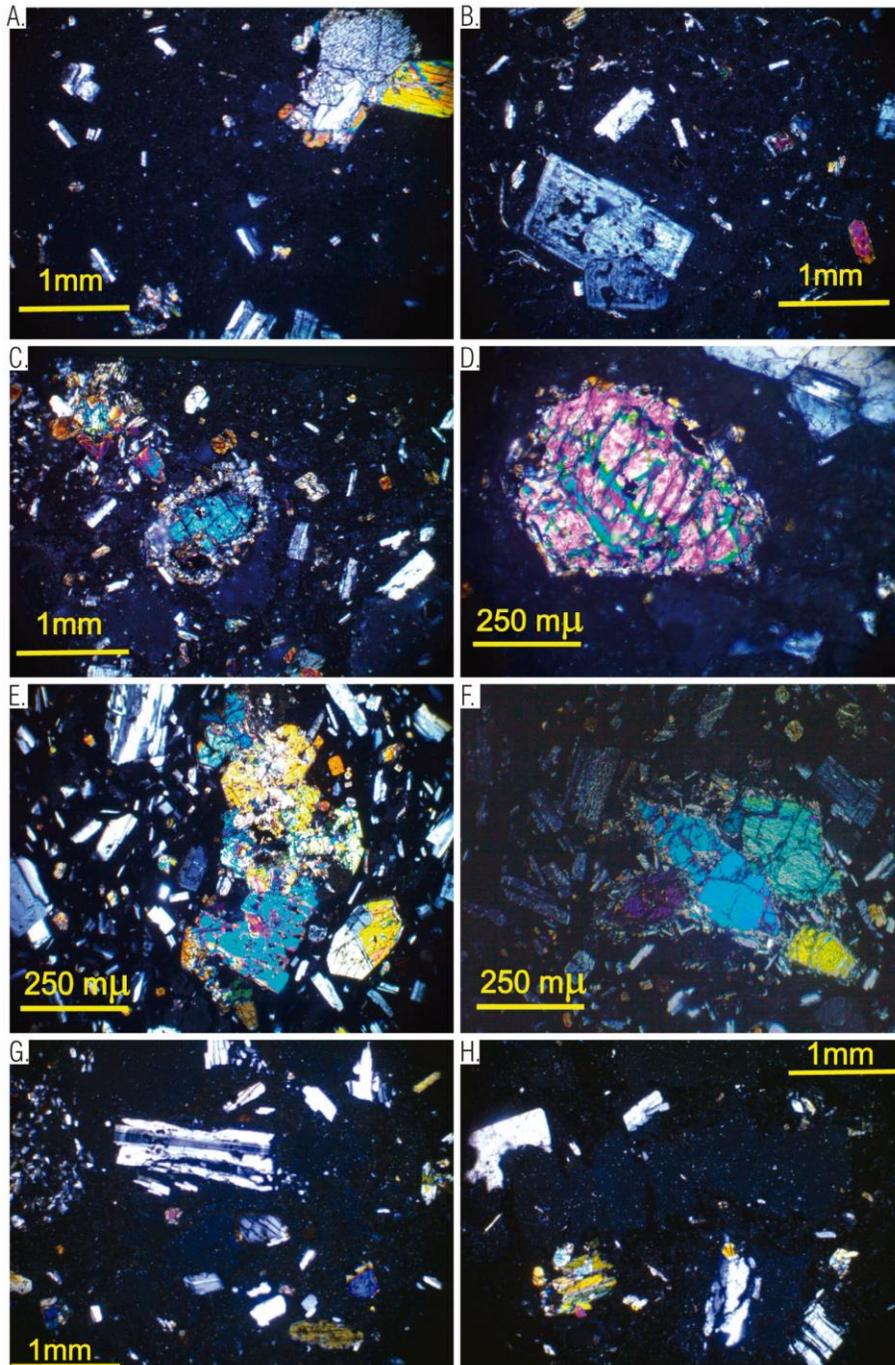


Figura 4.38. Láminas delgadas. A., B., C. y D. Pómez del afloramiento PT2106. E. y F. Juvenil del afloramiento PT2106. G. y H. Pómez del afloramiento PT2107.

Figure 4.38. Thin sections. A., B., C. y D. Pumice of outcrop PT2106. E. y F. Juvenile of outcrop PT2106. G. y H. Pumice of outcrop PT2107.

4.2 Granulometría

En cada unidad se realizaron el análisis granulométrico mediante tamizado y el análisis óptico por medio de fotografías en alta resolución. Las dos metodologías granulométricas empleadas fueron integradas con el fin de obtener una curva granulométrica extendida que abarca los rangos de tamaño de 4 a -10 ϕ . Integraciones similares han sido realizadas con éxito por Sarocchi (2006); Sarocchi et al., (2011); Caballero (2012), Caballero et al., (2012) y Rodríguez-Sedano et al., (2022). Es importante mencionar que las granulometrías menores a 4 ϕ , hasta la fecha no han sido analizadas.

4.2.1 Tamizados

Los resultados se resumen en la Figura 4.39. Las tablas con los valores obtenidos en cada ensayo llevado a cabo se encuentran en el Apéndice I.

La Unidad Rosada refleja una bimodalidad con modas en las fracciones -3 y 2 ϕ en todos los afloramientos estudiados. Sin embargo, los análisis no reflejan alguna tendencia respecto a la distancia (Figura 4.38). Por otra parte, la Unidad Gris también muestra una bimodalidad con modas en las fracciones -3 y 2 ϕ para todos los afloramientos a excepción del PT2107, donde la bimodalidad es evidenciada por modas que se encuentran en las fracciones -3 y 1 ϕ (Figura 4.39).

4.2.2 Perfiles Granulométricos Verticales

Se obtuvieron Perfiles Granulométricos Verticales de los 4 afloramientos visitados y para ambas unidades estudiadas en la presente investigación. Las unidades (Rosada y Gris) en apariencia conforman depósitos masivos y matriz soportados. Las figuras 4.40 y 4.41 resumen los resultados obtenidos por depósito y afloramiento. La presencia de gradaciones tipo *coarse-tail* en ambas unidades son indicativos de procesos activos de segregación por densidad tanto en pómez como en líticos lávicos.

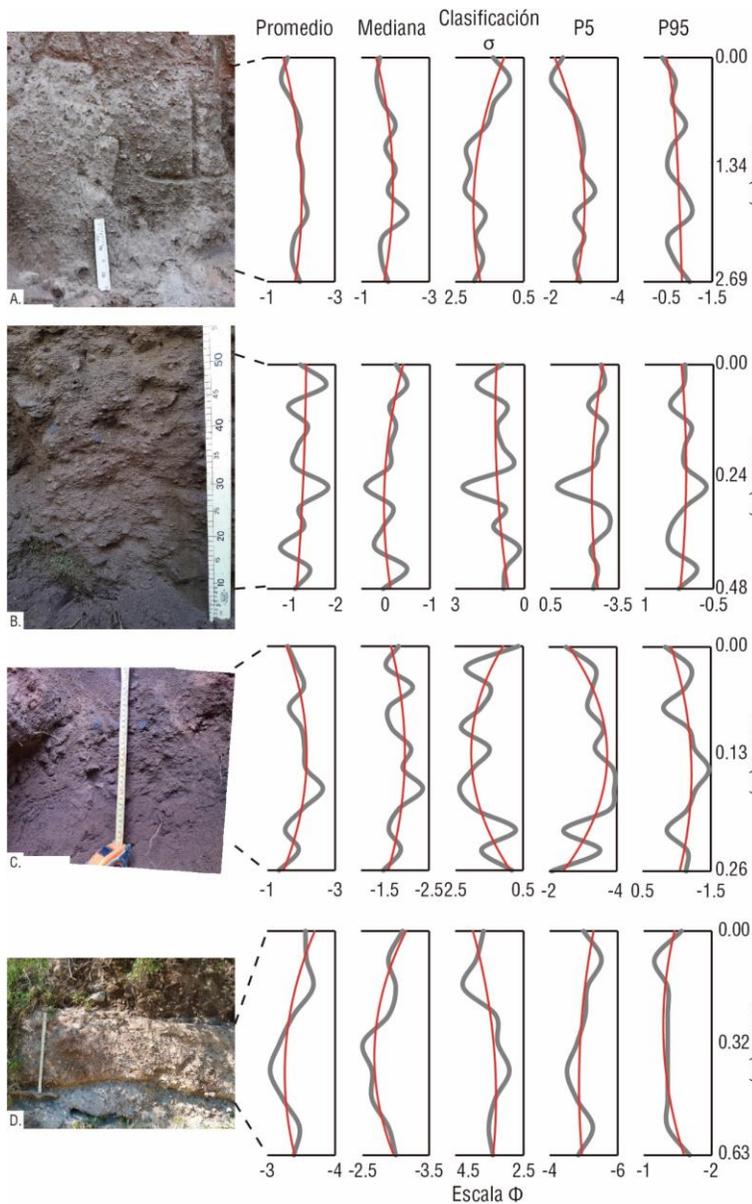
4.2.3 Granulometría extendida

Como se mencionó en la metodología, para esta investigación la granulometría extendida corresponde a la integración de la granulometría óptica y los tamizados. El intervalo granulométrico obtenido de los ensayos ópticos fue de -4 a -7 ϕ ; mientras que en el tamizado se cubrió el intervalo entre 4 y -3 ϕ para las dos unidades estudiadas. Los valores obtenidos se resumen en las tablas 4.7 y 4.8 y la Figura 4.42. Los resultados evidencian una tendencia a la bimodalidad en ambos depósitos piroclásticos con modas sobresalientes en las fracciones -3 y 2 ϕ , con las excepciones de la Unidad Rosada en el afloramiento PT2106 y la Unidad Gris en el sitio PT2107.



Figura 4.39. Resultados del método del tamizado. A. Resultados para la Unidad Gris. B. Resultados para la Unidad Rosada. Los códigos se refieren a las localidades estudiadas donde el afloramiento PT2101 y PT2106 corresponden a los sitios más cercano y lejano del volcán Popocatepetl.

Figure 4.39. Mechanic sieve results. A. Gris Unit results. B. Rosada Unit results. The results are presented by outcrop.



Afloramiento, descripción e interpretación

Afloramiento: PT2101

La clasificación muestra valores altos en el techo del depósito y los valores de promedio, mediana, P5 y P95 aumentan hacia la parte central. Este tipo de patrones son típicos de gradaciones tipo *coarse-tail* burdas evidenciadas por las líneas de ajuste.

Afloramiento: PT2107

La clasificación es baja en el sector central del material estudiado. Patrones similares son mostrados por el P5 y la mediana, mientras los estadísticos P95 y la media tienen una tendencia opuesta. Estos patrones no son de fácil visualización, de ahí que se presenten ajustes potenciales de grado 2 para su mejor visualización. Relaciones de este tipo permiten interpretar gradaciones de tipo *coarse-tail* burdas.

Afloramiento: PT2102

Se evidencian valores altos de los estadísticos P5, P95, media y mediana en la parte central del depósito, lo cual es característico de gradaciones tipo *coarse-tail* bien diferenciadas. Por otra parte, la clasificación tiene sus valores más altos en el techo y la base del material analizado.

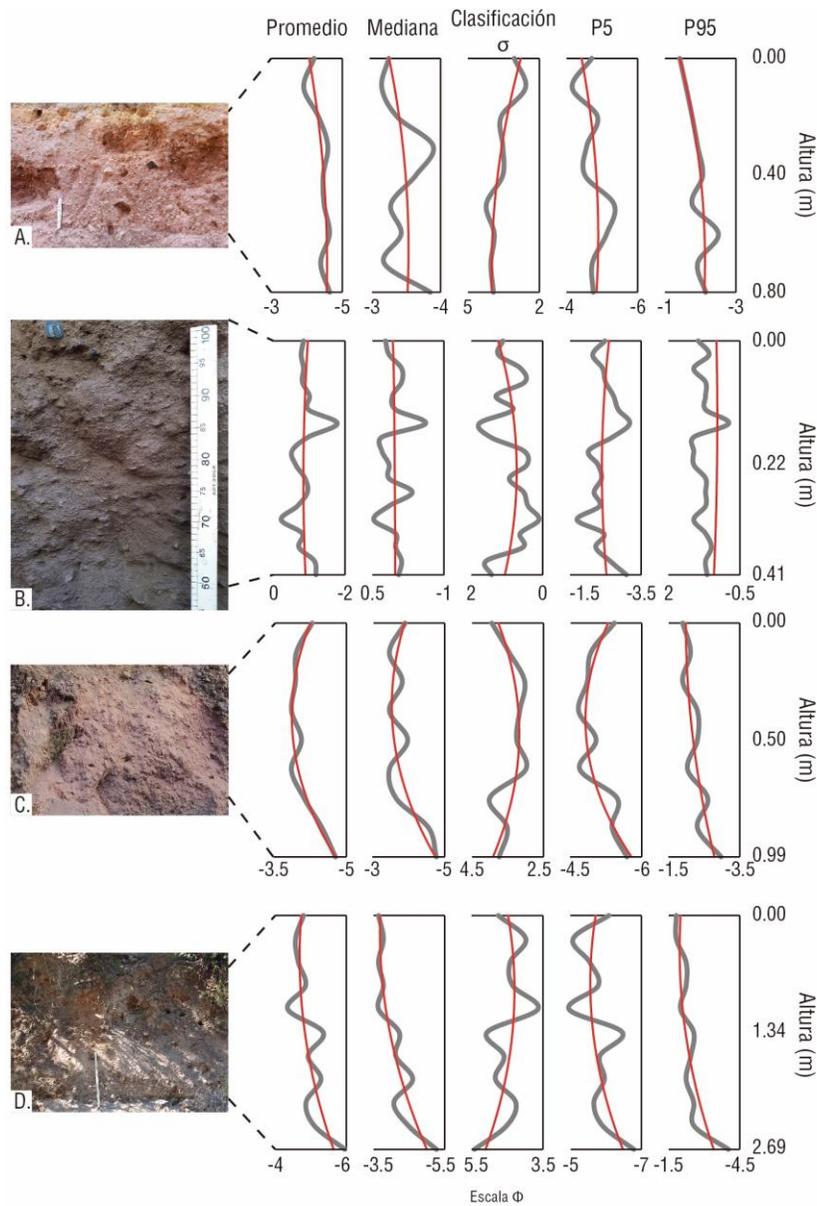
Afloramiento: PT2106

Presenta relaciones estadísticas similares al afloramiento PT2107, con la diferencia de que se encuentran más pronunciadas. De ahí, que también se interprete una gradación de tipo *coarse-tail*.

Figura 4.40. Granulometría óptica de la Unidad Gris. A. Afloramiento PT2101. B. Afloramiento PT2107. C. Afloramiento PT2102.

D. Afloramiento PT2106. Líneas rojas: ajuste potencial de grado 2 de la curva.

Figure 4.40. Gris Unit Optical granulometry by outcrop. A. PT2101. B. PT2107. C. PT2102. D. PT2106. Red lines: grade 2 potential adjustment.



Afloramiento, descripción e interpretación

Afloramiento: PT2101

La clasificación aumenta hacia el techo del depósito, mientras que la base del material presenta una tendencia al aumento en los porcentajes de partículas gruesas (P5), finas (P95) y el promedio de partículas. Estas evidencias son más fácilmente identificadas a partir de las líneas de ajuste que permiten interpretar una gradación normal.

Afloramiento: PT2107

La clasificación muestra un aumento continuo hacia la parte intermedia y el resto de estadísticos (promedio, mediana, P5 y P95) evidencian un aumento leve en el techo del depósito. Por tanto, se relaciona a una gradación inversa burda.

Afloramiento: PT2102

La clasificación presenta sus mayores valores en la parte intermedia del depósito. Además, los restantes estadísticos (promedio, mediana, P5 y P95) aumentan sus valores hacia el techo y la base del material piroclástico. Este tipo de indicios indican una gradación de tipo *coarse-tail*.

Afloramiento: PT2106

El afloramiento PT2106, muestra las mismas tendencias en los estadísticos que el sitio PT2101. Por tanto, también se relaciona a una gradación normal.

Figura 4.41. Granulometría óptica de la Unidad Rosada. A. Afloramiento PT2101. B. Afloramiento PT2107. C. Afloramiento PT2102. D. Afloramiento PT2106. Líneas rojas: ajuste potencial de grado 2 de la curva.

Figure 4.41. Rosada Unit Optical granulometry by outcrop. A. PT2101. B. PT2107. C. PT2102. D. PT2106. Red lines: grade 2 potential adjustment.

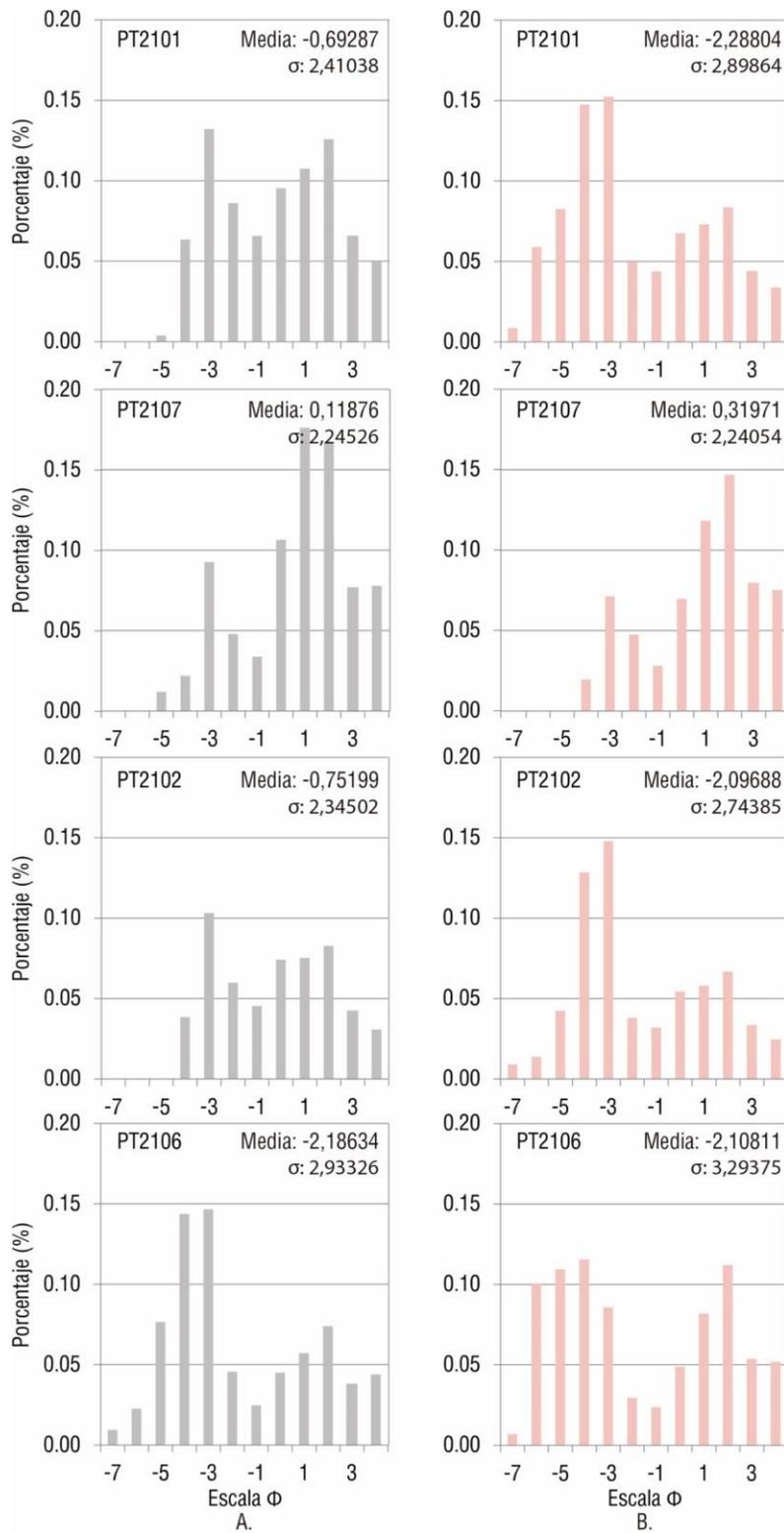


Figura 4.42. Granulometría extendida por unidad y afloramiento visitado. A. Unidad Gris. B. Unidad Rosada.
 Figure 4.42. Extended granulometry by unit and outcrop. A. Gris Unit. B. Rosada Unit.

Tabla 4.7. Valores granulométricos totales para la Unidad Rosada.

Table 4.7. Extended granulometry of Rosada Unit.

Escala	PT2101			PT2107			PT2102			PT2106		
	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia normalizada									
-7	0.0086	0.0086	1.0212	0.0000	0.0000	0.0000	0.0090	0.0090	1.3852	0.0069	0.0069	0.8456
-6	0.0589	0.0676	6.9765	0.0000	0.0000	0.0000	0.0137	0.0227	2.1191	0.1005	0.1074	12.2721
-5	0.0826	0.1502	9.7813	0.0000	0.0000	0.0000	0.0424	0.0651	6.5385	0.1093	0.2167	13.3522
-4	0.1475	0.2977	17.4616	0.0194	0.0194	2.9677	0.1284	0.1934	19.8108	0.1154	0.3321	14.0990
-3	0.1524	0.4501	18.0369	0.0712	0.0906	10.8783	0.1477	0.3412	22.7997	0.0856	0.4177	10.4519
-2	0.0497	0.4998	5.8824	0.0473	0.1379	7.2224	0.0380	0.3791	5.8583	0.0295	0.4471	3.6005
-1	0.0437	0.5435	5.1750	0.0280	0.1659	4.2807	0.0319	0.4110	4.9277	0.0236	0.4708	2.8887
0	0.0674	0.6108	7.9743	0.0696	0.2354	10.6308	0.0543	0.4653	8.3787	0.0488	0.5196	5.9590
1	0.0730	0.6839	8.6452	0.1182	0.3536	18.0561	0.0579	0.5232	8.9371	0.0818	0.6013	9.9870
2	0.0836	0.7675	9.8938	0.1467	0.5003	22.4139	0.0667	0.5899	10.2903	0.1120	0.7133	13.6763
3	0.0436	0.8111	5.1608	0.0791	0.5793	12.0834	0.0335	0.6234	5.1643	0.0536	0.7668	6.5425
4	0.0337	0.8448	3.9912	0.0750	0.6544	11.4666	0.0246	0.6479	3.7902	0.0518	0.8186	6.3253
Total	0.8448		100	0.6544		100	0.6479		100	0.8186		100

Tabla 4.8. Valores granulométricos totales para la Unidad Gris.

Table 4.8. Extended granulometry of Gris Unit.

Escala	PT2101			PT2107			PT2102			PT2106		
	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia normalizada									
-7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0093	0.0093	1.2856
-6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0224	0.0318	3.0918
-5	0.0037	0.0037	0.4653	0.0118	0.0118	1.4508	0.0000	0.0000	0.0000	0.0764	0.1082	10.5289
-4	0.0633	0.0670	7.9716	0.0218	0.0335	2.6839	0.0384	0.0384	6.9559	0.1436	0.2517	19.7864
-3	0.1320	0.1991	16.6201	0.0924	0.1259	11.3966	0.1032	0.1415	18.7006	0.1465	0.3982	20.1895
-2	0.0861	0.2851	10.8338	0.0478	0.1737	5.8920	0.0598	0.2014	10.8442	0.0455	0.4437	6.2707
-1	0.0657	0.3508	8.2655	0.0335	0.2072	4.1370	0.0453	0.2467	8.2179	0.0246	0.4683	3.3941
0	0.0953	0.4461	11.9941	0.1063	0.3135	13.1089	0.0741	0.3207	13.4235	0.0448	0.5131	6.1766
1	0.1074	0.5535	13.5181	0.1759	0.4894	21.6963	0.0753	0.3960	13.6472	0.0571	0.5702	7.8652
2	0.1258	0.6793	15.8349	0.1673	0.6567	20.6364	0.0827	0.4788	15.0000	0.0738	0.6440	10.1705
3	0.0653	0.7446	8.2230	0.0763	0.7330	9.4136	0.0422	0.5210	7.6443	0.0377	0.6817	5.1987
4	0.0498	0.7945	6.2736	0.0777	0.8107	9.5845	0.0307	0.5517	5.5664	0.0438	0.7255	6.0421
Total	0.7945		100	0.8107		100	0.5517		100	0.7255		100

Una vez conocidas la frecuencia y la frecuencia acumulada de las curvas granulométricas para los afloramientos visitados se normalizaron los valores para la obtención del promedio de estadísticos como promedio, desviación estándar, curtosis, asimetría y la eficiencia del modelo según la cantidad de parámetros a modelar en el software DECOLOG 6.0 (Tablas 4.9 y 4.10).

Los resultados evidencian que ambas unidades están muy mal clasificadas (desviación estándar de los diámetros expresados como ϕ) y los valores indican un pico positivo en el afloramiento PT2101 y una tendencia creciente entre los afloramientos PT2107 y PT2106. El promedio muestra un comportamiento inverso a la desviación estándar (Figura 4.43). La curtosis se clasifica como platicúrtica en la mayoría de mediciones a excepción de la Unidad Rosada en el afloramiento PT2106, lo cual indica una baja concentración de valores en torno a la media o promedio.

Tabla 4.9. Parámetros obtenidos en DECOLOG 6.0.
Table 4.9. DECOLOG 6.0 results.

Unidad	Estadístico	PT2101	PT2107	PT2102	PT2106
Gris	Promedio	-0,69	0,12	-0,75	-2,19
	Desviación estándar	2,41	2,25	2,35	2,93
	Clasificación	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado
	Asimetría	0,001	-0,54	0,06	0,47
	Clasificación	Simétrica	Negativa	Simétrica	Positiva
	Curtosis	1,80	2,49	1,81	1,95
	Curtosis (normalizada)	-1,20	-0,51	-1,19	-1,05
	Clasificación	Platicúrtica	Platicúrtica	Platicúrtica	Platicúrtica
Rosada	Promedio	-2,29	0,32	-2,10	-2,11
	Desviación estándar	2,90	2,24	2,74	3,29
	Clasificación	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado
	Asimetría	0,38	-0,52	0,41	0,21
	Clasificación	Simétrica	Negativa	Simétrica	Simétrica
	Curtosis	1,94	2,26	2,02	1,54
	Curtosis (normalizada)	-1,06	-0,74	-0,98	-1,46
	Clasificación	Platicúrtica	Platicúrtica	Platicúrtica	Muy platicúrtica

Para finalizar, la clasificación de asimetría revela que la mayoría de curvas granulométricas son simétricas, por tanto, los valores de media, moda y mediana son muy cercanos entre sí.

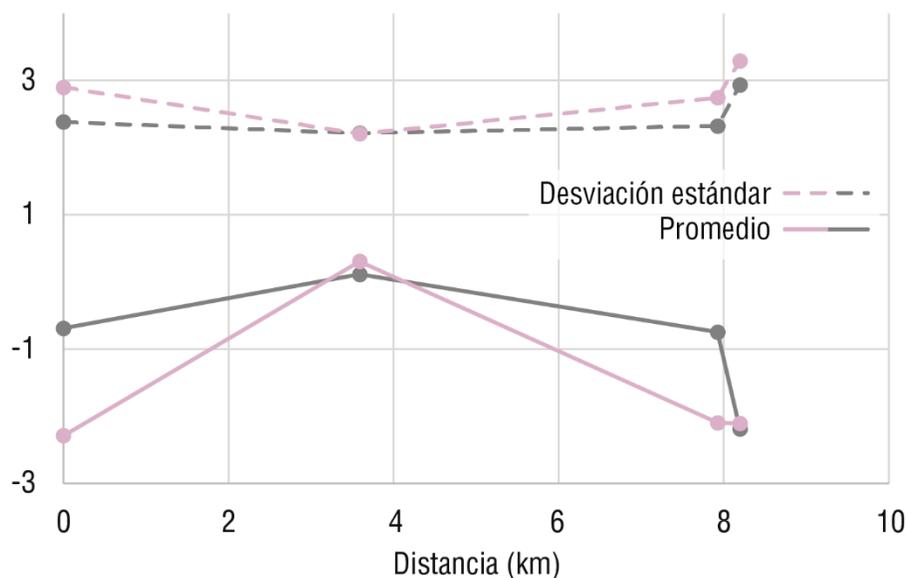


Figura 4.43. Desviación estándar y promedio de las granulometrías extendidas. El color de las líneas refleja la unidad estudiada.
 Figure 4.43. Extended granulometry: Standard deviation and mean. Color line indicates the unit studied.

Por último, el coeficiente función multi-objetivo, obtenido con el programa DECOLOG 6.0., permitió identificar tres poblaciones en la mayoría de muestras analizadas a excepción de las muestras PT2106 y PT2102 para las Unidades Gris y Rosado respectivamente, los cuales presentan dos poblaciones (Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Coeficiente función multi-objetivo obtenido con DECOLOG 6.0.
 Table 4.10. Multi-objective function coefficient.

Unidad	Afloramiento	Weibull 1 Parámetro	Weibull 2 Parámetros	Weibull 3 Parámetros
Gris	PT2101	-88,90	-113,43	-233,44
	PT2107	-86,97	-87,86	-230,10
	PT2102	-79,05	-104,87	-200,23
	PT2106	-96,39	-133,36	-127,10
Rosado	PT2101	-100,89	-125,56	-138,11
	PT2107	-81,87	-88,35	-219,16
	PT2102	-96,13	-140,46	-134,08
	PT2106	-74,42	-118,26	-119,95

Para cada población determinada anteriormente se calcularon parámetros estadísticos como mediana, desviación estándar, asimetría, curtosis y curtosis normalizada. Los resultados obtenidos se resumen en las tablas 4.11 y 4.12. En todos los casos, las distribuciones Weibull 1 parámetro, Weibull 2 parámetros y Weibull 3 parámetros describen las fracciones gruesa, media y fina de los depósitos respectivamente.

Tabla 4.11. Parámetros estadísticos según el número de parámetros en distribuciones Weibull para la Unidad Gris.

Table 4.11. Gris Unit: Statistics by Weibull parameter.

Afloramiento	Parámetro	Weibull 1 Parámetro	Weibull 2 Parámetros	Weibull 3 Parámetros
PT2101	Mediana	-3,5526	0,3	1,4098
	Desviación estándar	0,7084	2,1374	0,3641
	Asimetría	-0,0012	-0,5122	-0,7874
	Curtosis	2,7166	3,0459	3,9973
	Curtosis normalizada	-0,2834	0,0459	0,9973
PT2107	Mediana	-3,3774	0,7241	3,307
	Desviación estándar	0,6136	1,1839	0,4256
	Asimetría	0,2468	-0,4469	-0,6862
	Curtosis	2,8724	3,1574	3,6984
	Curtosis normalizada	-0,1276	0,1574	0,6984
PT2102	Mediana	-3,4187	-3,3038	0,8519
	Desviación estándar	0,3133	0,9861	1,5803
	Asimetría	0,7703	0,6233	0,2201
	Curtosis	3,9437	3,534	2,7524
	Curtosis normalizada	0,9437	0,534	-0,2476
PT2106	Mediana	-4,2192	-	1.1428
	Desviación estándar	1,0622	-	1.7452
	Asimetría	-0,5758	-	-0.0286
	Curtosis	3,1466	-	2.7242
	Curtosis normalizada	0,1466	-	-0.2758

Tabla 4.12. Parámetros estadísticos según el número de parámetros en distribuciones Weibull para la Unidad Rosada.

Table 4.12. Rosada Unit: Statistics by Weibull parameter.

Afloramiento	Parámetro	Weibull 1 Parámetro	Weibull 2 Parámetros	Weibull 3 Parámetros
PT2101	Mediana	-4,7216	-3,89	0,9308
	Desviación estándar	1,6716	0,505	1,5543
	Asimetría	0,6697	0,6142	0,0849
	Curtosis	3,3196	3,5118	2,7114
	Curtosis normalizada	0,3196	0,5118	-0,2886
PT2107	Mediana	-3,2384	1,017	3,3599
	Desviación estándar	0,7715	1,1873	0,3752
	Asimetría	0,5591	-0,441	-0,0202
	Curtosis	3,3829	3,1469	2,7217
	Curtosis normalizada	0,3829	0,1469	-0,2783
PT2102	Mediana	-4,0665	-	0.6019
	Desviación estándar	0,9144	-	1.8104
	Asimetría	-0,5827	-	-0.235
	Curtosis	3,1585	-	2.8602
	Curtosis normalizada	0,1585	-	-0.1398
PT2106	Mediana	-6,2149	-4,5236	1,3227
	Desviación estándar	0,4625	1,2111	1,431
	Asimetría	0,6492	0,0027	0,1403
	Curtosis	3,5997	2,7174	2,7209
	Curtosis normalizada	0,5997	-0,2826	-0,2791

4.3 Forma

Las partículas seleccionadas para realizar los análisis de morfología varían entre pómez, escoria y líticos, fueron muestreadas de manera aleatoria y manualmente en los afloramientos visitados. Los resultados obtenidos se enumeran a continuación en los subtítulos: intervalo granulométrico -3ϕ y variaciones verticales en la morfología de las partículas.

4.3.1 Intervalo granulométrico -3ϕ

Mediante el software FSA se calculó el valor promedio de la media para los rangos armónicos de 3-6 (forma general), 7-15 (redondez) y 16-50 (textura superficial), y se obtuvieron los valores de la Tabla 4.13.

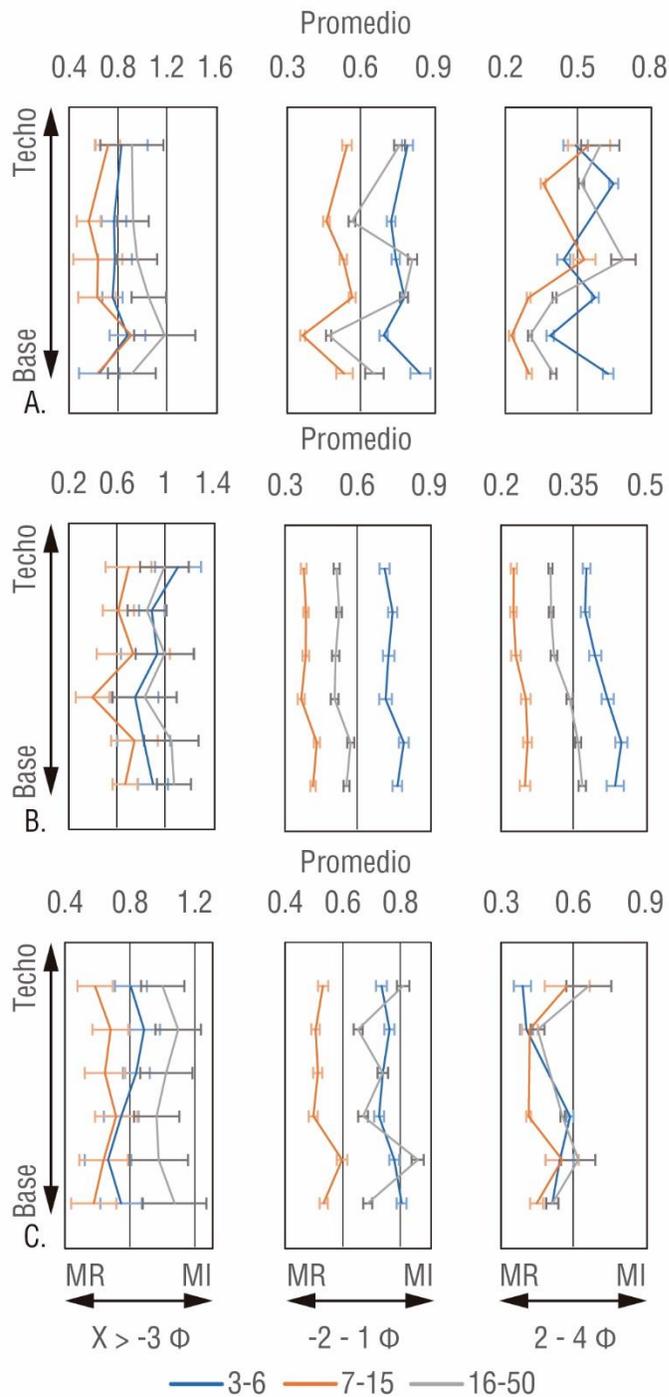
Tabla 4.13. Valores promedio y errores asociados de los análisis morfológicos realizados en FSA.

Table 4.13. Mean and standard error of morphological analyses.

Unidad	Código de afloramiento	Armónicos						Distancia (km)
		3 – 6		7 – 15		16 – 50		
		Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar	
Rosada	PT2101	0,658	0,011	0,382	0,006	0,435	0,005	0,00
	PT2107	0,667	0,014	0,395	0,009	0,485	0,008	3,59
	PT2102	0,635	0,015	0,364	0,008	0,432	0,006	7,93
	PT2106	0,707	0,018	0,438	0,011	0,504	0,011	8,20
Gris	PT2101	0,652	0,012	0,365	0,008	0,362	0,007	0,00
	PT2107	0,681	0,012	0,391	0,008	0,448	0,006	3,59
	PT2102	0,632	0,010	0,351	0,006	0,355	0,004	7,93
	PT2106	0,707	0,012	0,405	0,009	0,434	0,008	8,20

4.3.2 Variaciones verticales en morfología de las partículas

Los resultados se detallan por rangos granulométricos en las figuras 4.44 y 4.45. Donde en la mayoría de casos los armónicos tienen patrones similares a excepción de la Unidad Gris en el afloramiento PT2102 en el intervalo granulométrico $2 - 4 \phi$ y la Unidad Rosada en el afloramiento PT2101 en los rangos de tamaño $-2 - 1$ y $2 - 4 \phi$. Los rangos granulométricos fueron seleccionados a partir de los resultados de granulometría extendida.



Descripción
por intervalo granulométrico

X > -3 Φ: las partículas más irregulares se encuentran cerca de la base. Por otra parte, las partículas más regulares se encuentran hacia el techo del depósito.

-2 - 1 Φ y 2 - 4 Φ: muestran una tendencia inversa al intervalo X > -3 Φ, donde las partículas más regulares están cercanas a la base y las más irregulares hacia el techo del depósito.

X > -3 Φ: las partículas más regulares se encuentran en la parte intermedia del material analizado.

-2 - 1 Φ y 2 - 4 Φ: las gráficas evidencian que las partículas más irregulares se encuentran hacia la base del depósito.

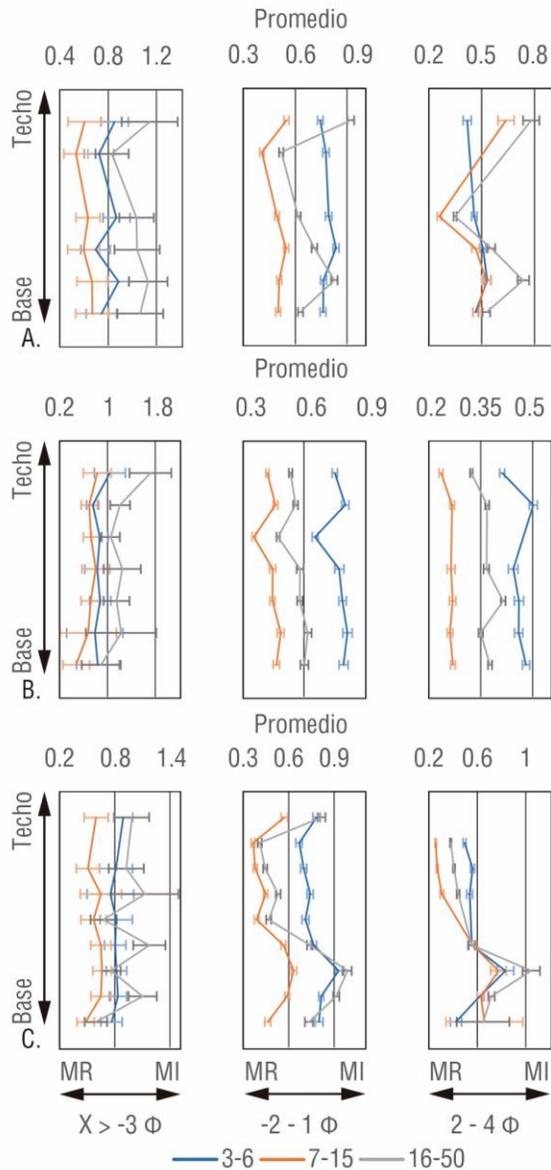
X > -3 Φ: las gráficas muestran un patrón sinuoso donde cerca de la base se identificaron las partículas más regulares y cerca del techo las partículas son más irregulares.

-2 - 1 Φ: la tendencia de los datos graficados indica que las partículas cerca de la base del depósito son más irregulares que en el techo.

2 - 4 Φ: para esta fracción granulométrica los armónicos del 7-15 y del 16-50 muestran valores irregulares cerca del techo y la base del depósito. Mientras, los armónicos 3-6 tienen los valores más irregulares en la parte central del material piroclástico.

Figura 4.44. Variaciones morfológicas de la Unidad Gris. A. Afloramiento PT2101. B. Afloramiento PT2107. C. Afloramiento PT2102. MR: Morfología regular. MI: Morfología irregular. Valores promedios de mayor valor reflejan partículas más irregulares y valores de menor valor partículas regulares.

Figure 4.44. Gris Unit morphological variations by outcrop. A. PT2101. B. PT2107. C. PT2102. MR.: Regular morphology. MI.: Irregular morphology.



Descripción por intervalo granulométrico

X > -3 Φ: las gráficas muestran que la base y el techo del depósito presentan las partículas más irregulares.

-2 - 1 Φ: los armónicos del 3-6 tienen un comportamiento lineal y con una ligera variación en la parte central del depósito, donde las partículas son más irregulares. Los armónicos 7-15 también presentan un comportamiento lineal, a excepción del techo del depósito, donde las partículas son más regulares. Por último, los armónicos 16-50 tienen los valores más irregulares cerca de la base y el techo del material piroclástico.

2 - 4 Φ: para esta fracción granulométrica los armónicos del 7-15 y del 16-50 muestran valores irregulares cerca del techo y la base del depósito. Mientras, los armónicos 3-6 tienen los valores más irregulares en la base del material piroclástico.

X > -3 Φ: las partículas tienden a ser más irregulares en el techo del material piroclástico.

-2 - 1 Φ: las partículas muestran la presencia de partículas regulares cerca del techo del depósito.

2 - 4 Φ: se reconocen las partículas más regulares en el techo del depósito. Por otra parte, los armónicos 3-6 y 16-50 tienen un pico de partículas irregulares cerca del techo y en la parte media respectivamente.

X > -3 Φ: los valores obtenidos demuestran patrones sinuosos a lo largo de la vertical del depósito.

-2 - 1 Φ: los patrones graficados evidencian la presencia de partículas irregulares cerca de la base y en el techo del material piroclástico.

2 - 4 Φ: las gráficas revelan partículas más irregulares en la base del depósito.

Figura 4.45. Variaciones morfológicas de la Unidad Rosada. A. Afloramiento PT2101. B. Afloramiento PT2107. C. Afloramiento PT2102. MR: Morfología regular. MI: Morfología irregular. Valores promedios de mayor valor reflejan partículas más irregulares y valores de menor valor partículas regulares.

Figure 4.45. Rosada Unit morphological variations by outcrop. A. PT2101. B. PT2107. C. PT2102. MR.: Regular morphology. MI.: Irregular morphology.

4.4 Análisis de componentes

Este tipo de análisis se enfocó en determinar visualmente el contenido de líticos, pómez y escoria de cada muestra tomada. Los resultados se muestran en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Análisis de componentes por fracción de morfología analizada.
 Table 4.14. Componentry analysis.

Unidad	Código de Afloramiento	Distancia (km)	Componentes				Porcentaje por componente		
			Escoria	Pómez	Líticos	Total	Líticos	Vidrio	Total
Rosada	PT2101	0.00	3	150	23	176	13	87	100
	PT2107	3.59	7	138	12	157	8	92	100
	PT2102	7.93	0	157	49	206	24	76	100
	PT2106	8.20	6	75	76	157	48	52	100
Gris	PT2101	0.00	0	107	86	193	45	55	100
	PT2107	3.59	8	104	13	125	10	90	100
	PT2102	7.93	0	71	59	130	45	55	100
	PT2106	8.20	0	34	63	97	65	35	100

A partir de los datos obtenidos se graficó distancia vs. porcentaje de líticos y vidrio (pómez + escoria) para cada unidad estudiada (Figura 4.46). Según esta gráfica se evidencia una disminución en el porcentaje de líticos entre el primer afloramiento y el segundo y una tendencia de aumento del mismo componente entre el segundo y cuarto sitio de muestreo. El aumento en el porcentaje de líticos respecto a la distancia puede demostrar la fragmentación de partículas vítreas por interacciones granulares y la asimilación de líticos en el sustrato por parte de la corriente piroclástica.

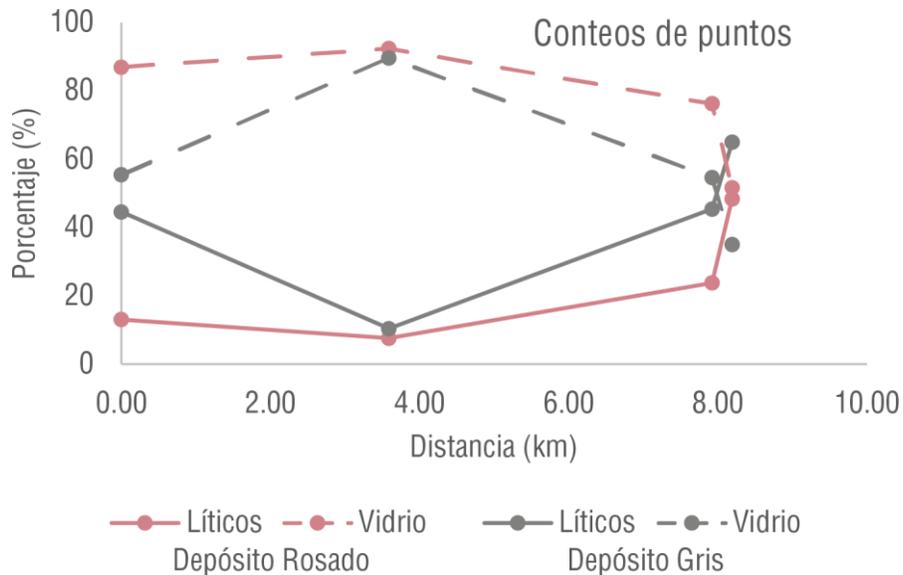


Figura 4.46. Análisis de componentes de las muestras empleadas para análisis morfológico.
 Figure 4.46. Componentry analysis.

4.5 Fábrica de forma

Los resultados de este apartado se subdividen en: (1) dirección de la orientación preferencial de las partículas, (2) variaciones verticales de la dirección de la fábrica de forma, e (3) imbricación.

4.5.1 Dirección de la orientación preferencial de las partículas

Las tablas 4.15 y 4.16 contienen los parámetros estadísticos promedios (Valor P, grado de orientación preferencial, número de partículas analizadas y orientación de la moda principal; Moreno-Chávez et al., 2018) obtenidos en función de diferentes rangos granulométricos en escala ϕ (mayor a -3ϕ , $-2 - 1\phi$, $2 - 4\phi$ y $-4 - 4\phi$) para la determinación de fábrica de forma de las unidades estudiadas. Los resultados demuestran que el rango $-2 - 1\phi$ tiene los mejores valores P en los afloramientos PT2101 y PT2102, mientras el rango $-4 - 4\phi$ presenta los mejores valores P en el afloramiento PT2107. Por tanto, los rangos granulométricos $-2 - 1\phi$ y $-4 - 4\phi$ son los idóneos para la estimación de la dirección preferencial de los flujos granulares estudiados. La variación de valores P puede estar asociada a cambios en el proceso de deposición de las corrientes piroclásticas estudiadas y se abarcará a profundidad en el Capítulo de Discusión.

En función de los valores P obtenidos se reconocieron dos muestras que no presentan una orientación preferencial de las partículas. Estas corresponden a la Unidad Rosada, en específico a las muestras BMED – 2 y AMINF-2-TOTAL.

La mayor parte de los valores P que sobrepasan 0,05 son de los rangos granulométricos mayor a -3ϕ y $2 - 4\phi$. Además, son las partículas que se encuentran en menor cantidad en los depósitos después de haber aplicado el filtro de excentricidad.

Por otra parte, los valores P que no sobrepasan 0,05 en los intervalos granulométricos mayor a -3ϕ y al intervalo entre 2 y 4ϕ son subparalelos o paralelos a la dirección de flujo con variaciones de hasta 60° . Algunas excepciones a esta tendencia son las partículas gruesas de las muestras D1INF, AMSUP y AOMSUP y las partículas finas de la muestra AOMINF que poseen una orientación perpendicular a la dirección de flujo.

Tabla 4.15. Fábrica de forma de la Unidad Gris: parámetros estadísticos. O.M.P.: Orientación de la moda principal.
 Table 4.15. Statistics of Gris Unit shape fabric. O.M.P.: Preferential orientation.

Afloramiento	Muestra	Parámetros	Rangos de escala Phi			
			X - -3	-2 - 1	2 - 4	-4 - 4
PT2101	DOINF_TOTAL	<i>P-value</i>	0,0447	0,000003	0,00421	0
		Isorientación	0,46147	0,218303	0,245178	0,25918
		Partículas	7	266	91	527
		O.M.P.	S15E	S10E	S08E	N05E
	DOMED_TOTAL	<i>P-value</i>	0,000042	0,00008	0	0
		Isorientación	0,564392	0,120713	0,295807	0,154409
		Partículas	13	647	191	950
		O.M.P.	S45E	S05W	S13E	S23E
	DOSUP_TOTAL	<i>P-value</i>	0,018562	0,000171	0,062583	0,000014
		Isorientación	0,456981	0,152305	0,118306	0,138914
		Partículas	9	374	198	581
		O.M.P.	S10W	N-S	S05E	S05E
PT2107	AINF	<i>P-value</i>	0,212304	0,00079	0,008818	0,000056
		Isorientación	0,266835	0,103336	0,247872	0,113703
		Partículas	11	669	77	757
		O.M.P.	-	N80E	N33E	N80E
	AMED	<i>P-value</i>	0,652998	0	0,250587	0
		Isorientación	0,285835	0,243641	0,15582	0,230655
		Partículas	3	364	57	424
		O.M.P.	-	S45E	S60E	S45E
	ASUP2	<i>P-value</i>	0,928607	0,000002	0	0
		Isorientación	0,07532	0,207544	0,522988	0,230965
		Partículas	7	308	30	345
		O.M.P.	-	S70E	N75E	S70E
ASUP1	<i>P-value</i>	0,452135	0,000001	0	0	
	Isorientación	0,264025	0,21527	0,500803	0,234702	
	Partículas	6	294	39	339	
	O.M.P.	S60E	N05E	N35E	N-S	
PT2102	AOMINF_TOTAL	<i>P-value</i>	0,030104	0,007551	0,006835	0,082577
		Isorientación	0,410352	0,091783	0,323714	0,060876
		Partículas	10	580	23	673
		O.M.P.	-	S51E	N20E	S30E
	AOMMED_TOTAL	<i>P-value</i>	0,313824	0,007876	0,001852	0,004825
		Isorientación	0,180494	0,107907	0,14292	0,111635
		Partículas	18	416	308	428
		O.M.P.	N18E	N75E	N75E	N75E
	AOMSUP_TOTAL	<i>P-value</i>	0,000001	0,00425	0,039131	0,004617
		Isorientación	0,599013	0,107677	0,416741	0,104234
		Partículas	15	471	9	495
		O.M.P.	N15E	S45E	S10E	S44E

Tabla 4.16. Fábrica de forma de la Unidad Rosada: parámetros estadísticos. O.M.P.: Orientación de la moda principal.
 Table 4.16. Statistics of Rosada Unit shape fabric. O.M.P.: Preferential orientation.

Afloramiento	Muestra	Parámetros	Rangos de escala Phi			
			X - -3	-2 - 1	2 - 4	-4 - 4
PT2101	D1INF	<i>P-value</i>	0,022981	0,020238	0,107046	0,005165
		Isorientación	0,405455	0,080692	0,168181	0,086795
		Partículas	11	599	79	699
		O.M.P.	S25E	N50E	N50E	N50E
	D1MED	<i>P-value</i>	0,343206	0,008518	0,89775	0,014759
		Isorientación	0,153258	0,086359	0,040736	0,076734
		Partículas	23	639	65	716
		O.M.P.	N08E	N45E	S50E	N55E
	D1SUP	<i>P-value</i>	0,00113	0,033499	0,384883	0,060104
		Isorientación	0,54341	0,073657	0,201697	0,065871
		Partículas	10	626	12	648
		O.M.P.	S30E	N20E	E-W	N20E
PT2107	BINF-TOTAL	<i>P-value</i>	0,004119	0,005637	0,000445	0,000045
		Isorientación	0,459817	0,072215	0,166907	0,088327
		Partículas	12	993	277	1282
		O.M.P.	S85E	S15E	S30E	S18E
	BMED2	<i>P-value</i>	0,02606	0,071501	0,183602	0,068748
		Isorientación	0,494638	0,077696	0,132983	0,073768
		Partículas	7	437	48	492
		O.M.P.	N55E	E-W	E-W	E-W
	BMED1	<i>P-value</i>	0,347278	0,007158	0,115674	0,003784
		Isorientación	0,303072	0,109496	0,11331	0,097554
		Partículas	6	412	168	586
		O.M.P.	S70E	S40E	S25E	S40E
BSUP	<i>P-value</i>	0,082679	0	0,035074	0	
	Isorientación	0,549513	0,192467	0,258855	0,195466	
	Partículas	4	652	50	706	
	O.M.P.	-	N20E	N45E	N20E	
PT2102	AMINF_2_TOTAL	<i>P-value</i>	0	0,739172	0,05146	0,477391
		Isorientación	0,585948	0,020155	0,135331	0,028273
		Partículas	19	744	162	925
		O.M.P.	N20E	N05E	N85E	N05E
	AMMED_TOTAL	<i>P-value</i>	0,967161	0,00272	0,028658	0,00032
		Isorientación	0,033917	0,09753	0,204431	0,105647
		Partículas	15	621	85	721
		O.M.P.	N23E	N-S	S04E	N-S
	AMSUP_TOTAL	<i>P-value</i>	0,002533	0,033885	0,422663	0,164574
		Isorientación	0,568917	0,144995	0,036682	0,047227
		Partículas	8	161	640	809
		O.M.P.	N78E	S10E	N30E	N10E

Los valores en *itálica* de las tablas 4.16 y 4.15 identifican las muestras que no pasaron la prueba estadística del valor – P. La dirección de flujo de la Unidad Gris varía de N-S en el afloramiento PT2101, a ser E-W en el sitio PT2103, y NW-SE en el afloramiento PT2102. La dirección de la corriente piroclástica de la Unidad Rosada varió de SW-NE a E-W y a N-S en función de la distancia respecto al cráter principal del volcán Popocatépetl.

4.5.2 Variaciones verticales de dirección preferencial de las partículas

Para conocer la variación de la dirección preferencial (moda) de las partículas en las unidades se emplearon 17 imágenes binarias para la Unidad Gris y 20 para la Unidad Rosada. De manera general las gráficas muestran un patrón de tipo *zig-zag* (Figura 4.47). La Figura 4.47 evidencia que una mayor variabilidad en la dirección de los depósitos en el afloramiento PT2107 (en un rango de 180°), mientras los afloramientos PT2101 y PT2102 varían en un rango de 120°.

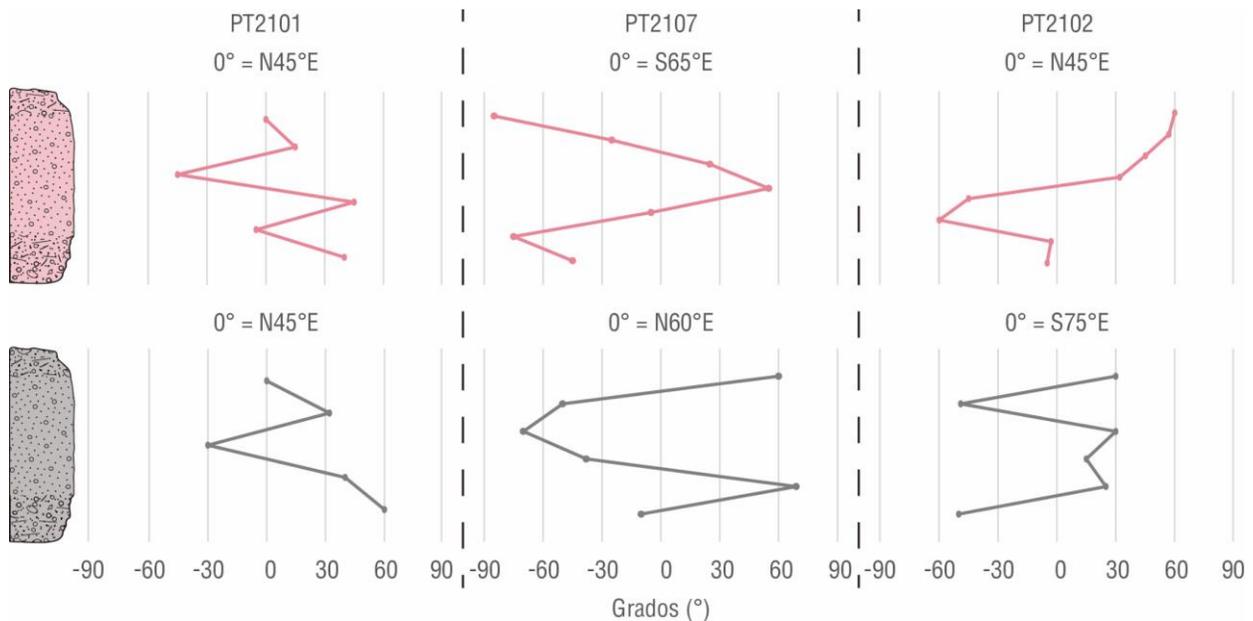


Figura 4.47. Variaciones de la dirección preferencial de las partículas.
Figure 4.47. Preference orientations variations.

4.5.2 Imbricación

Los valores de imbricación fueron obtenidos en los rangos granulométricos -2 – 1 y -4 – 4 ϕ según los resultados obtenidos en la dirección de las unidades. Es decir, para el afloramiento PT2107 se calculó el ángulo de imbricación en el intervalo -4 – 4 ϕ y para los sitios PT2101 y PT2102 se calculó para el rango -2 – 1 ϕ . Sin embargo, en todas las muestras los rangos -4 – 4 y -2 – 1 ϕ presentan el mismo ángulo de inclinación, mas no así el mismo grado de orientación. A excepción de la muestra AMSUP, donde ambos rangos difieren y por tanto se considera que no hay una imbricación predominante en la muestra (Figura 4.48). En la Tabla 4.17 se reportan ángulos positivos, negativos y valores de cero.

Tabla 4.17. Imbricación y valores estadísticos. O.M.P.: Orientación de la moda principal.

Table 4.17. Imbrication and statistics. O.M.P.: Preferential orientation.

Unidad		Gris		Rosado				
Afloramiento	Muestra	Parámetros	Valor	Muestra	Parámetros	Valor		
		P-value	0		P-value	0,000384		
		DOINF	Isorientación		0,333771	D1INF	Isorientación	0,172265
			Partículas		379		Partículas	265
		O.M.P.	10°		O.M.P.	20°		
	PT2101	DOMED	P-value	0,000023	D1MED2	P-value	0,000001	
			Isorientación	0,250158		Isorientación	0,21843	
			Partículas	171		Partículas	302	
		O.M.P.	-15°		O.M.P.	0°		
DOSUP	D1SUP	P-value	0	P-value	0,000002			
		Isorientación	0,280081	Isorientación	0,237652			
		Partículas	216	Partículas	229			
	O.M.P.	25°		O.M.P.	-25°			
PT2107	AINF	P-value	0	BINF	P-value	0		
		Isorientación	0,274224		Isorientación	0,202634		
		Partículas	446		Partículas	357		
		O.M.P.	0°		O.M.P.	-5°		
	AMED	BMED	P-value	0,000003	P-value	0		
			Isorientación	0,200322	Isorientación	0,190858		
			Partículas	316	Partículas	399		
		O.M.P.	-2,5°		O.M.P.	-15°		
	ASUP	BSUP	P-value	0	P-value	0		
Isorientación			0,363098	Isorientación	0,334305			
Partículas			323	Partículas	594			
	O.M.P.	5°		O.M.P.	-30°			
PT2102	AOMINF	P-value	0,017665	AMINF_TOTAL	P-value	0		
		Isorientación	0,137014		Isorientación	0,314021		
		Partículas	215		Partículas	205		
		O.M.P.	60°		O.M.P.	0°		
	AOMMED	AMMED	P-value	0,000133	P-value	0		
			Isorientación	0,311437	Isorientación	0,368679		
			Partículas	92	Partículas	224		
		O.M.P.	35°		O.M.P.	-5°		
	AOMSUP	AMSUP	P-value	0	P-value	-		
Isorientación			0,29293	Isorientación	-			
Partículas			310	Partículas	-			
	O.M.P.	5°		O.M.P.	-			

Los ángulos positivos son reportados para partículas cuya inclinación corresponde a la dirección de flujo, mientras que los ángulos negativos indican partículas inclinadas en la dirección opuesta al flujo (Figura 4.49). Por último, los valores de cero reflejan partículas sin una inclinación preferencial.

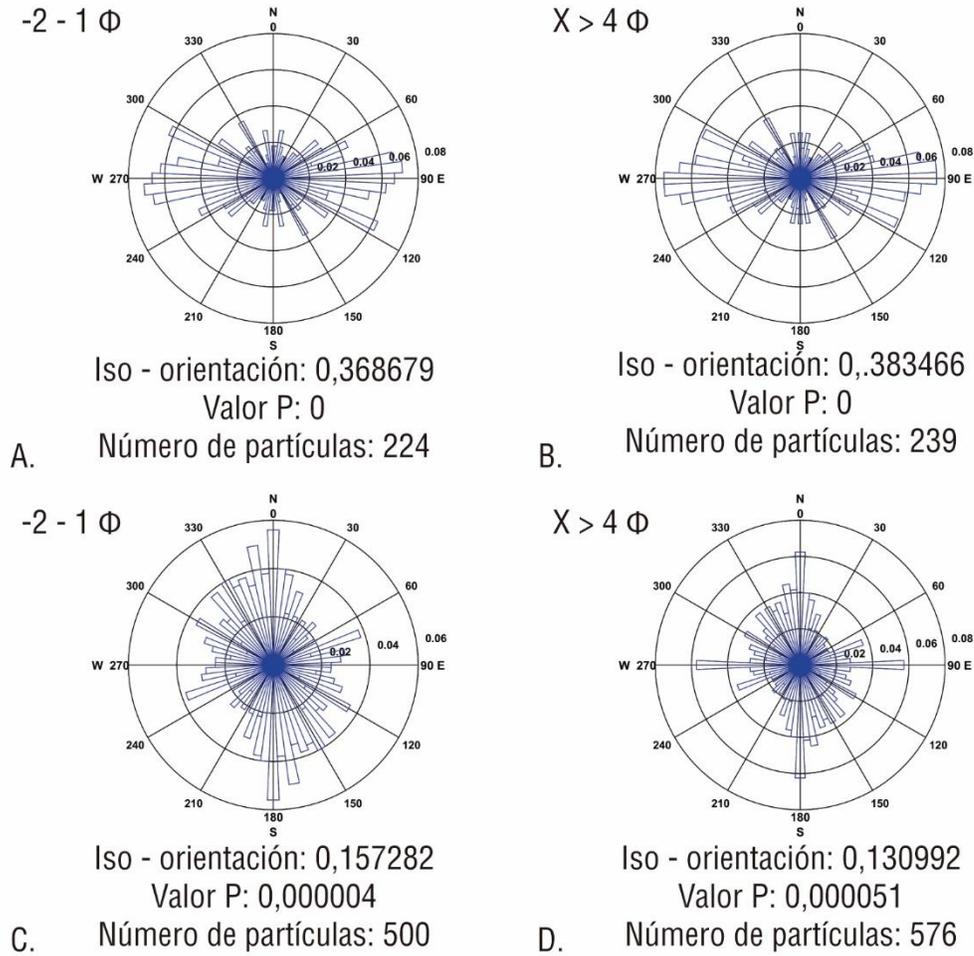


Figura 4.48. Diagramas de rosas de imbricación para muestras AMSUP y AMMED. A. y B. Diagramas de rosas para la muestra AMMED por intervalo granulométrico. C. y D. Diagramas de rosas para la muestra AMSUP por intervalo granulométrico.
Figure 4.48. Rose diagrams of imbrication for AMSUP and AMMED samples. A. y B. Rose diagrams for AMMED. C. y D. Rose diagrams for AMSUP.

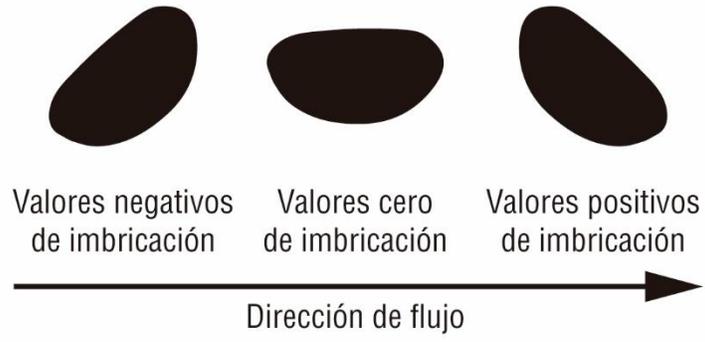
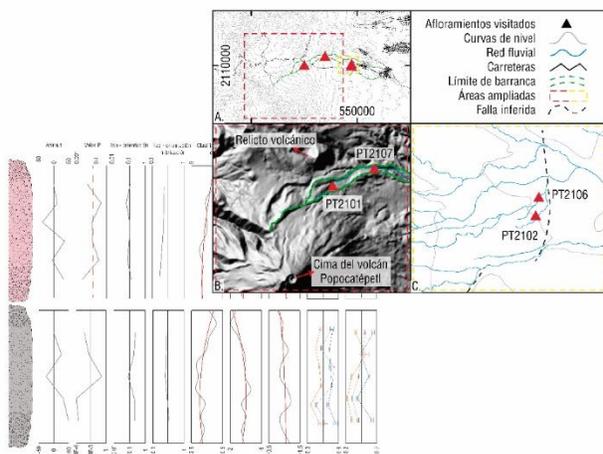


Figura 4.49. Valores de imbricación según el ángulo obtenido.

Figure 4.49. Imbrication values by angle.



DISCUSIÓN DE RESULTADOS

DESCRIPCIÓN BREVE

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos en aspectos de granulometría, morfología y fábrica de forma y como estos pueden sufrir variaciones a partir del factor morfométrico. Además, se plantea una interpretación de transporte de los materiales piroclásticos estudiados.

DESCRIPTION

In this chapter, we analyze the results of granulometry, morphology and shape fabric, and their deposition mechanism. We also give a kinematic interpretation of the pyroclastic deposits.

5.1 Metodología aplicada

En esta investigación se procedió a aplicar metodologías para el análisis de granulometría, morfología y fábrica de forma en las unidades estudiadas. Algunas consideraciones y modificaciones de estas se mencionan a continuación.

La granulometría se basó en ensayos de tamizados y granulometría óptica. Para los tamizados se empleó el método clásico y ampliamente aplicado, mientras, que para la granulometría óptica se usó el método de intercepciones de Rosiwal. Este método fue primeramente usado en depósitos geológicos por Sarocchi et al. (2005) y posteriormente aplicado con éxito por Sarocchi et al. (2011) y Rodríguez-Sedano et al. (2022). El uso de la granulometría óptica representa una herramienta potente para el estudio de depósitos piroclásticos, ya que permiten identificar patrones de gradación y mecanismos de segregación.

Los ensayos morfológicos en la horizontal fueron realizados sobre muestras de tamaño -3ϕ y siguiendo los parámetros empleados por Sarocchi et al. (2011), Caballero et al. (2012), Vázquez et al. (2014) y Rodríguez-Sedano et al. (2022). Sin embargo, este tipo de análisis solo revelan información de un intervalo granulométrico muy específico. Por lo que, se considera que los análisis deben realizarse en función de la granulometría de los depósitos estudiados, debido a que la granulometría permite reconocer la zona de mayor interacción granulométrica y, por tanto, identificar diferentes comportamientos morfológicos que pueden afectar a diferentes tamaños de partículas en caso de presentarse.

La metodología aplicada a los ensayos de fábrica de forma fue basada en los métodos documentados por Capaccioni y Sarocchi (1996), Cerca (2020), Zrelak et al. (2020), Hernández-Rivas et al. (2021) y Cerca (en prensa). Pero, esta metodología fue modificada y no se aplicó la resina de barniz 11 000 (*polyform*), debido a que la porosidad efectiva de las unidades estudiadas es menor a la de lahares e ignimbritas. Por tanto, se empleó silicato de sodio con valores altos de dilución, para lograr soluciones menos viscosas, rellenar la mayor cantidad de poros en las muestras y generar mejores impregnaciones. Además, para obtener una profundidad mayor en los resultados y el conocimiento de las unidades estudiadas bajo esta metodología, también se debe considerar la granulometría de los depósitos. Ya que, el tamaño de partículas si condiciona los resultados obtenidos (Apartado 5.6.1).

5.2 Estratigrafía del área de estudio

En el área de estudio se ubican cuatro unidades pertenecientes al macizo volcánico actual del volcán Popocatepetl según el mapa geológico presentado por Sosa-Ceballos et al., (2015). Estas cuatro unidades corresponden a las Erupción Pliniana Tutti Frutti, la Secuencia Pómez Ocre, la Pómez Lorenzo y la Pómez Rosada. La Tabla 5.18 resume las principales características y edades de cada unidad (Siebe et

al., 1966a; Panfil et al., 1999; Siebe et al., 1999; Siebe y Macías, 2006; Arana-Salinas et al., 2010; Sosa-Ceballos et al., 2012; Roberge et al., 2018).

Tabla 5.18. Principales características y correlación de las unidades que conforman el macizo actual del volcán Popocatepetl.
Tabla 5.18. Characteristic and correlation of Pyroclastic units at Popocatepetl volcano.

Unidad	Principales características para su identificación	Edad*	Unidad local	Principales características
Erupción Pliniana Tutti Frutti	Clastos de pómez, granitos, granodioritas, calizas y rocas metamórficas	~14000 a A.P.	-	-
Secuencia Pómez Ocre	Pómez color ocre con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno, olivino (muy característico en esta secuencia), óxidos y apatito	~4900 a A.P.	Unidad Inferior	Depósitos de CPDs con pómez con colores ocre, café, gris, amarilla clara y rosada y fenocristales de plagioclasa, olivino y cristales máficos. Los componentes secundarios son escoria y líticos lávicos cristalinos.
Pómez Lorenzo	Pómez amarilla a café y líticos de rocas metamórficas de color verde claro	~2800 – 2200 a A.P.	Unidad Media	Depósito color amarillo claro monolitológico. Los clastos que lo componen son pómez con fenocristales de plagioclasa y máficos.
Pómez Rosada	Pómez de color rosado a gris y blancas a amarillas claro con fenocristales de plagioclasa, dos tipos de piroxeno, olivino y óxidos	~1500 – 750 a A.P.	Unidad Superior	Dos depósitos con pómez amarilla clara a rojiza y fragmentos accesorios de líticos lávicos.

*A.P.: Antes del presente

En el reconocimiento y descripción en campo se identificaron tres unidades bien diferenciadas y con posiciones estratigráficas relativas de fácil reconocimiento. La presencia de pómez y juveniles cristalinos y su contenido mineral representan la principal característica para poder correlacionar las unidades descritas en el trabajo de campo. Basados en esta característica se correlacionó la Unidad Inferior a una parte de la Secuencia Pómez Ocre, la Unidad Media a la Pómez Lorenzo y la Unidad Superior a la Pómez Rosada (Tabla 5.18).

Dentro del área de estudio solo se identificaron 4 afloramientos con las características necesarias para poder tener un control estratigráfico. Sin embargo, la zona de los muestreos no fue sujeta a la posición relativa del afloramiento en la barranca estudiada y esta se analizará a continuación. Según las Figuras 1.1C y 5.50 se conoce que las muestras fueron tomadas en facies laterales y centrales de la barranca. Facies laterales se refieren a depósitos ubicados cerca de las divisorias de aguas o parte aguas

de la barranca estudiada, mientras que, con facies centrales se hace mención de depósitos cercanos al centro de la barranca.

Es indudable que la posición relativa de los depósitos respecto a la barranca condiciona el patrón de deposición y, por tanto, se pueden reconocer anomalías en las unidades estudiadas como cambios en regímenes cinemáticos y variaciones en patrones de gradación, porcentajes de componentes principales, iso-orientación de partículas, entre otras variables estudiadas. Esto debido a que al ser las CPD flujos granulares complejos estos se condicionan al emplazarse en medios isótropos como una barranca expuesta a procesos de erosión.

Las unidades identificadas en el área de estudio fueron reconocidas como depósitos piroclásticos de caída y asociados a corrientes piroclásticas de densidad. Los depósitos asociados a la Pómez Lorenzo se correlacionen a depósitos piroclásticos de caída, ya que, se caracterizan por ser monolitológicos, tener espesores uniformes y buenos valores de clasificación. Los depósitos asociados a la Pómez Rosada presentan las mismas características que la Pómez Lorenzo, pero se reconocieron patrones de gradación simétrica entre inversa a normal. Lo cual, permite interpretar que los depósitos asociados a la Pómez Rosada también son de caída, pero revelan que la columna eruptiva al momento del evento volcánico presentó una dinámica variable que produjo los patrones de gradación simétrica en los depósitos.

Las principales características de los depósitos asociados a la Secuencia Pómez Ocre son su mala clasificación, y la abundancia de una matriz de ceniza que le da soporte al depósito. Estas características permiten inferir que ambas unidades se tratan de depósitos asociados a corrientes piroclásticas de densidad. En específico, para el afloramiento PT2101, se identificó que los depósitos pertenecientes a la Secuencia Pómez Ocre corresponden a una litofacies de tobas estratificadas y con estratificación cruzada, ya que, presentan estratos discontinuos que se acuña lateralmente. Esta característica Branney y Kokeelar (2002) la refieren a la presencia de una zona límite de flujo dominada por flujos granulares, la cual es típica de corrientes piroclásticas de densidad concentradas.

En el caso de los afloramientos PT2102, PT2106 y PT2107 se consideran litofacies de toba lapillítica masiva, producto de un régimen de flujo granular, según la clasificación de Branney y Kokeelar (2002). Esto por presentar mala clasificación, pómez redondeadas, tener patrones de gradación inversa, normal y de tipo *coarse tail* burdas, tamaños de partículas de hasta tamaño bloque, tener una distribución granulométrica bimodal y una fábrica de forma bien desarrollada.

5.3 Variaciones granulométricas de las unidades

5.3.1 Bimodalidad granulométrica de las unidades

El aspecto bimodal de los depósitos ha sido reportado en algunos estudios en diferentes tipos de flujos granulares de tipo vulcanológico (Sparks, 1976; Scott, 1988; Vallance y Scott, 1997; Saucedo et al., 2008; Caballero, 2012; Caballero et al., 2012; Caballero et al., 2014; Macorps et al., 2018; Tabla 5.19).

Tabla 5.19. Bimodalidad en depósitos asociados a flujos granulares y su interpretación.
Table 5.19. Granular flow bimodality and their interpretation.

Autor	Interpretación
Sparks (1976)	Las distribuciones bimodales o polimodales de los tamaños de grano en los depósitos pueden ser debido a la presencia de varios mecanismos deposicionales actuando al mismo tiempo.
Scott (1988)	El extremo grueso de la bimodalidad es producto de la falta de energía del flujo granular para fragmentar partículas de gran tamaño.
Vallance y Scott (1997)	Asocian la bimodalidad al efecto erosivo del flujo granular que permite la incorporación de arenas y gravas del sustrato.
Saucedo et al., (2008)	Consideran el efecto erosivo mencionado anteriormente y agregan que el cambio en la pendiente del sustrato provoca la acentuación de la moda correspondiente a las partículas de mayor tamaño producto de la pérdida de energía del flujo granular.
Caballero (2012) y Caballero et al., (2012; 2014)	A partir de desarrollos experimentales sobre materia granular, que no consideran factores externos, relacionan la bimodalidad a un decremento en el tamaño de las partículas de la sección intermedia de la distribución granulométrica de los depósitos producto de procesos de conminución y fragmentación por la interacción entre las partículas mediante cadenas de esfuerzo. Además, sugieren este mecanismo sedimentológico como el proceso que genera el soporte por matriz.
Macorps et al., (2018)	Interpretan que el pico de partículas gruesas en las tendencias bimodales son productos de cambios de pendiente en la paleotopografía.
Presente investigación	Procesos de conminución, fragmentación, la incorporación de líticos y la pérdida de energía durante el emplazamiento de las CPDs.

En el caso de las unidades estudiadas (ambas tienen granulometrías bimodales) se considera que la bimodalidad es producto de procesos de conminución, fragmentación, la incorporación de líticos y la variación de la energía durante el emplazamiento de las CPDs en concordancia con las teorías de Scott (1988), Saucedo et al., (2008) y Caballero et al. (2012; 2014). Sin embargo, hay otros factores que debe tomarse en cuenta como los cambios en la dirección de la corriente piroclástica y cambios en la pendiente del terreno pueden afectar el proceso de deposición. Por ejemplo, estos cambios pueden generar la deposición de partículas más gruesas y, por tanto, acentuar una moda más respecto a la otra en el caso de depósitos bimodales.

5.3.2 Variaciones longitudinales

El afloramiento PT2101 presenta altos porcentajes de las partículas en el rango de tamaño entre -3 y -4 ϕ , debido a la barrera topográfica que representa el relleno de un cauce por el que atravesó la corriente piroclástica de densidad (Figura 5.50A y B). Este accidente topográfico provocó un cambio de

dirección de las corrientes piroclásticas estudiadas y por tanto una disminución en su velocidad. Además, se tuvo una pérdida de energía cinética y, por tanto, un aumento local en la temperatura granular que desencadenó la disminución de los procesos de conminución y fragmentación. De ahí, que la moda presente en el intervalo 2Φ sea menos pronunciada que la moda en el intervalo -3Φ . La principal consecuencia de este proceso fue la deposición de las partículas de mayor tamaño.

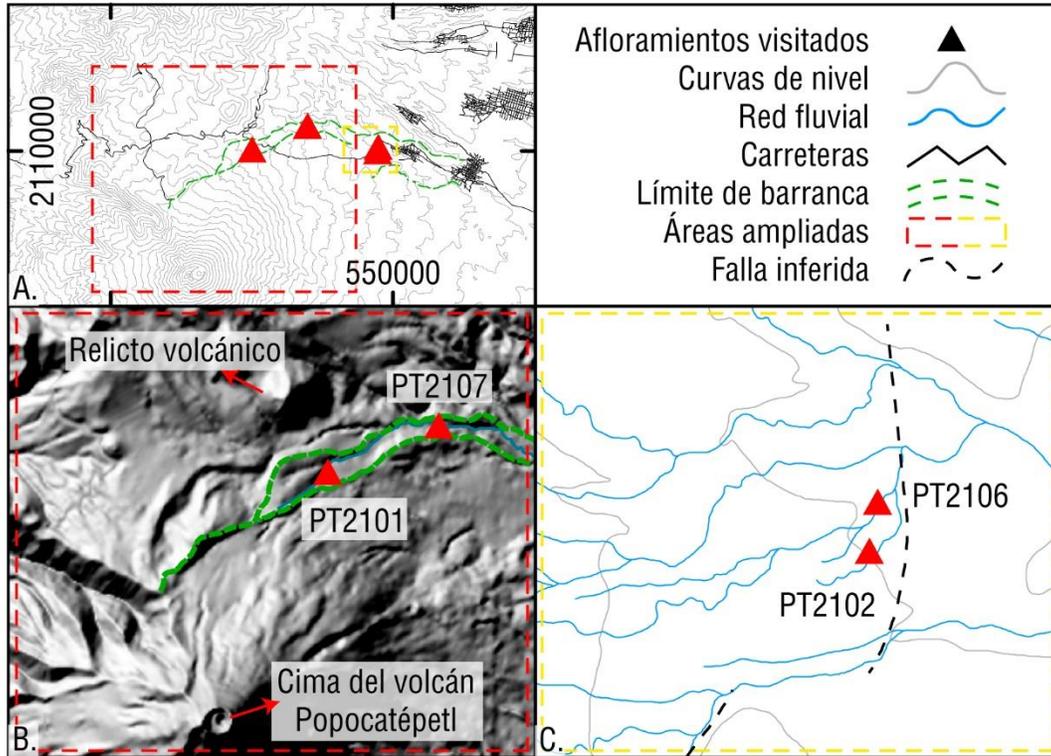


Figura 5.50. Anomalías topográficas y expresiones morfológicas. A. Mapa general. B. Acercamiento al sitio de muestreo PT2101. C. Patrón de drenaje modificado por una falla.

Figure 5.50. Topographic anomalies and morphologic expressions. A. General map. B. Outcrop PT2101. C. Drainage pattern influenced by faults.

La pérdida de energía cinética se ve demostrada conforme aumenta la distancia al área fuente. Esto se comprobó con el aumento en los porcentajes de partículas de la fracción -3ϕ y la disminución porcentual de las partículas de tamaño 2ϕ en la granulometría extendida de los afloramientos PT2107, PT2102 y PT2106 (Figura 4.42). En específico, el aumento progresivo en el porcentaje de las partículas del rango granulométrico -3Φ también se debe a procesos de segregación por tamaño de clastos vítreos y la incorporación de líticos lávicos (Figuras 4.39, 4.42 y 4.46).

La variación en los porcentajes de la fracción 2ϕ para la Unidad Rosada entre los afloramientos PT2107 y PT2102 se asocia de manera equivalente que a la Unidad Gris. Sin embargo, el cambio evidenciado entre los afloramientos PT2102 y PT2106 se relaciona a cambio topográfico local y a la

posición de las unidades respecto a la barranca, es decir si se trata de una facies lateral o central (Figura 5.50A y C). Este cambio topográfico es representado por el cambio pronunciado en la dirección de los cauces (varían de W-E a S-N) que produjo un aumento en la turbulencia de la corriente piroclástica de densidad y por tanto aumentó los efectos de conminución y fragmentación.

Por último, la recurrencia de la bimodalidad en los mismos intervalos granulométricos refleja que el factor de interacción granular es más relevante que el topográfico en la cinemática de las corrientes piroclásticas estudiadas. Caballero et al. (2014) consideraron una conclusión similar en la simulación de flujos granulares en medios cerrados, donde indicaron que la bimodalidad de las partículas puede ser independiente del mecanismo de transporte, las condiciones del sustrato y las rocas involucradas en el mecanismo de disparo en el caso de depósitos de flujos de escombros y lahares. Sin embargo, las condiciones topográficas si son relevantes para la deposición de los flujos granulares; esto se refleja en la variación de los porcentajes de las modas obtenidas en los ensayos granulométricos (Figura 4.42). Donde las modas se mantienen en los mismos intervalos granulométricos, pero presentan porcentajes muy variables. Por ejemplo, el intervalo granulométrico -3ϕ de la Unidad Gris donde el porcentaje varía entre ~13% a ~9% entre los afloramientos PT2101 y PT2107.

5.3.3 Perfiles Granulométricos Verticales

Los perfiles granulométricos verticales realizados para ambas unidades ponen en evidencia patrones de gradación típicos de depósitos asociados a corrientes piroclásticas de densidad como lo son gradación normal, inversa y de tipo *coarse tail* y son producto directo de mecanismos de segregación por densidad y tamaño derivados de las interacciones granulares típicas presentes en flujos granulares (Fisher y Schmincke, 1984; Branney y Kokeelar, 2002; Brown y Andrews, 2015; Figuras 4.40 y 4.41).

Sin embargo, en el caso de la Unidad Gris para los afloramientos PT2101 y PT2102 se identificaron patrones de gradación simétricos que varían de inversa a normal de base a techo (Figura 4.40). De la misma manera que en las variaciones longitudinales, en el afloramiento PT2101, la presencia de un bajo topográfico condiciona y cambia las interacciones granulares, lo cual puede provocar patrones de gradación anómalos como el visto. Mientras que, en el afloramiento PT2102 se asocia la gradación simétrica a que el sitio de muestreo se ubica sobre una facies lateral. Esto produce una mejor visualización y desarrollo de un mecanismo de agregación progresiva y, por tanto, una diferenciación de unidades de flujo más eficiente, lo cual repercute directamente en generación de patrones simétricos de gradación.

5.4 Variaciones morfológicas de las partículas

5.4.1 Variaciones longitudinales

Las dos unidades estudiadas presentan variaciones morfológicas longitudinales similares (Figura 5.51). Caballero (2012) y Caballero et al. (2012; 2014) realizaron experimentos analógicos para ver el efecto de las interacciones granulares en el cambio de forma de las partículas, donde reconocieron que la presencia de clastos finos (tamaño arcilla y limo) provocan cambios morfológicos homogéneos y la ausencia de clastos finos genera redondeamiento de las partículas de mayor tamaño y fracturamiento en las partículas más pequeñas. También se han realizado estudios de forma de partículas en depósitos naturales y los principales resultados se resumen a continuación (Tabla 5.20).

Tabla 5.20. Interpretación de variaciones longitudinales morfológicas en depósitos asociados a flujos granulares naturales.
Table 5.20. Longitudinal variations of particle morphology interpretations in natural granular flow deposits.

Autor	Interpretación
Sarocchi (2006) y Sarocchi et al., (2011)	Demostaron que las partículas se tornan más irregulares respecto a la distancia a causa de un fracturamiento progresivo de los clastos a partir de un cambio en la pendiente del terreno que provoca una mayor liberación de energía mecánica, calor y sonido.
Vázquez et al., (2014)	Identificaron que las partículas ($X > 0 \Phi$) eran más irregulares respecto a la distancia y lo asociaron a colisiones fuertes y un mecanismo de transporte de flujo descendente (<i>transport mechanism down flow</i>).
Rodríguez-Sedano et al., (2022)	Reconocieron que la morfología de las partículas (del intervalo granulométrico -3Φ) es sensible a la morfometría de la barranca.
Presente investigación	Se interpretó un mecanismo de transporte de flujo descendente (<i>transport mechanism down flow</i>), posterior a un cambio abrupto en la pendiente (afuera del área de estudio). Sin embargo, también influye la incorporación de líticos del sustrato.

Los resultados obtenidos reflejan una tendencia de aumento de la irregularidad de las partículas conforme aumenta la distancia de las unidades Gris y Rosada al centro eruptivo para el intervalo granulométrico -3Φ (Figura 5.51). Esta tendencia se evidencia en los parámetros de forma general, redondez y textura superficial, y la única diferencia es el orden de magnitud de los valores obtenidos. La tendencia muestra un cambio de pendiente del terreno (afuera del área de estudio y más cercano a la cima del volcán Popocatepetl) y un mecanismo de transporte de flujo descendente, pero este mecanismo incluye la incorporación de clastos líticos del sustrato, lo cual concuerda con las teorías propuestas por Sarocchi et al. (2011) y Vázquez et al. (2014) en otras zonas de estudio. La incorporación de litoclastos la demuestran los análisis de componentes realizados (Figura 4.46) y que este tipo de líticos sean irregulares indica la pérdida de temperatura granular y energía de la corriente piroclástica conforme aumenta la distancia. El aumento en la regularidad morfológica cercano a los 8 km de distancia se asocia a la paleo-

topografía en congruencia con los resultados Rodríguez-Sedano et al. (2022) y al sitio de muestreo, ya que representa una facies lateral.

Por tanto, se concluye que los análisis morfológicos en las partículas estudiadas indican la presencia y variación, respecto a la distancia, de diferentes variables como la incorporación de partículas del sustrato, la paleo-topografía, sitio de muestreo, la temperatura granular y la energía del sistema.

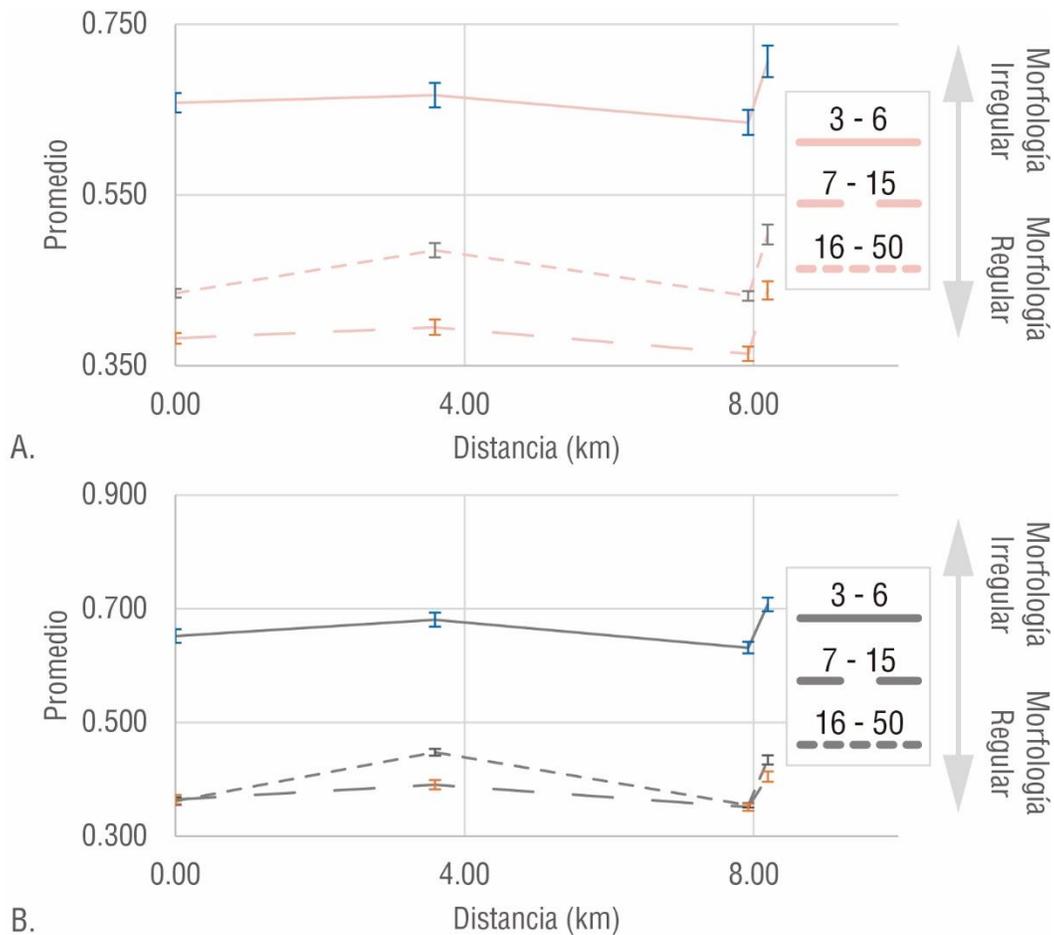


Figura 5.51. Redondez de las partículas. A. Coeficientes de forma general, redondez y textura superficial para la Unidad Rosada. B. Coeficientes de forma general, redondez y textura superficial para la Unidad Gris.
 Figure 5.51. Irregularities of particles. A. Rosada Unit: General form, roundness and surface texture. B. Gris Unit: General form, roundness and surface texture.

5.4.2 Variaciones verticales

Previo al análisis de las variaciones verticales se eliminaron los datos con valores altos de error estándar (errores mayores a 5%). Estos datos corresponden principalmente a toda la fracción de mayor tamaño ($X > -3 \Phi$) y algunos datos de la fracción de menor tamaño ($2 - 4 \Phi$). Los altos valores de error son debidos a la poca cantidad de partículas presentes en las imágenes binarias procesadas. Los valores que superaron el filtro del porcentaje de error se normalizaron y se muestran en las Figuras 5.52 y 5.53.

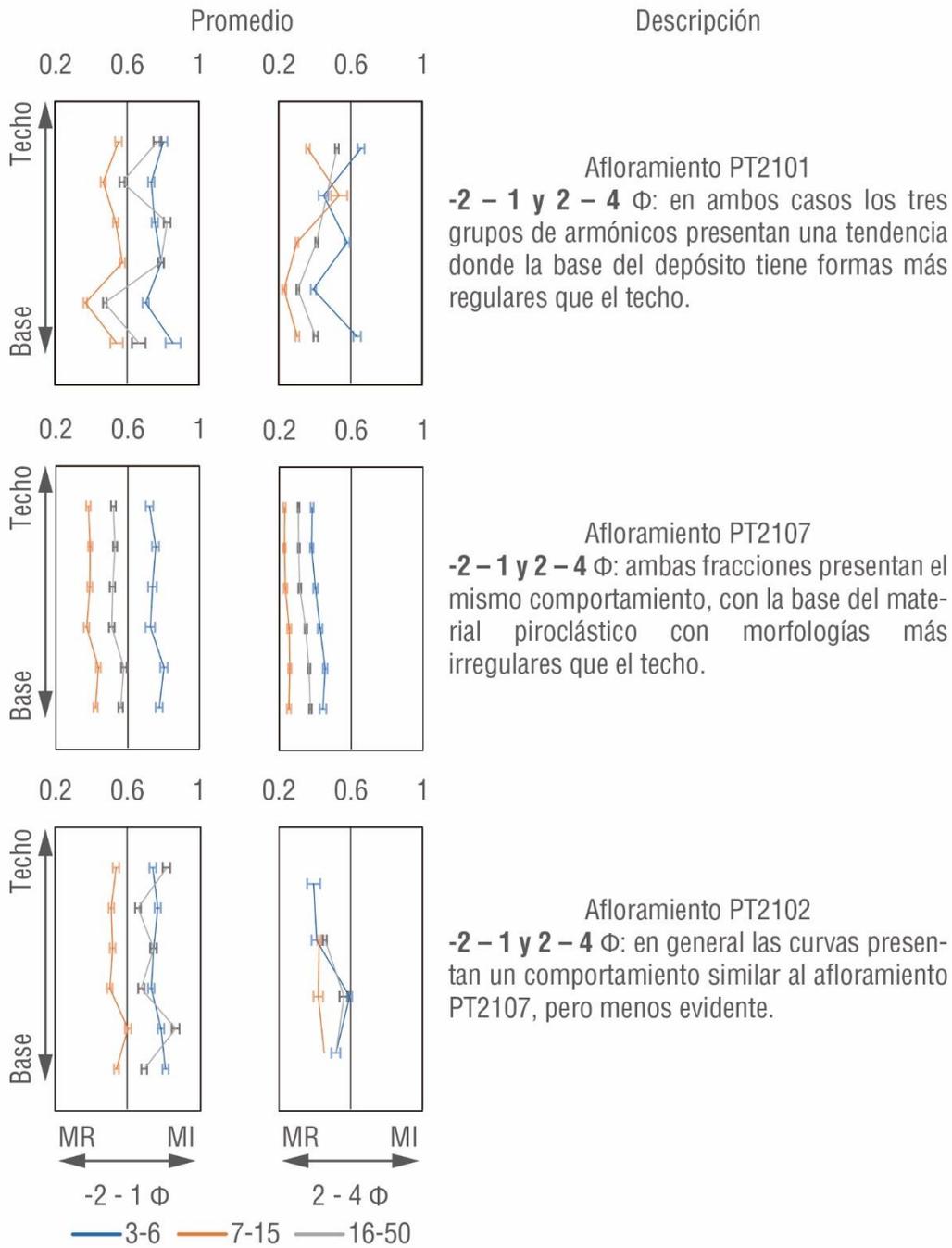


Figura 5.52. Valores morfológicos para los intervalos granulométricos -2 -1 y 2 - 4 Φ de la Unidad Gris.
 Figure 5.52. Morphology by granulometric intervals of Gris Unit.

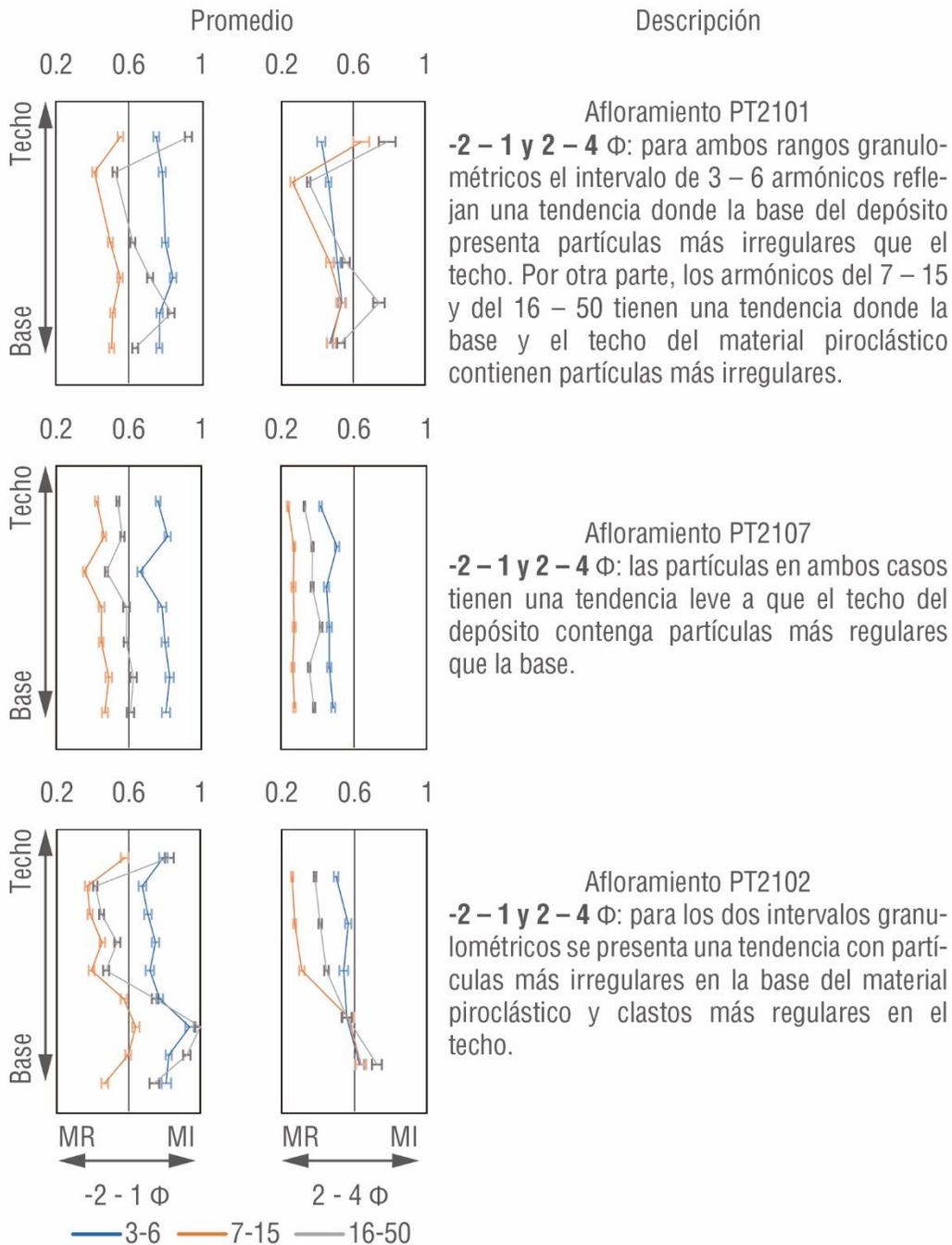


Figura 5.53. Valores morfológicos para los intervalos granulométricos -2 -1 y 2 - 4 Φ de la Unidad Rosada.
 Figure 5.53. Morphology by granulometric intervals of Rosada Unit.

Sarocchi (2006) caracterizó los regímenes colisional y friccional de flujos granulares desde el punto de vista de la morfología de las partículas. Donde, un régimen colisional comprende una cinemática de impactos rápidos de poca energía (debido a la brevedad de los contactos) que produce el redondeamiento de clastos (aumento de regularidad); mientras un régimen friccional provoca contactos prolongados entre partículas y presiones elevadas, por tanto, la fragmentación de partículas (aumento de irregularidad);

Tabla 5.21). Además, Kurokawa et al. (2018) relacionan la morfología de las partículas a la viscosidad del flujo granular mediante desarrollos experimentales con agua y ceniza. En específico, mencionan que las partículas más angulares generan viscosidades altas y partículas menos angulares provocan viscosidades bajas.

Tabla 5.21. Caracterización de los regímenes colisional y friccional de flujos granulares a partir de los datos de Sarocchi (2006) y Kurokawa et al., (2018).

Table 5.21. Characterization of regimes frictional and collisional by Sarocchi (2006) and Kurokawa et al., (2018).

Régimen cinemático	Comportamiento de partículas	Regularidad / irregularidad de las partículas	Viscosidad
Colisional	Impactos rápidos de poca energía	Más regulares	Baja
Friccional	Impactos prolongados y presiones elevadas	Más irregulares	Alta

Según la caracterización de Sarocchi (2006) se interpretaron los regímenes cinemáticos para cada unidad estudiada. La Unidad Gris para los afloramientos PT2107 y PT2102 muestran claramente un régimen friccional a la base de la unidad y un régimen colisional al techo del mismo. Para el caso del afloramiento PT2101 se muestra una tendencia opuesta, debido al aumento de turbulencia que puede generar el relleno de un paleo valle fluvial. Un aumento en la turbulencia generará una mayor cantidad de impactos y una mayor dispersión de la energía cinética durante el emplazamiento de la corriente piroclástica, por tanto, un aumento en la regularidad de las partículas.

La Unidad Rosada en el afloramiento PT2101 revela un emplazamiento de una paleo topografía parcialmente rellena que provocó una menor turbulencia y por tanto impactos prolongados y aumento de la presión a la base de la unidad, es decir un régimen friccional, que evolucionó a un régimen colisional (partículas más regulares) hacia el techo del estrato. El aumento final de la irregularidad de las partículas evidenciado en los armónicos 7 – 15 y 16 – 50 se relaciona a la pérdida de energía de la corriente piroclástica, por lo que las interacciones granulares no llegan a modificar la forma general de las partículas. En los afloramientos PT2107 y PT2102 presentan partículas irregulares a la base de las unidades y regulares en el techo.

A partir las interpretaciones realizadas la mayoría de secciones verticales concuerdan con el modelo experimental de Drake (1990) de un flujo granular con un régimen cinemático que varía de friccional a colisional en la vertical. Además, se comprueban las observaciones experimentales de Caballero et al. (2012) donde la presencia de partículas finas hace que todas las partículas estudiadas tengan un comportamiento homogéneo. Por último, la viscosidad de los materiales estudiados fue mayor

en la base respecto al techo. Sin embargo, debe analizarse mediante modelos analógicos como las variaciones en el relieve pueden alterar este modelo experimental.

5.5 Análisis de componentes

Para ambas unidades se reconoce un comportamiento similar en los análisis de componentes (Figura 4.46). Los análisis revelan patrones similares a pesar de que ambas unidades tienen ligeras variaciones composicionales (tipo de pómez). Lo cual, permite sugerir que la incorporación de líticos por parte de las CPD es inducida por la reología y cinemática de las CPD y no por cambios composicionales.

La Figura 4.46 exhibe una anomalía negativa cerca de los 4 km que corresponde a un aumento en la cantidad de clastos vítreos. Esta anomalía puede estar asociada a la posición del muestreo en la barranca estudiada. Ya que, se trata de una facies lateral y estas se encuentran enriquecidas en vidrio y empobrecidas en líticos. Una interpretación similar (muestreo de una facies lateral y una central) se debe considerar entre los afloramientos PT2102 y PT2106, es decir cerca de los 8 km de distancia, donde hay un cambio abrupto en los porcentajes de líticos y pómez en una distancia corta.

5.6 Variaciones en la fábrica de forma de las partículas

5.6.1 La fábrica de forma y el tamaño de las partículas

Existe una relación importante entre la fábrica de forma y el tamaño de las partículas analizadas. La Tabla 5.22 resume el comportamiento de fábrica de forma de las unidades en varios intervalos granulométricos estudiados.

Tabla 5.22. Orientación preferencial de las partículas por intervalo granulométrico.
Table. 5.22. Preferential particle orientation by granulometric interval.

Afloramiento		PT2101				PT2107				PT2102				Unidad
Intervalo granulométrico		X < -3	-2 - 1	2 - 4	X < 4	X < -3	-2 - 1	2 - 4	X < 4	X < -3	-2 - 1	2 - 4	X < 4	
Orientación de las partículas	Inferior	S15E	S10E	S08E	N05E	*	N80E	N33E	N80E	*	S51E	N20E	S30E	Gris
	Media	S45E	S05W	S13E	S23E	*	S45E	S60E	S45E	N18E	N75E	N75E	N75E	
	Superior	S10W	N-S	S05E	S05E	S60E	N05E	N35E	N-S	N15E	S45E	S10E	S44E	
Orientación de las partículas	Inferior	S25E	N50E	N50E	N50E	S85E	S15E	S30E	S18E	N20E	N05E	N85E	N05E	Rosada
	Media	N08E	N45E	S50E	N55E	N55E	E-W	E-W	E-W	N23E	N-S	S04E	N-S	
	Superior	S30E	N20E	E-W	N20E	*	N20E	N45E	N20E	N78E	S10E	N30E	N10E	

*Muestras sin una orientación preferencial de las partículas.

A continuación, se hacen algunas aseveraciones para cada intervalo granulométrico (X < -3 φ; -2 a 1 φ; 2 a 4 φ; X < 4 φ) según los resultados obtenidos.

1. El intervalo $X < -3 \phi$ corresponde a partículas cuyo eje largo no evidencia la dirección de la corriente piroclástica, en la mayoría de casos, debido a que son las partículas de mayor tamaño y por tanto, es más difícil que alcancen una temperatura granular ideal para interactuar con otras partículas. Generalmente se encuentran perpendiculares a la dirección de las partículas del intervalo granulométrico -2 a 1ϕ .

2. El rango -2 a 1ϕ es el que mejor representa la dirección de flujo de la corriente piroclástica, debido a que es el que tiene mejores índices estadísticos, no considera modas influenciadas por partículas de gran tamaño y es el intervalo con mayor interacción granular.

3. El intervalo 2 a 4ϕ corresponde a un grupo de partículas que no se orientan con una preferencia específica, ya que su orientación es fuertemente influenciada por las partículas de mayor tamaño en la corriente o no tienen el tamaño necesario para generar cadenas de esfuerzo efectivas.

4. El intervalo $X < 4 \phi$, al considerar todas las partículas segmentadas muestra características de todos los grupos granulométricos, por lo que en la interpretación se pueden confundir algunas modas con direcciones de flujo no reales según la cantidad de partículas segmentadas para cada rango granulométrico.

5. Algunas fluctuaciones leves en la dirección de flujo son debidas a que los depósitos piroclásticos producto de flujos se ramifican y agrupan de forma irregular en el frente de flujo, es decir forman patrones oscilatorios parecidos a los ríos con canales anastomosados. Este comportamiento fue previamente reportado para productos piroclásticos por Capaccioni y Sarocchi (1996) y Valentini et al., (2008).

Por tanto, dentro de los depósitos de corrientes piroclásticas existen diferentes regímenes de partículas, donde un grupo conservan la dirección de flujo, otras “flotan” en la corriente y las últimas se orientan en función de anomalías locales o no alcanzan a generar cadenas de esfuerzo efectivo.

La presencia de una dirección preferencial de las partículas (N-S) casi perpendicular a la barranca estudiada en el afloramiento PT2101 para la Unidad Gris permite identificar que un factor externo a las interacciones granulares condicionó la orientación final de las partículas. En el caso de la Unidad Rosada la dirección preferencial de las partículas presenta una orientación paralela a la barranca debido al efecto de relleno parcial de la barranca provocado por la deposición de la Unidad Gris.

Para el sitio PT2107 ambas unidades tienen un comportamiento similar, donde la dirección preferencial de las partículas varía en un rango amplio (cerca de 180°), lo cual permite inferir un patrón de deposición meándrico o trenzado. Estos patrones son típicos en depósitos sedimentarios (Boggs, 2006).

Por último, en el afloramiento PT2102 las unidades tienen patrones de fábrica de forma distintos. La Unidad Gris sigue evidenciando un patrón meándrico o trenzado, pero con una variación de la dirección preferencial de las partículas de menor tamaño (120°). Mientras, que las partículas de la Unidad Rosada tienen una orientación preferencial perpendicular a la barranca, lo cual puede ser interpretado como una zona de deposición distal o la presencia de un factor topográfico que cambió la dirección preferencial de las partículas.

5.6.2 Efecto de la topografía en la fábrica de forma

El efecto de la topografía en la fábrica de forma será evaluado en secciones verticales y horizontales de los muestreos realizados desde los ámbitos de: (1) dirección preferencial de las partículas, (2) los grados de orientación de la dirección preferencial de las partículas y de imbricación y, por último, (3) desde el punto de vista de facies proximales, medias y distales.

5.6.2.1 Secciones horizontales

La principal causa de la variación de la dirección preferencial de las partículas en flujos granulares geológicos es la topografía preexistente (Kieffer, 1989; MacDonald y Palmer, 1990; Fisher et al., 1993; Baer et al., 1997; Ort et al., 1999; Porreca et al., 2003; Ort et al., 2003; Willcock et al., 2014; Ort et al., 2015; Vitouš, 2020; Zrelak et al., 2020; Hernández-Rivas et al., 2021). En específico, Fisher et al. (1993) y Hernández-Rivas et al. (2021) identificaron que las direcciones preferenciales concuerdan con valles fluviales y la dirección de la pendiente, mientras que la presencia de accidentes topográficos puede modificar la fábrica de forma de maneras muy variables. Por otra parte, Ort et al. (1999; 2003; 2015) mencionan que las corrientes piroclásticas se emplazan de manera radial en zonas donde la topografía no representa obstáculos. Por último, Willcock et al. (2015) relacionan variaciones laterales a patrones meándricos generados durante el emplazamiento de las corrientes piroclásticas de densidad por efecto de la topografía.

Para el área de estudio se encontró una relación directa entre los elementos del paisaje y la fábrica de forma. El afloramiento PT2107 se ubica geográficamente sobre el cauce de un río que provocó el confinamiento de la corriente piroclástica en concordancia con las hipótesis de Fisher et al. (1993) y Hernández-Rivas et al. (2021). Este confinamiento generó: (1) una mayor variación en la dirección preferencial de las partículas (cerca de 180° , Figura 4.47); (2) una mayor interacción entre partículas, demostrado a partir de que los mejores valores P se encuentran en el intervalo granulométrico de $-4 - 4 \phi$; y similar a los resultados de Hernández-Rivas et al. (2021); (3) los valores más altos en el grado de orientación de las partículas (Tablas 4.15 y 4.16).

Por otra parte, los afloramientos PT2101 y PT2102 muestran patrones de fábrica de forma opuestos al PT2107, debido a que se encuentran influenciados directamente por anomalías topográficas, como: bajos topográficos y zonas de represamiento, que produjeron cambios en la dirección de las corrientes piroclásticas (Figura 5.50B y C). Estos cambios de dirección por accidentes geográficos se ven reflejados en la fábrica de forma a partir de: (1) una menor variación en la dirección preferencial de las partículas (cerca de 120° , Figura 4.47); (2) una menor interacción entre partículas, demostrado a partir de que los mejores valores P se encuentran en el intervalo granulométrico de $-2 - 1 \phi$; y (3) los valores más bajos en el grado de orientación de las partículas respecto al afloramiento PT2107 (Tablas 4.15 y 4.16).

El grado de iso – orientación de las partículas en las corrientes piroclásticas de densidad conforme aumenta la distancia del sitio de origen ha sido interpretado de dos maneras. La primera hipótesis la mencionan Kieffer (1989), MacDonald y Palmer (1990) y Zrelak et al. (2020) quienes demostraron que la dispersión de la dirección de las partículas aumenta respecto a la distancia por efectos de la topografía. Mientras, la segunda hipótesis fue referida por Ort et al. (1999; 2003; 2015) donde con la distancia las corrientes piroclásticas de densidad mejoran el grado de orientación preferencial de las partículas por la pérdida de energía y que la dinámica del flujo granular empieza a ser controlada por la gravedad, por tanto, que se produzcan zonas de cizalla.

El grado de orientación preferencial de las partículas no refleja un patrón lineal con el aumento en la distancia respecto al sitio de origen de las corrientes piroclásticas estudiadas (Figura 5.54A). Sin embargo, las secciones inferiores de ambas unidades muestreadas presentan las tendencias más lineales (Figura 5.54B).

Por otra parte, el grado de imbricación en la parte inferior de las Unidades Gris y Rosada muestran una tendencia lineal negativa, es decir disminuye respecto a la distancia (Figura 5.54C). Por tanto, se demuestra que la dinámica de emplazamiento de las corrientes piroclásticas de densidad estudiadas contempla más de una variable y que la parte inferior de los depósitos posiblemente tuvieron una dinámica similar a la antes expuesta por Kieffer (1989), MacDonald y Palmer (1990) y Zrelak et al., (2020).

Los comportamientos en los grados de orientación preferencial e imbricación se considera que son debido a que cada afloramiento muestreado manifiesta el efecto de una anomalía topográfica diferente.

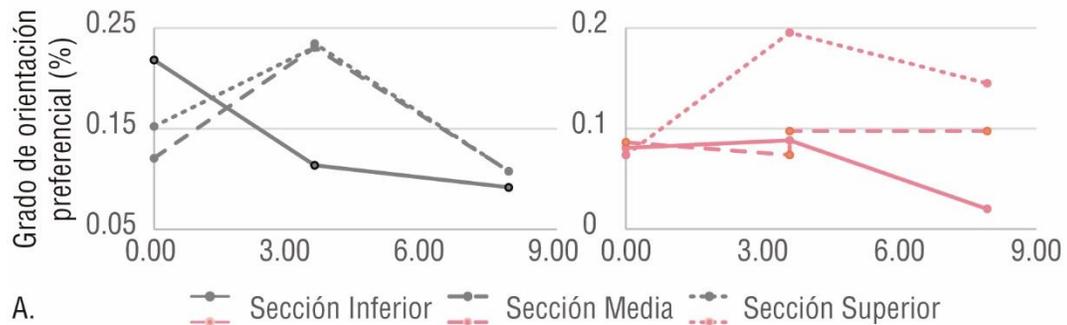
Por último, Baer et al. (1997) y Ort et al. (2015) correlacionan facies piroclásticas al grado de orientación preferencial de las partículas según valores de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética

(AMS; Tabla 5.23). Sin embargo, para las unidades estudiadas no es posible caracterizarlos en facies, debido a que se encuentran relacionados a anomalías topográficas locales.

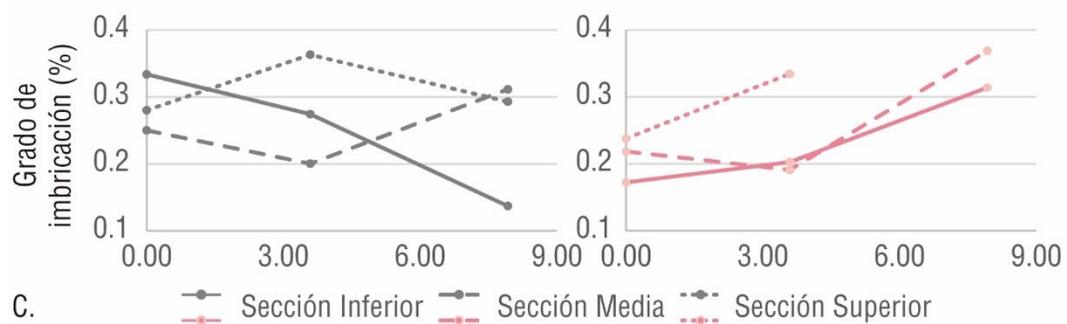
Tabla 5.23. Grado de orientación preferencial de las partículas según facies piroclásticas para datos de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS).

Table 5.23. Iso-orientation according to pyroclastic facies for Anisotropic Magnetic Susceptibility (AMS) data.

Facies	Anisotropía	Foliación	Alineamientos	Interpretación
Proximal	Poco desarrollada	Débil	Débil	Régimen caótico y turbulento con poco desarrollo de fábrica
Media	Bien desarrollada	Fuerte	Fuerte	Mejores fábricas
Distal	Desarrollada	Fuerte	Débil	Fábricas intermedias



	Depósito	Sección Inferior	Sección Media	Sección Superior
B.	R ² Depósito Gris	0.8374	0.0221	0.1267
	R ² Depósito Rosado	0.7072	0.179	0.2894



	Depósito	Sección Inferior	Sección Media	Sección Superior
D.	R ² Depósito Gris	0.9714	0.354	0.0081
	R ² Depósito Rosado	0.9317	0.6681	-

Figura 5.54. Porcentajes de orientación de partículas para orientación preferencial de las partículas e imbricación en secciones horizontales. A. Grado de orientación de las partículas de las Unidades Gris y Rosada. B. R² de ajustes lineales aplicados. C. Grado de imbricación de las Unidades Gris y Rosada. D. R² de ajustes lineales aplicados.

Figure 5.54. Iso-orientation and imbrication of horizontal sections. A. Iso-orientation of Gris and Rosada Units. B. Lineal adjustments applied. C. Imbrication grade of Gris and Rosada Units. D. Lineal adjustments applied

5.6.2.2 Secciones verticales

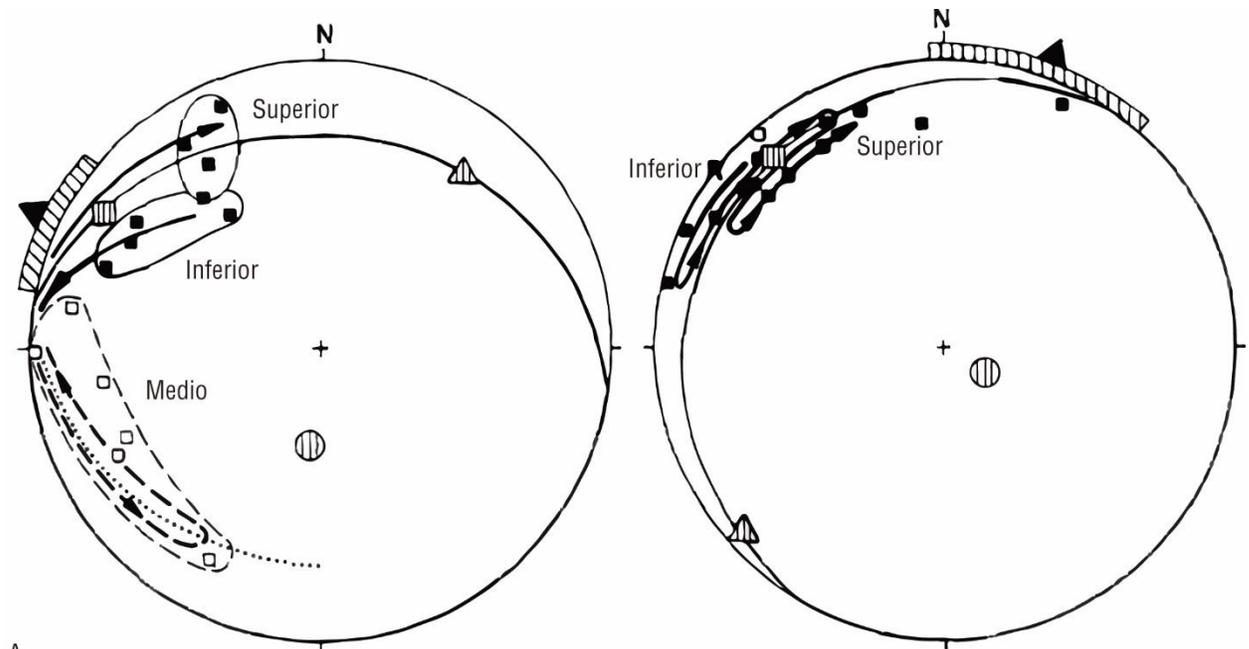
En el capítulo de resultados (Figura 4.47) se reconoció que los depósitos estudiados presentan una variación en la dirección preferencial de las partículas. Las variaciones en la dirección de flujo en la vertical de materiales granulares de tipo geológico han sido reportadas por: MacDonald y Palmer (1990), Hillhouse y Wells (1991), Capaccioni y Sarocchi (1996), Baer et al., (1997), Hughes y Druitt (1998), Ort et al., (2003), Baas et al., (2007), Paquereau-Lebti et al., (2008), Valentini et al., (2008); LaBerge et al., (2009), Cañón-Tapia y Mendoza-Borunda (2014), Agrò et al., (2015), y Simón-Muzas et al., (2022; Tabla 5.24). Sin embargo, los autores anteriormente citados mencionan diferentes hipótesis acerca de este comportamiento en la dirección preferencial de las partículas en la vertical de los depósitos. La variación en la dirección preferencial de los depósitos puede oscilar entre poco y mucho. Por tanto, se dividen las hipótesis en dos grupos.

Las oscilaciones presentadas en las unidades estudiadas varían entre 120° y 180° (Figura 4.47), por tanto, no son subparalelas o paralelas a la dirección de flujo y se consideran dentro del grupo de mucha oscilación y la única anomalía visible es que el afloramiento PT2107 presenta valores de oscilación mayores (180°) a los sitios PT2101 y PT2102 (120°). Las causas generales que provocaron las oscilaciones pueden ser mecanismos agregacionales y la presencia de varias unidades de flujo. Esta última, ya que las orientaciones obtenidas son bien definidas (comprobadas estadísticamente) y no son paralelas entre sí. Para el afloramiento PT2101 se considera que la principal causa de las variaciones es la irregularidad en el sustrato, ya que las corrientes piroclásticas de densidad primero tuvieron que rellenar un paleo canal que a su vez cambió su dinámica cinética. En el sitio PT2107, las principales causas de la variación fueron la canalización del flujo, un cambio espacial en la dirección de la corriente y corrientes meándricas provocadas por la deposición en la barranca estudiada y la curva que esta presenta. Mientras, que para el afloramiento PT2102 existió un control topográfico que provocó la oscilación en la orientación preferencial de las partículas.

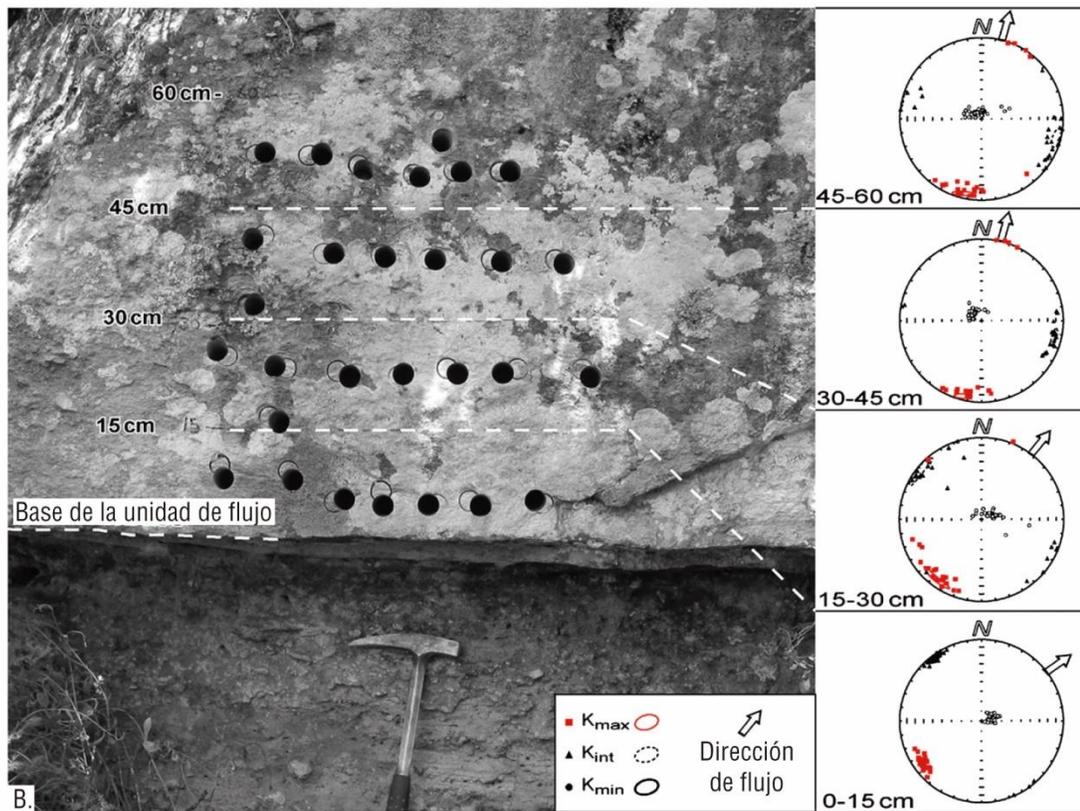
Las causas de la oscilación entre las diferentes direcciones de flujo rechazadas son el incremento de movimiento de flujo, por la falta de herramientas para su estimación, emplazamientos en cortos periodos de tiempo, por la ausencia de edades radiométricas o relativas en cada unidad estudiada y la turbulencia de las corrientes piroclásticas de densidad asociadas, debido a que los depósitos se clasifican como producto de corrientes piroclásticas de densidad concentradas y no diluidas.

Tabla 5.24. Interpretación de variaciones verticales en la dirección preferencial de las partículas.
 Table 5.24. Preferential direction of particles interpretation in vertical sections.

Autor	Interpretación	Tipo de oscilación
Hughes y Druitt (1998)	Indican que posterior a un mecanismo de deposición por congelación masiva (<i>masse freezing</i>) una corriente piroclástica puede incrementar su espesor debido a una agregación que puede modificar la dirección preferencial de las partículas.	Poca
Ort et al., (2003)	Asocian las variaciones a que el mecanismo de deposición no fue agradacional o a una cizalla débil durante el emplazamiento.	
Simón-Muzas et al., (2022)	Relacionan poca oscilación a la existencia de múltiples centros eruptivos. Lo cual, se considera en esta investigación que puede ser producto de distancias cortas de emplazamiento que no permiten la diferenciación de las corrientes piroclásticas.	
MacDonald y Palmer (1990)	Reconocieron variaciones de dirección de flujo en la vertical de depósitos piroclásticos asociadas a emplazamientos en cortos periodos de tiempo (Figura 5.55A).	
Capaccioni y Sarocchi (1996)	Interpretan cambios en la dirección preferencial de las partículas como consecuencia directa de un mecanismo depositacional agradacional.	
Baer et al., (1997)	Relacionan cambios de dirección de flujo a turbulencia de la corriente.	Mucha
Ort et al., (2003)	Indican que la presencia de unidades de flujo puede generar variaciones moderadas en las direcciones de flujo y las caracterizan como bien definidas y no paralelas.	
Baas et al., (2007)	Identificaron para turbiditas que la variación en la dirección de flujo puede ser producto de cambios espaciales en la dirección de la corriente, fuerzas Coriolis, corrientes meándricas, canalización del flujo, irregularidades en el sustrato y corrientes de baja velocidad con un <i>momentum</i> insuficiente para mantener la dirección.	
Paquereau-Lebti et al., (2008)	Interpretan patrones de dirección de flujo variables en depósitos piroclásticos por incrementos de movimiento de flujo.	
Valentini et al., (2008)	Indican que la variación en la dirección de flujo y su grado de iso-orientación está relacionado a un mecanismo de deposición discontinuo y de agregación progresiva.	
LaBerge et al., (2009)	Relacionan la variación en la dirección preferencial de las partículas en depósitos piroclásticos a una deposición que migra lateralmente o a un emplazamiento de corrientes meándricas (Figura 5.55B).	
Cañón-Tapia y Mendoza-Borunda (2014)	Asocian variaciones en la dirección de flujo en corrientes piroclásticas a dinámicas deposicionales inestables.	
Agrò et al., (2015)	Reportan variaciones en la dirección de flujo en depósitos en los que no hay controles topográficos y hay poca variación altimétrica.	
Presente investigación	Las causas generales que provocaron las oscilaciones pueden ser mecanismos agradacionales y la presencia de varias unidades de flujo.	



A.



B.

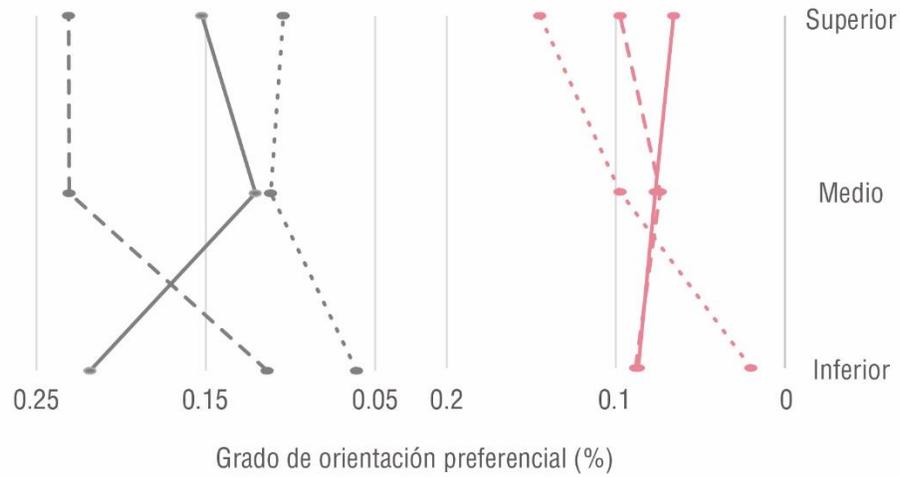
Figura 5.55. Hipótesis de mucha oscilación. A. Variaciones de azimut en la vertical reportadas por MacDonald y Palmer (1990). B. Variaciones de azimut en la vertical reportadas por LaBerge et al., (2009).
 Figure 5.55. Wide angles hypothesis. A. Variations reported by MacDonald y Palmer (1990). B. Variations reported by LaBerge et al., (2009).

El grado de orientación preferencial de las partículas en la vertical de las unidades fue analizada por Fisher et al. (1993), Capaccioni y Sarocchi (1996); Cagnoli y Tarling, (1997), LaBerge et al. (2009) y

Zrelak et al. (2020) donde reconocieron patrones que muestran una disminución en la iso – orientación entre la base y el techo de los depósitos. Este comportamiento LaBerge et al. (2009) lo relacionan a la presencia de una zona de cizalla en la base y la turbulencia de la corriente piroclástica de densidad en el techo. Pero, también se puede relacionar a un régimen cinemático de tipo friccional a la base y un régimen cinemático de tipo saltacional al techo de los depósitos, lo cual también influencia directamente en la morfología de las partículas. Sin embargo, Willcock et al. (2014) identificaron variaciones en el grado de orientación preferencial de las partículas sin un patrón en específico y las relacionan a las fuerzas de cizalla de diferentes unidades de flujo, cambios en el tamaño de partícula y el nivel de turbulencia de la corriente piroclástica.

Para el área de estudio, el grado de orientación preferencial de las partículas en el afloramiento PT2101 tiende a disminuir de base a techo (Figura 5.56A). Mientras, los sitios PT2107 y PT2102 muestran tendencias inversas (Figura 5.56A). Sin embargo, tendencias lineales confiables solo se presentan en la Unidad Rosada en los afloramientos PT2101 y PT2102 (Figura 5.56B). Para los valores de grado de imbricación, solo la Unidad Rosada en el afloramiento PT2101 presenta una tendencia lineal confiable (Figura 5.56D).

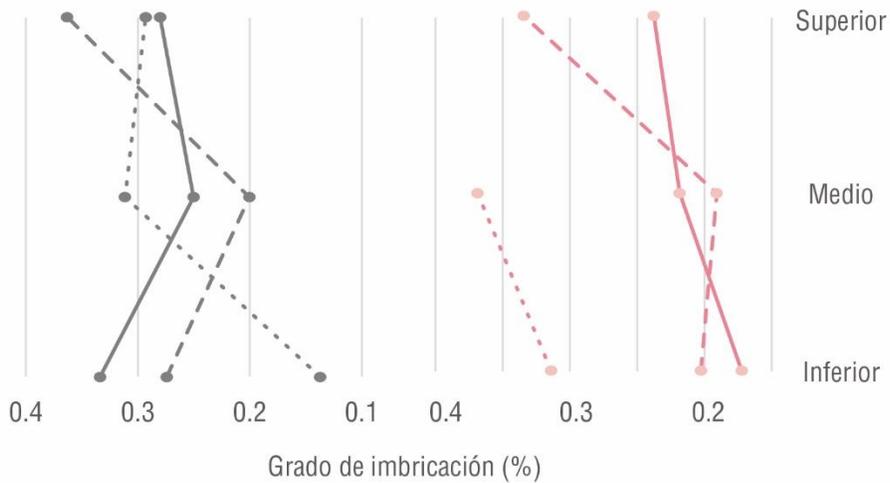
Por tanto, la Unidad Gris en todos los afloramientos y la Unidad Rosada en el sitio PT2107 no presentan un patrón específico, por lo que se puede interpretar la presencia de varias unidades de flujo (cada una con su zona de cizalla bien desarrollada) ligadas a un mecanismo de deposición agregacional. Para los materiales piroclásticos de la Unidad Rosada en el afloramiento PT2101 el grado de iso – orientación muestra una tendencia negativa, es decir disminuye de base a techo, y el grado de orientación de la imbricación indica una tendencia positiva. Esto permite corroborar la hipótesis de LaBerge et al. (2009). En el caso de los productos piroclásticos de la Unidad Rosada en el sitio PT2102 la tendencia de datos del grado de orientación preferencial de las partículas es positiva, es decir aumenta de base a techo, y esto es indicativo de la presencia de un mecanismo agregacional o varias unidades de flujo similar a la mayoría de los depósitos.



A.



Distancia respecto al centro eruptivo	Más cerca	-	Más lejos
Depósito	PT2101	PT2107	PT2102
R ² Depósito Gris	0.4392	0.752	0.6251
B. R ² Depósito Rosado	0.9995	0.6487	0.9812



C.



Distancia respecto al centro eruptivo	Más cerca	-	Más lejos
Depósito	PT2101	PT2107	PT2102
R ² Depósito Gris	0.4015	0.2973	0.6621
D. R ² Depósito Rosado	0.9464	0.6834	-

Figura 5.56. Porcentajes de orientación de partículas para orientación preferencial de las partículas e imbricación en secciones verticales. A. Grado de orientación de las partículas de las Unidades Gris y Rosado. B. R² de ajustes lineales aplicados. C. Grado de imbricación de las Unidades Gris y Rosado. D. R² de ajustes lineales aplicados.

Figure 5.56. Iso-orientation and imbrication of vertical sections. A. Iso-orientation of Gris and Rosada Units. B. Lineal adjustments applied. C. Imbrication grade of Gris and Rosada Units. D. Lineal adjustments applied.

5.6.2.3 Variación de la imbricación

La Figura 5.57 muestra la tendencia de los ángulos de imbricación de las partículas en las muestras analizadas. Todas las muestras presentan una tendencia donde los ángulos de imbricación aumentan de base a techo a excepción de la Unidad Gris en los afloramientos PT2101 y PT2107. Por tanto, se considera que los ángulos de imbricación son un indicador directo de las irregularidades presentes en el sustrato. Donde, la Unidad Gris al ser más antigua rellenó un sustrato irregular producto de procesos de erosión típicos en zonas volcánicas. Mientras, que la Unidad Rosada, al ser más reciente, se emplazó sobre un sustrato más uniforme.

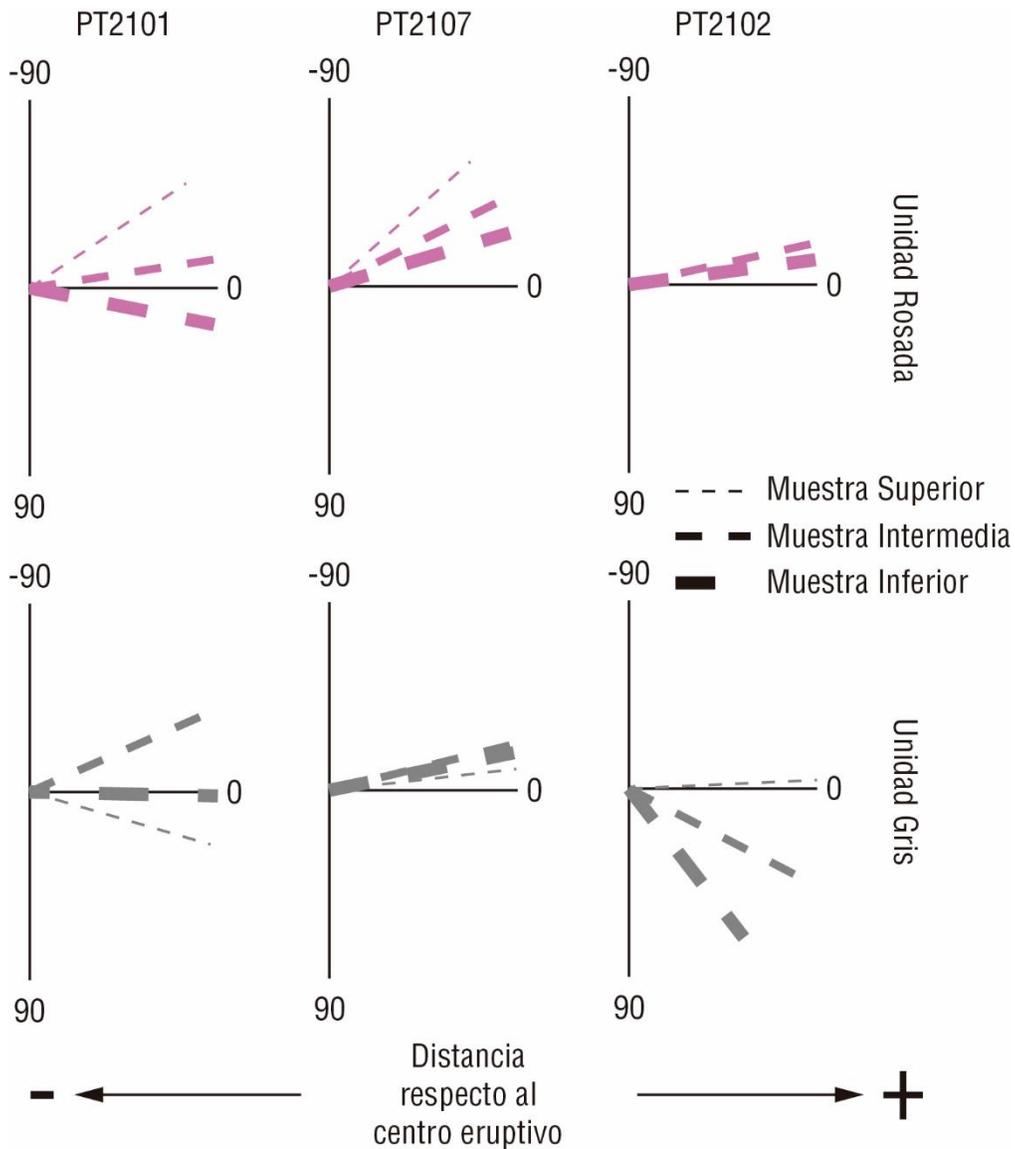


Figura 5.57. Variaciones de ángulo de imbricación en la vertical de las Unidades estudiadas.
Figure 5.57. Imbrication angle variations.

Otro comportamiento que reflejan las variaciones de imbricación de las unidades estudiadas es la deposición en rampas. Este patrón de deposición ya ha sido visualizado en modelos analógicos realizados en la canaleta experimental del Laboratorio de Análisis de Imágenes y Modelado Analógico (LAIMA). Además, fue documentado por Burchette y Wright (1992) en rampas carbonatadas las cuales se apilan y varían lateralmente. Sin embargo, esta es la primera investigación en la que se demuestra la existencia de deposición en rampas en depósitos piroclásticos asociados a corrientes piroclásticas de densidad desde el punto de vista textural cuantitativo.

5.7 Fábrica de forma vs. granulometría extendida vs. morfología de las partículas

En épocas recientes se han realizado investigaciones que contemplan la posible relación entre diferentes parámetros texturales, como granulometría y forma, y la cinemática de los flujos granulares. Algunas de estos trabajos se detallan en la Tabla 5.25.

En este apartado se consideraron los tres parámetros estudiados (granulometría, forma o morfología y fábrica de forma de las partículas) con el fin de conocer si tienen una relación entre sí desde el punto de vista de secciones horizontales y verticales.

*Tabla 5.25. Recopilación de trabajos que emplean dos o más parámetros texturales del ATC.
Table 5.25. Investigations with two or more textural parameters studied.*

Autor	Parámetros texturales combinados e interpretaciones
Sarocchi et al., (2011)	Complementaron estudios de morfología y granulometría para entender el comportamiento sedimentológico de corrientes piroclásticas.
Caballero et al., (2012; 2014)	A partir de modelos experimentales demostraron una relación entre parámetros texturales como granulometría y morfología con la reología de lahares.
Kurokawa et al., (2018)	Relacionan los parámetros de granulometría y morfología de las partículas a comportamientos reológicos de flujos granulares.
Hornby et al., (2020)	Según modelos experimentales demostraron que el aumento en la cantidad de partículas finas está ligado al redondeamiento de partículas para depósitos de corrientes piroclásticas de densidad.
Hernández-Rivas et al., (2021)	Encontraron que la fracción de gravas presenta mejores grados de orientación preferencial de las partículas, respecto al tamaño arena.
Rodríguez-Sedano et al., (2022)	Hallaron una relación entre la morfología y la granulometría de depósitos laháricos con la morfometría del medio en el que se depositaron.
Presente investigación	Se reconoció una correlación entre fábrica de forma, granulometría y morfología de las partículas, en CPDs de volumen bajo, y como estas responden a cambios morfométricos del medio en el que se depositan.

5.7.1 Secciones verticales

Se integraron perfiles verticales de dirección preferencial, grado de orientación preferencial, grado de imbricación, clasificación, percentil 5 (P5), percentil 95 (P95) y análisis morfológicos de las

partículas para cada unidad y en cada uno de los afloramientos visitados (figuras 5.58, 5.59 y 5.60). Cada resultado se discute e interpreta por afloramiento y unidad.

5.7.1.1 Afloramiento PT2101

Los parámetros texturales de la Unidad Gris permiten identificar la zona de cambio de régimen cinemático en la zona intermedia, donde presentan quiebres de tendencias a excepción del P95 que muestra una gradación normal (Figura 5.58). Además, cabe aclarar que esta Unidad evidencia un régimen cinemático variable entre colisional y friccional de base a techo. La explicación de este cambio se detalló en el apartado de variaciones morfológicas de las partículas.

La Unidad Rosada muestra evidencias de un cambio de régimen cinemático en la sección media del depósito. Este cambio también se ve reflejado en la variable de fábrica de forma. Sin embargo, en los resultados de granulometría óptica no se identifica claramente, ya que las variaciones del P5, P95 y clasificación corresponden a una gradación normal.

5.7.1.2 Afloramiento PT2107

En este afloramiento ambas unidades tienen un comportamiento similar, donde la frontera de regímenes cinemáticos reconocida en el análisis morfológico se repite en los parámetros de fábrica de forma y granulometría óptica en la sección media de los depósitos (Figura 5.59). La única excepción a este comportamiento es el P95 de la Unidad Rosada, que presenta una concavidad leve. Sin embargo, el mejor ajuste de los datos fue conseguido mediante una curva polinómica de grado 2, que es implementada para describir parábolas, y la línea de cambio de régimen fue trazada en el punto de máxima concavidad.

5.7.1.3 Afloramiento PT2102

Para el caso del afloramiento PT2102 ambas unidades tienen tendencias similares donde en la parte media de los sitios de muestreo se reconoce el cambio de régimen cinemático. A excepción del P95 de la Unidad Rosada que muestra un patrón de gradación normal con un aumento en el tamaño de los clastos finos hacia la base del material analizado (Figura 5.60).

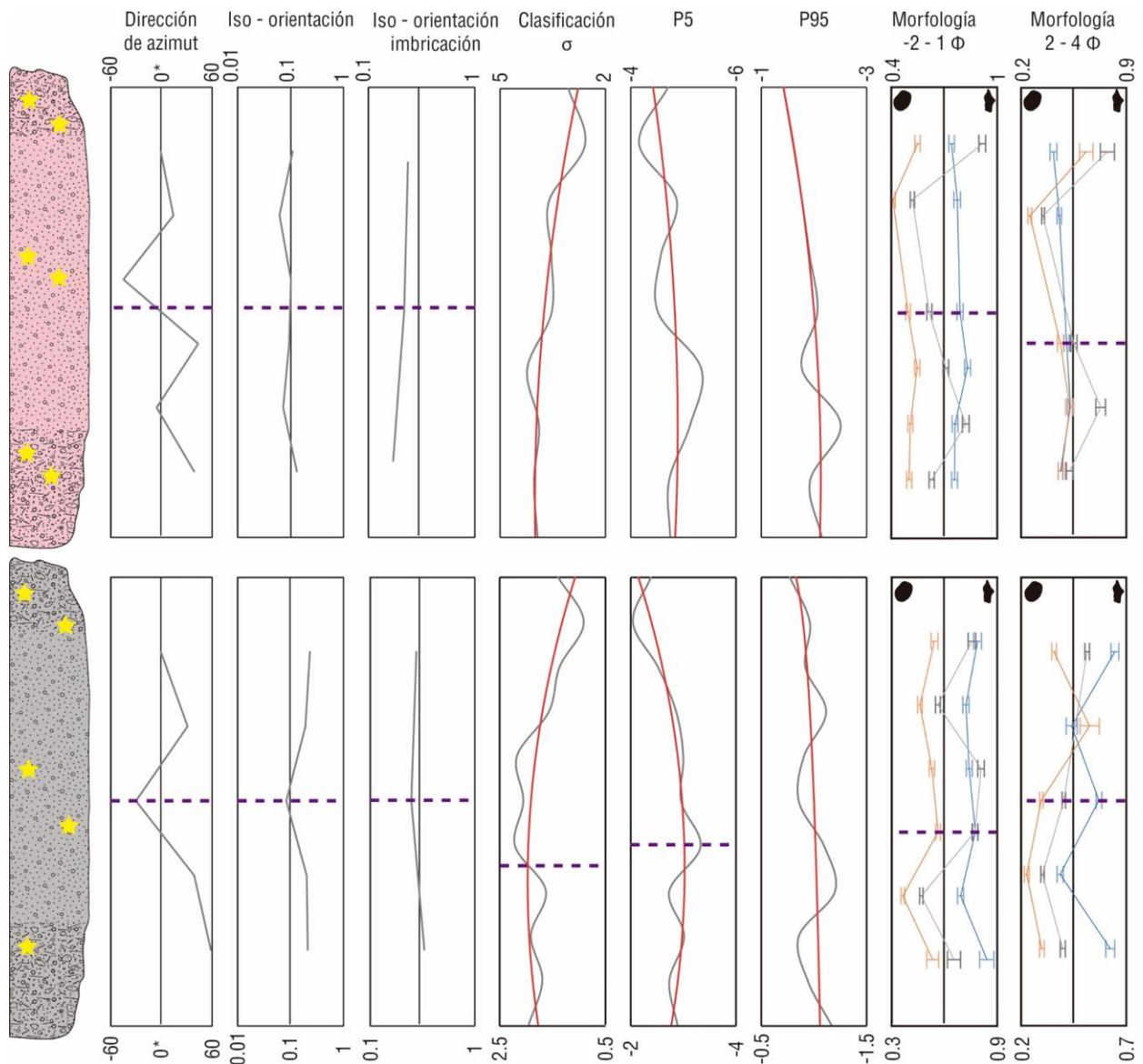


Figura 5.58. Secciones verticales para el afloramiento PT2101. Línea roja: ajuste parabólico. Línea punteada morada: límite que indica el cambio de régimen cinemático.

Figure 5.58. Vertical sections for PT2101 outcrop. Red line: parabolic adjustment. Purple dotted lines: change of cinematic region.

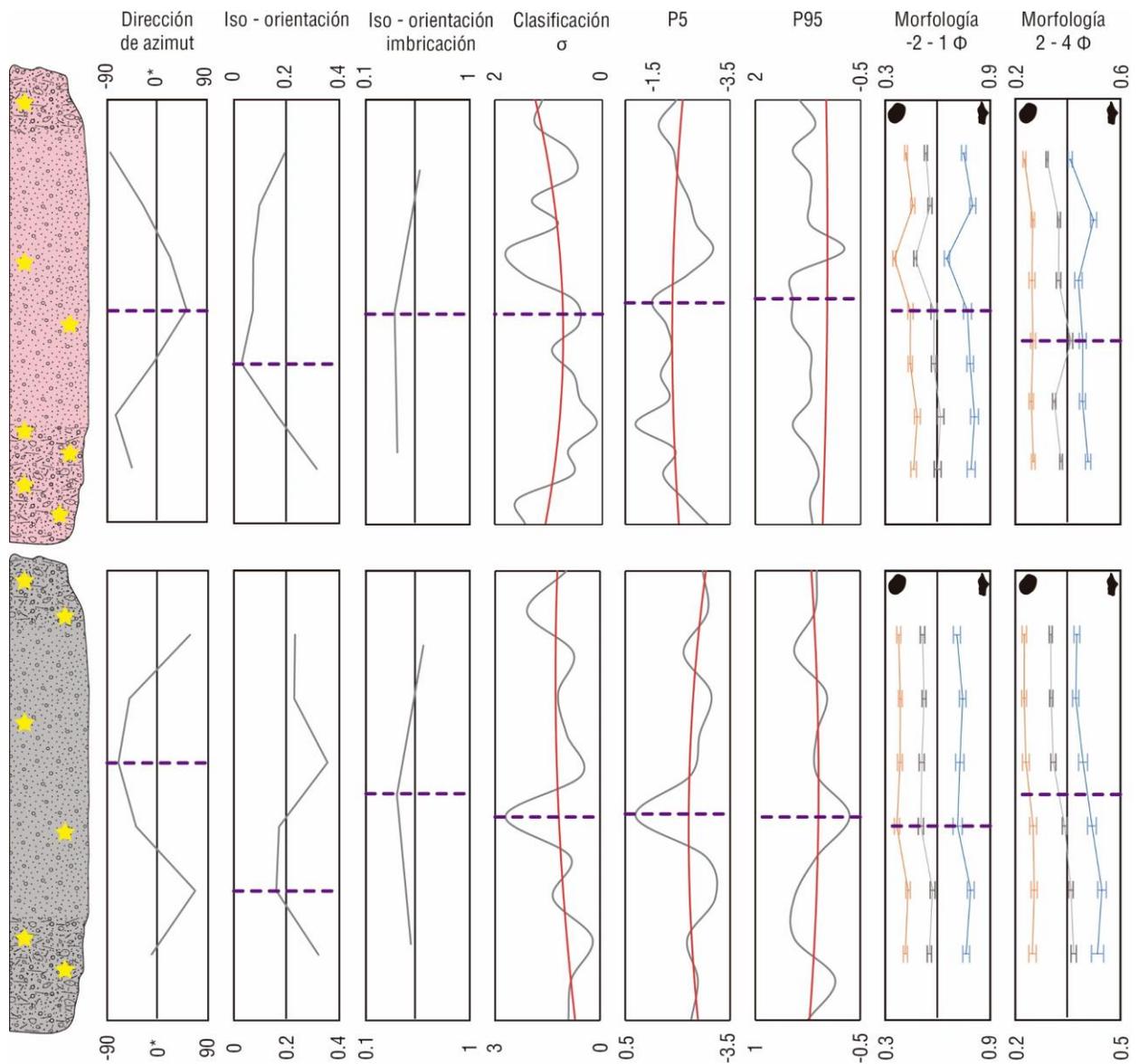


Figura 5.59. Secciones verticales para el afloramiento PT2107. Línea roja: ajuste parabólico. Línea punteada morada: límite que indica el cambio de régimen cinemático.

Figure 5.59. Vertical sections for PT2107 outcrop. Red line: parabolic adjustment. Purple dotted lines: change of cinematic region.

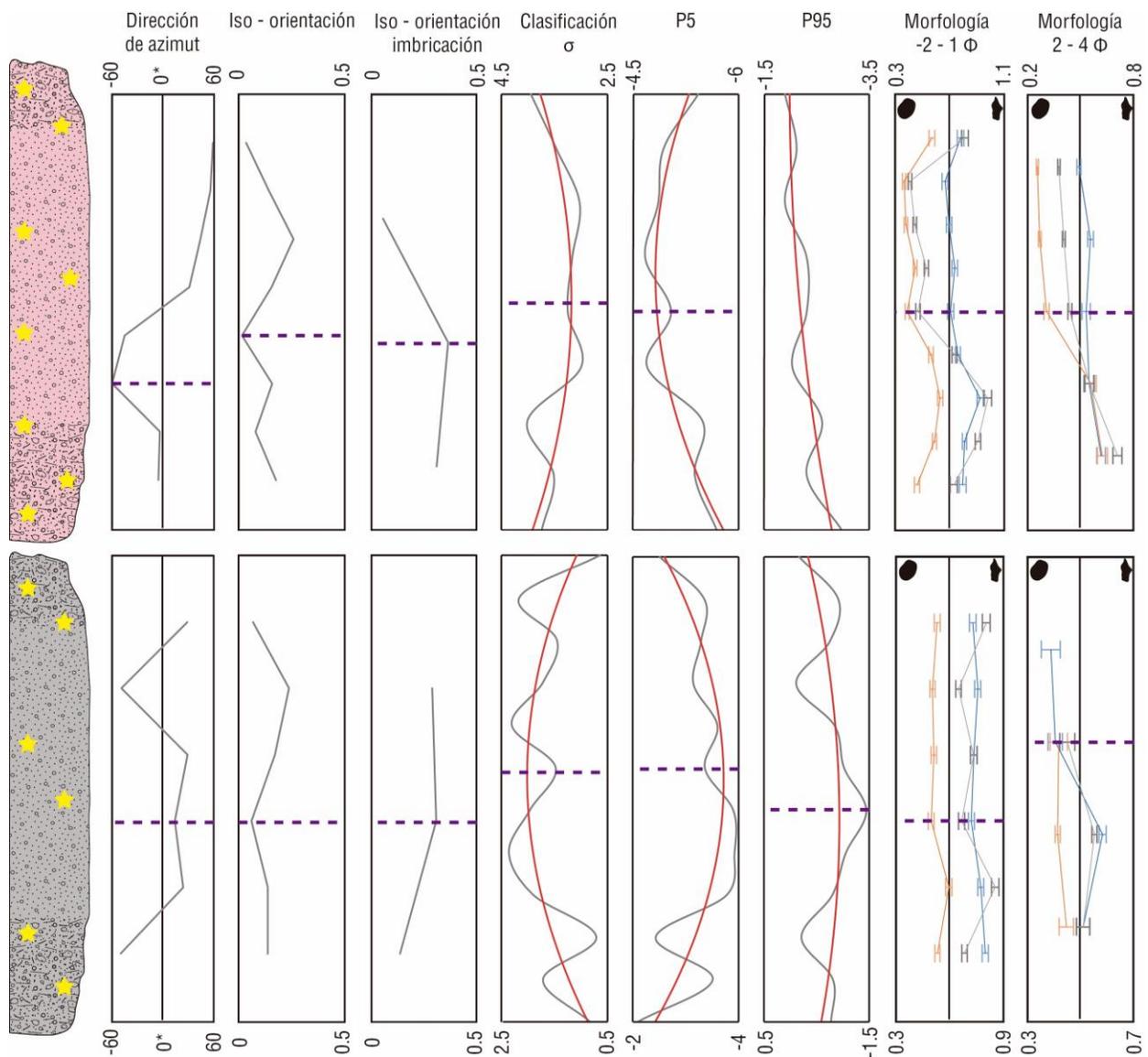


Figura 5.60. Secciones verticales para el afloramiento PT2102. Línea roja: ajuste parabólico. Línea punteada morada: límite que indica el cambio de régimen cinemático.

Figure 5.60. Vertical sections for PT2102 outcrop. Red line: parabolic adjustment. Purple dotted lines: change of cinematic region.

5.7.2 Secciones horizontales

Las gráficas de la Figura 5.61 presentan anomalías negativas y positivas en una distancia un poco mayor a los 3 km respecto al primer punto de muestreo. Estas anomalías se ubican en el afloramiento PT2107 y permiten identificar que las variables presentes en las gráficas tuvieron un comportamiento que estuvo más ligado a los procesos de deposición que a las interacciones granulares, debido a que las tendencias en los gráficos de la Figura 5.61 no son lineales y a que en la naturaleza hay un espectro amplio de variables que son imposibles de cuantificar y observar.

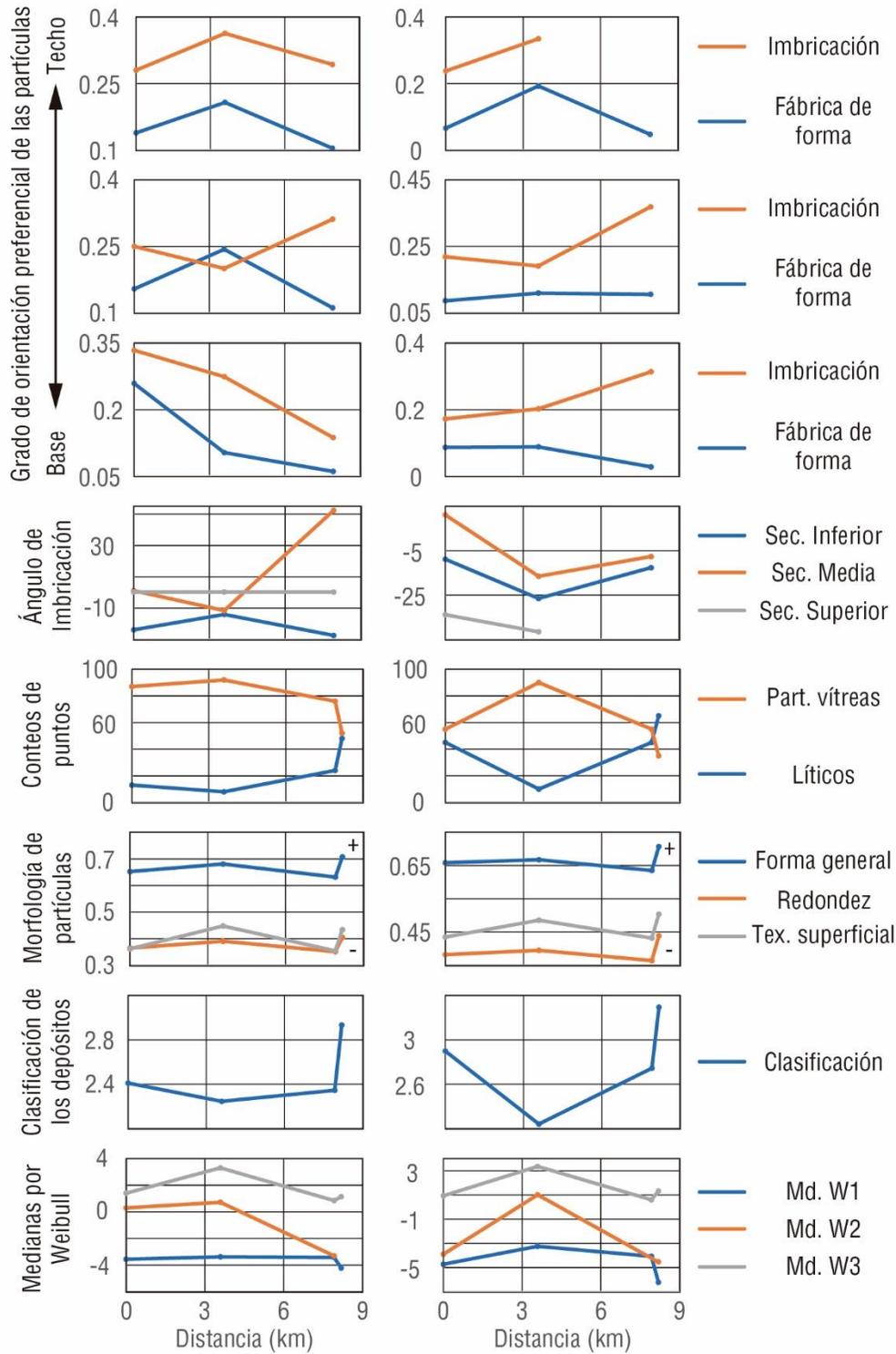


Figura 5.61. Comparación de parámetros texturales respecto a la distancia. A. Unidad Gris. B. Unidad Rosada. Part.: Partículas. Tex.: Textura. Md. W1.: Mediana de distribución tipo Weibull para partículas gruesas. Md. W2.: Mediana de distribución tipo Weibull para partículas intermedias. Md. W3.: Mediana de distribución tipo Weibull para partículas finas. +.: Morfologías más irregulares. -: Morfologías más regulares.

Figure 5.61. Textural parameter respect to distance. A. Gris Unit. B. Rosada Unit. Part.: Particles. Tex.: Texture. Md. W1.: Median distribution for biggest particles. Md. W2.: Median distribution for intermediate size particles. Md. W3.: Median distribution for tiniest particles. +.: Irregular morphology. -: Regular morphology.

Las anomalías visualizadas en las secciones verticales y horizontales permiten identificar que los elementos texturales analizados (granulometría, morfología y fábrica de forma) son sensibles a condiciones reológicas y sedimentológicas provocadas por el relieve.

5.8 Discusión general

A pesar de que las unidades Gris y Rosada tienen patrones de deposición similares se reconocieron algunas diferencias en los ámbitos de granulometría, morfología y fábrica de forma. Estas diferencias se analizan a continuación.

Los ensayos de tamizados y, por tanto, la granulometría extendida muestra de manera general una bimodalidad en los intervalos granulométricos -3 y 2ϕ a excepción de la Unidad Gris en el afloramiento PT2107, donde la bimodalidad se encuentra en los rangos -3 y 1ϕ . Esta variación puede ser debida a una combinación de la ubicación del sitio de muestreo y la irregularidad del sustrato. El sitio de muestreo condiciona la granulometría debido a que el sitio PT2107 se encuentra cercano a una facies lateral por lo que, la deposición de partículas finas es más difícil. Por otra parte, la Unidad Rosada no evidencia este comportamiento ya que, el emplazamiento de la Unidad Gris generó un paleo-relieve más uniforme, lo cual pudo permitir la deposición de partículas finas en facies laterales en la Unidad Rosada.

Los perfiles verticales morfológicos revelan una diferencia entre las unidades Gris y Rosada en el afloramiento PT2101. Donde la Unidad Gris muestra una base con partículas más regulares que el techo producto de un accidente topográfico. Mientras, la Unidad Rosada evidencia un patrón inverso a la Unidad Gris. Este patrón inverso es producto del efecto de relleno topográfico que provocó el emplazamiento de la Unidad Gris.

Por otra parte, los perfiles verticales morfológicos de la Unidad Rosada en el afloramiento PT2101, los rangos armónicos 7-15 y 16-50 presentan un patrón diferente al rango 3-6. Esta variación se asocia a que las unidades de flujo depositadas en la parte superior de la Unidad Rosada corresponden a la cola de la CPD o a unidades de flujo con baja energía, lo cual provocó cambios en la morfología de las partículas solo a nivel de textural superficial y redondez.

Por último, la orientación preferencial de las partículas de las unidades Gris y Rosada son diferentes en el sitio PT2102. En este sitio, las partículas de la Unidad Gris presentan una dirección paralela a la barranca, mientras las partículas de la Unidad Rosada tienen una dirección perpendicular a la barranca. En el caso de la Unidad Gris este patrón nos indica la dirección de flujo. Pero, en la Unidad Rosada esta dirección puede ser correlacionada a la presencia de una facies distal (donde por la poca energía del

sistema ahora las partículas ruedan con su eje mayor perpendicular a la dirección de flujo) o una barrera topográfica que generó la deposición en rampas (donde la Unidad Rosada presenta las rampas de mayor ángulo y por tanto su dirección de depositación).

5.9 Interpretación final

Los depósitos piroclásticos revelan en ambas corrientes piroclásticas de densidad tres comportamientos bien diferenciados que dependen de la morfometría de la barranca y de su distancia al sitio fuente: (1) el relleno de un paleo cauce, (2) el emplazamiento en un medio confinado, y (3) la desviación de la corriente piroclástica por una barrera topográfica. Estos comportamientos son reflejados en los análisis de fábrica de forma, morfología y granulometría y se detallan a continuación.

5.9.1 Relleno de un paleo – cauce

El relleno de un paleo cauce se refleja en el afloramiento PT2101 y la consecuencia principal de este factor es la dispersión de energía. Este sitio se encuentra sobre un arroyo sin nombre que corre de manera pseudo perpendicular a la dirección preferencial de las partículas de la Unidad Gris y es paralelo a la dirección de las partículas de la Unidad Rosada, lo cual es concordante con el orden de deposición de las corrientes piroclásticas.

La fábrica de forma y la imbricación evidencian un relleno de un paleo cauce a partir de bajos grados de orientación preferencial de las partículas respecto al afloramiento PT2107 y que la fracción granulométrica que mejor representa la dirección de las partículas sea la $-2 - 1 \phi$. Además, la imbricación revela ángulos primeramente positivos, concordantes con la pendiente, que después se tornan negativos por efectos de relleno (Figuras 4.49 y 5.57).

Los análisis morfológicos detallan partículas más redondeadas respecto al afloramiento PT2107 (el afloramiento a mitad de la barranca), ya que en una zona de relleno aumentará la turbulencia de la corriente piroclástica de densidad, debido a que se desarrolla de una mejor manera un régimen cinemático de tipo saltacional. Sin embargo, esta turbulencia no sigue un patrón específico. Por tanto, que la fracción analizada no tenga una orientación preferencial, pero si un redondeamiento de las partículas. Además, los conteos de puntos revelan una mayor cantidad de líticos respecto al afloramiento PT2107.

Por último, desde el punto de vista granulométrico el relleno de un paleo cauce se refleja en la presencia de depósitos más pobremente clasificados y de las medianas de partículas gruesas, medias y finas de mayor tamaño respecto al afloramiento PT2107.

5.9.2 Emplazamiento en un medio confinado

Un medio confinado lo representa el afloramiento PT2107, donde la barranca se encuentra bien desarrollada y por tanto no permite un mismo nivel de dispersión de energía como un cambio topográfico abrupto en el sitio PT2101. La fábrica de forma e imbricación reflejan un medio confinado por presentar variaciones en la dirección preferencial de las partículas de hasta 180° (que también está condicionada por ser una facies lateral), los mejores valores de orientación preferencial en las partículas analizadas y la interacción entre partículas en el espectro $-4 - 4 \phi$. Esto a su vez permite interpretar una mayor interacción entre partículas que si influencia su orientación preferencial en todo su espectro granulométrico. Los ángulos de imbricación también permiten identificar un paleo relieve confinado donde la Unidad Gris presenta valores altos respecto a los afloramientos PT2101 y PT2102, lo cual refleja una corriente piroclástica de densidad que rellena el fondo del cauce del arroyo. Mientras, la Unidad Rosada tiene valores más pequeños en comparación con los afloramientos PT2101 y PT2102 evidenciando un paleo aspecto dentro de la barranca con menos accidentes topográficos.

La morfología demuestra el emplazamiento de una corriente piroclástica de densidad en un medio confinado a partir de análisis de componentes y coeficientes morfológicos. Ya que, estos presentan mayores valores respecto a los sitios PT2101 y PT2102, debido a una baja capacidad de erosión, por una mayor interacción entre partículas en todo el espectro granulométrico y estar más cercanas a ser una facies lateral.

La granulometría evidencia un medio de deposición confinado a partir de que los materiales piroclásticos analizados presentan los mejores valores de clasificación y las medianas partículas de gruesas, medias y finas son de menor tamaño respecto al afloramiento PT2101 y PT2102.

5.9.3 Desvío de las corrientes piroclásticas de densidad por una barrera topográfica

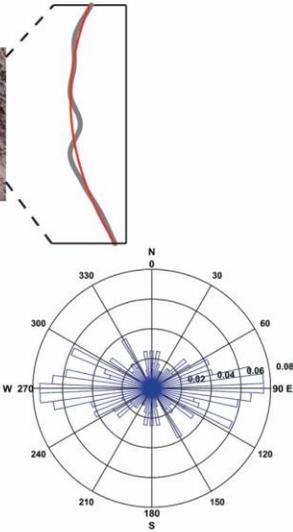
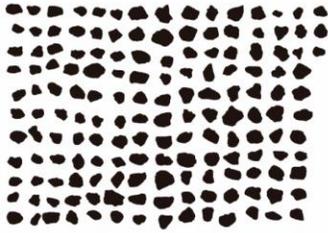
Una barrera topográfica en conjunto con el aumento en la distancia del centro eruptivo actúan como disipador de energía cinética. La barrera topográfica natural la representa la deformación del terreno asociada a una falla (Sosa-Ceballos et al., 2015). Esta expresión morfológica provocó el desvío en los cauces de varios ríos sin nombre en las cercanías del pueblo de Santiago Xalitzintla. Este efecto se visualiza en la dirección preferencial de las partículas de la Unidad Rosada, las cuales se orientan N-S. Por otra parte, las partículas de la Unidad Gris tienden a orientarse de manera perpendicular a la barrera topográfica.

La fábrica de forma y la imbricación muestran una pérdida en la temperatura granular gradual y una pérdida abrupta de velocidad, debido a que presentan los valores más bajos de grados de orientación

preferencial de las partículas de todas las muestras analizadas y que la fracción $-2 - 1 \phi$ es el mejor indicador de la dirección de las partículas. La imbricación también revela una baja en la interacción entre partículas, ya que los ángulos se vuelven más pequeños entre la base y el techo de las unidades.

Asimismo, la morfología refleja partículas más regulares en comparación con el afloramiento PT2107. Esto debido a que, se presenta un comportamiento similar al relleno de un paleo – cauce, donde el accidente topográfico produce una mayor interacción entre partículas, pero no una orientación preferencial de las mismas. Otro parámetro a considerar es la disminución de la cantidad de clastos vítreos, mas esto Caballero (2012) y Caballero et al. (2012) lo explican mediante procesos fragmentación típicos de flujos granulares.

Los análisis granulométricos evidencian la presencia de un cambio en la dinámica de la corriente piroclástica de densidad a partir de una mala clasificación y medianas de las partículas gruesas, medias y finas de mayor tamaño respecto al afloramiento PT2107.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis textural cuantitativo a partir de los parámetros de granulometría, morfología y fábrica de forma de las partículas permitió conocer la evolución de las corrientes piroclásticas de densidad, donde estas rellenaron un paleo – cauce, se confinaron y finalmente fueron sometidas a un cambio abrupto de dirección. Por tanto, los tres parámetros estudiados pueden ser calificados como complementarios y son sensibles a condiciones reológicas y sedimentológicas provocadas por la morfometría del relieve. De ahí, que los tres parámetros texturales permitan hacer inferencias acerca de mecanismos de transporte y deposición de este tipo de corrientes piroclásticas de densidad.

El presente estudio demuestra la eficacia del Análisis Textural Cuantitativo en depósitos asociados CPD de volumen pequeño.

Las unidades fueron estudiadas en cuatro afloramientos a distancias diferentes del centro eruptivo, pero dentro de una misma paleo barranca. La correlación de las unidades se logró a partir de macro petrografía, análisis de componentes y características texturales, a pesar de presentar diferentes facies.

Las unidades Gris y Rosada pese a presentar variaciones composicionales, muestran patrones sedimentológicos similares, que se relacionan directamente al régimen reológico dominante, la morfometría de la barranca y la distancia entre los puntos analizados.

La presente investigación comprobó que flujos granulares de pequeño y alto volumen presentan similitudes en condiciones, regímenes y mecanismos sedimentológicos que los afectan en su proceso de emplazamiento. Algunas evidencias de estas similitudes son:

1. Los depósitos presentan granulometrías más gruesas conforme aumenta la distancia, debido a la falta de energía para que la fracción más fina siga interaccionando en el flujo granular. Sumado a esto se produce un trabajo mecánico a la base del flujo que aumenta el *momentum* de las partículas más grandes y les permite tener un transporte mayor.
2. El mecanismo de depositación es híbrido producto de una combinación de un mecanismo de agregación progresiva y la sucesión de diferentes pulsos (*stepwise aggradation*).
3. La distribución bimodal de los depósitos está principalmente formada por procesos de conminución de las partículas de tamaño intermedio.
4. La morfología de las partículas depende de la granulometría, donde la fracción intermedia es más angulosa que fracción más fina.

5. La morfología permitió inferir, de manera general, un régimen cinemático de tipo friccional hacia la base de los depósitos y un régimen cinemático colisional hacia el techo.
6. Longitudinalmente, la morfología es variable producto de la posición de muestreos dentro de la barranca.
7. La fábrica de forma está directamente relacionada a las fuerzas de cizalla generadas en el flujo y la distribución de esfuerzos en tres dimensiones. Esto se evidencia directamente con la iso-orientación donde a mayor iso-orientación, mayor cizalla y por tanto mayor velocidad de flujo, mientras que a menor iso-orientación, menor cizalla y menor velocidad como en los afloramientos más distales.
8. Se detectaron fluctuaciones en la dirección de las corrientes de flujo debido a una deposición fluctuante alrededor de una dirección promedio, similar a lo reportado para CPD de volumen grande. Sin embargo, estas fluctuaciones son condicionadas por la posición del muestreo respecto al centro de la barranca.

Los resultados obtenidos son de importancia para el modelamiento numérico de las CPD concentradas de la Secuencia Pómez Ocre y, de ahí su uso para la predicción y mitigación del riesgo asociado.

Se recomienda el realizar ensayos granulométricos previo a los otros parámetros (morfología y fábrica de forma) para tener análisis de mayor precisión.

La integración de diversas metodologías puede generar errores sistemáticos, por tanto, se debe valorar el emplear una sola metodología que integre el intervalo granulométrico más representativo de los depósitos a estudiar.

A futuro debe analizarse mediante modelos analógicos como las variaciones en el relieve pueden alterar la cinemática de los flujos granulares.



http://www.unet.edu.ve/images/stories/Base_D_Biblio_00.jpg

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrò, A., Zanella, E., Le Pennec, J.L., & Temel, A. (2015). Magnetic fabric of ignimbrites: a case study from the Central Anatolian Volcanic Province. *Geological Society, London, Special Publications*, 396(1), 159-175.
- Aguilera, J.G., & Ordóñez, E., (1895). Expedición científica al Popocatepetl: México (Informe interno). Oficina de la Secretaría de Fomento: Comisión Geológica Mexicana, México.
- Allen, T., (1997). *Particle Size Measurement*, Vol 1. Chapman & Hall, London.
- Alvarado, G. E., & Soto, G. J. (2002). Pyroclastic flow generated by crater-wall collapse and outpouring of the lava pool of Arenal Volcano, Costa Rica. *Bulletin of volcanology*, 63(8), 557-568.
- Arana-Salinas, L., Siebe, C., & Macías, J.L. (2010). Dynamics of the ca. 4965 yr. 14C BP "Ochre Pumice" Plinian eruption of Popocatepetl volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 192(3-4), 212-231.
- Arana-Salinas (2011). *Estratigrafía, composición y dinámica de la erupción del Volcán Popocatepetl que hace 4,965 ± 65 años ¹⁴C AP produjo el depósito "Pómez Ocre"* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Arsham, H. (1988). Kuiper's P-value as a measuring tool and decision procedure for the goodness-of-fit test. *Journal of Applied Statistics*, 15(2), 131-135.
- Baas, J. H., Hailwood, E. A., McCaffrey, W. D., Kay, M., & Jones, R. (2007). Directional petrological characterisation of deep-marine sandstones using grain fabric and permeability anisotropy: methodologies, theory, application and suggestions for integration. *Earth-Science Reviews*, 82(1-2), 101-142.
- Baer, E.M., Fisher, R.V., Fuller, M., & Valentine, G. (1997). Turbulent transport and deposition of the Ito pyroclastic flow: determinations using anisotropy of magnetic susceptibility. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B10), 22565-22586.
- Barrett, P.J., (1980). The shape of rock particles, a critical review. *Sedimentology* 27(3), 291-303.
- Boggs., S., (2006). Principles of sedimentology and Stratigraphy. *Pearson: Prentice Hall*. London.
- Bonasia, R., Scaini, C., Capra, L., Nathenson, M., Siebe, C., Arana-Salinas, L., & Folch, A. (2014). Long-range hazard assessment of volcanic ash dispersal for a Plinian eruptive scenario at Popocatepetl volcano (Mexico): implications for civil aviation safety. *Bulletin of Volcanology*, 76(1), 1-16.
- Branney, M.J. & Kokelaar, P., (1992). A reappraisal of ignimbrite emplacement: progressive aggradation and changes from particulate to non-particulate flow during emplacement of high-grade ignimbrite. *Bulletin of Volcanology*, 54, 504-520.
- Branney, M.J., & Kokelaar, B.P. (2002). Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. *Geological Society of London*.
- Brown, R.J., & Andrews, G.D. (2015). Deposits of pyroclastic density currents. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 631-648). Academic Press.
- Burchette, T.P., & Wright, V.P. (1992). Carbonate ramp depositional systems. *Sedimentary geology*, 79(1-4), 3-57.
- Burdette, W.J., & Gehan, E.A. (1970). *Planning and Analysis of Clinical Studies*. Springfield.

- Caballero, L., & Capra, L. (2011). Textural analysis of particles from El Zaguán debris avalanche deposit, Nevado de Toluca volcano, Mexico: evidence of flow behavior during emplacement. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 200(1-2), 75-82.
- Caballero, L., (2012). *Dinámica de flujos de escombros: Nuevas evidencias a partir de datos experimentales* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro.
- Caballero, L., Sarocchi, D., Borselli, L., & Cárdenas, A.I. (2012). Particle interaction inside debris flows: Evidence through experimental data and quantitative clast shape analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 231, 12-23.
- Caballero, L., Sarocchi, D., Soto, E., Borselli, L., (2014). Rheological changes induced by clast fragmentation in debris flows. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 119 (9), 1800–1817. <https://doi.org/10.1002/2013JF002942> (ISO 690).
- Cagnoli, B., & Tarling, D. H. (1997). The reliability of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) data as flow direction indicators in friable base surge and ignimbrite deposits: Italian examples. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 75(3-4), 309-320.
- Cañón-Tapia, E., & Mendoza-Borunda, R. (2014). Magnetic petrofabric of igneous rocks: Lessons from pyroclastic density current deposits and obsidians. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289, 151-169.
- Capaccioni, B., & Sarocchi, D. (1996). Computer-assisted image analysis on clast shape fabric from the Orvieto-Bagnoregio ignimbrite (Vulsini District, central Italy): implications on the emplacement mechanisms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70(1-2), 75-90.
- Capaccioni, B., Valentini, L., Rocchi, M.B., Nappi, G., & Sarocchi, D. (1997). Image analysis and circular statistics for shape-fabric analysis: applications to lithified ignimbrites. *Bulletin of Volcanology*, 58(7), 501-514.
- Cas, R.A.F., & Wright, J.V. (1987). *Volcanic successions: Ancient and modern*. Allen and Unwin, London.
- Cerca, M.F., (2020). *Estudio del efecto del Contenido de arcillas en la orientación preferencial de los clastos en un flujo de escombros a escala reducida* (Tesis Licenciatura). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- Darías, J.R., (2014). Los materiales granulares: una mirada al interior del pimentero. *Acta Científica Venezolana*, 65(1), 62-72.
- De Hoff, R.T. and Rhines, F.N., (1968). *Quantitative Microscopy*. McGraw-Hill, New York.
- Dellino, P., & La Volpe, L. (1996). Image processing analysis in reconstructing fragmentation and transportation mechanisms of pyroclastic deposits. The case of Monte Pilato-Rocche Rosse eruptions, Lipari (Aeolian islands, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 71(1), 13-29.
- Davies, I.C., & Walker, R.G. (1974). Transport and deposition of resedimented conglomerates; the Cap Enrage Formation, Cambro-Ordovician, Gaspé, Quebec. *Journal of Sedimentary Research*, 44(4), 1200-1216.
- Drahn, J.A., Bridgewater, J., (1983). The mechanism of free surface segregation. *Powd. Technol.*, 36, 39–53.

- Drake, T.G. (1990). Structural features in granular flows. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B6), 8681-8696.
- DW, (s.f.). Violenta erupción del volcán Soufrière, en la isla caribeña San Vicente. *DW Made for minds*. <https://www.dw.com/>
- Fisher, R.V. (1961). Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 72(9), 1409-1414.
- Fisher, R. & Schmincke, H. (1984). *Pyroclastic rocks*. Springer-Verlag, Berlin 472 pp.
- Fisher, R.V., Orsi, G., Ort, M., & Heiken, G. (1993). Mobility of a large-volume pyroclastic flow—emplacement of the Campanian ignimbrite, Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 56(3), 205-220.
- Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., Zamorano-Orozco, J. J., & Villanueva-Díaz, J. (2017). Edad, dinámica geomorfológica y tipología de barrancas en el sector norte del volcán Popocatepetl, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(1), 1-19.
- Gueugneau, V., Kelfoun, K., Charbonnier, S., Germa, A. & Carazzo, G., (2020). Dynamics and impacts of the May 8th, 1902 Pyroclastic Current at Mount Pelée (Martinique): New Insights from numerical modeling. *Frontiers in Earth Science*, 8, 279.
- Hernández-Rivas, O., Caballero, L., Sarocchi, D., & Rodríguez-Sedano, L.A. (2021). From geomorphology to shape-fabric: The interplay of geomorphological controls and their spatial variability in the Teteltzingo lahar deposit, Citlaltépetl volcano (Mexico). *Journal of South American Earth Sciences*, 109, 103-221.
- Herrero-Bervera, E., Walker, G. P. L., Canon-Tapia, E., & Garcia, M. O., (2001). Magnetic fabric and inferred flow direction of dikes, conesheets and sill swarms, Isle of Skye, Scotland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106(3-4), 195-210.
- Hillhouse, J. W., & Wells, R. E. (1991). Magnetic fabric, flow directions, and source area of the lower Miocene Peach Springs Tuff in Arizona, California, and Nevada. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B7), 12443-12460.
- Hornby, A., Kueppers, U., Maurer, B., Poetsch, C., & Dingwell, D. (2020). Experimental constraints on volcanic ash generation and clast morphometrics in pyroclastic density currents and granular flows. *Volcanica*, 3(2), 263-283.
- Hughes, S. R., & Druitt, T. H. (1998). Particle fabric in a small, type-2 ignimbrite flow unit (Laacher See, Germany) and implications for emplacement dynamics. *Bulletin of Volcanology*, 60(2), 125-136.
- INEGI, (s.f.). Censo de Población y Vivienda 2020. *INEGI*. <https://www.inegi.org.mx/>
- Iverson, R.M., (1997). The physics of debris flows. *Rev. Geophys.*, 35, 254–296.
- Kadanoff, L. P. (1999). Built upon sand: Theoretical ideas inspired by granular flows. *Reviews of Modern Physics*, 71(1), 435 - 444.
- Kieffer, S. W. (1981). Fluid dynamics of the May 18 blast at Mount St. Helens. *US Geol. Surv. Prof. Pap*, 1250, 379-400.

- Krumbein, W.C., (1934). Size frequency distributions of sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 4: 65-67.
- Krumbein, W.C. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 11(2), 64-72.
- Kurokawa, A. K., Ishibashi, H., Miwa, T., & Nanayama, F. (2018). Rheological behavior of water-ash mixtures from Sakurajima and Ontake volcanoes: implications for lahar flow dynamics. *Bulletin of Volcanology*, 80(6), 1-12.
- LaBerge, R. D., Porreca, M., Mattei, M., Giordano, G., & Cas, R. A. (2009). Meandering flow of a pyroclastic density current documented by the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) in the quartz latite ignimbrite of the Pleistocene Monte Cimino volcanic centre (central Italy). *Tectonophysics*, 466(1-2), 64-78.
- Lacroix, A. (1905). Observations faites à la Montagne Pelée sur les conditions présidant à la production de la tridymite dans les roches volcaniques. *Bulletin de Minéralogie*, 28(2), 56-60.
- Lajoie, J., Boudon, G., & Bourdier, J.L. (1989). Depositional mechanics of the 1902 pyroclastic nuée ardente deposits of Mt. Pelée, Martinique. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 38(1-2), 131-142.
- Lewis, D.W. & McConchie, D., (1994). *Analytical Sedimentology*, Vol 1. Chapman & Hall, New York, 197 pp.
- Ludwick, J.C. & Henderson, P.L., (1968). Particle shape and inference of size from sieving. *Sedimentology*, 11: 197-235.
- Luhr, J. F., Carmichael, I. S., & Varekamp, J. C. (1984). The 1982 eruptions of El Chichón Volcano, Chiapas, México: mineralogy and petrology of the anhydrite-bearing pumices. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 23(1-2), 69-108.
- MacDonald, W.D., & Palmer, H.C. (1990). Flow directions in ash-flow tuffs: a comparison of geological and magnetic susceptibility measurements, Tshirege member (upper Bandelier Tuff), Valles caldera, New Mexico, USA. *Bulletin of volcanology*, 53(1), 45-59. Macías, J.L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 379-424.
- Macías, J.L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 379-424.
- Macorps, E., Charbonnier, S.J., Varley, N.R., Capra, L., Atlas, Z., & Cabré, J. (2018). Stratigraphy, sedimentology and inferred flow dynamics from the July 2015 block-and-ash flow deposits at Volcán de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 349, 99-116.
- Marshall, P. (1935). Acid rocks of the Taupo-Rotorua volcanic district. *Trans. Roy. Soc. NZ*, 64(Pt 3), 81-131.
- Mazzullo, J. I. M., Sims, D., & Cunningham, D. (1986). The effects of eolian sorting and abrasion upon the shapes of fine quartz sand grains. *Journal of Sedimentary Research*, 56(1), 45-56.
- Mazzullo, J. & Magenheimer, S., (1987). The original shapes of quartz sand grains. *Journal of Sedimentary Research*, 57(3), 479-487.

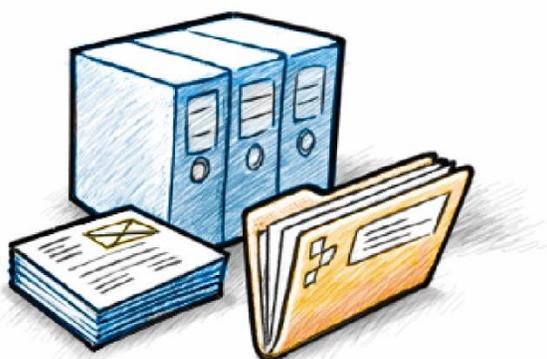
- Mazzullo, J., Leschak, P. & Prusak, D., (1988). Sources and distribution of late Quaternary silt in the surficial sediment of the northeastern continental shelf of the United States. *Marine Geology*, 78(3-4), 241-254.
- Melson, W.G., & Saenz, R. (1973). Volume, energy and cyclicity of eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica. *Bulletin Volcanologique*, 37(3), 416-437.
- Mitarai, N., & Nori, F. (2006). Wet granular materials. *Advances in Physics*, 55(1-2), 1-45.
- Mooser, F., (1967). Tefracronología de la Cuenca de México para los últimos 30 000 años. *Boletín del INAH*, 30, 12-15.
- Moreno-Chávez, G., Castillo-Rivera, F., Sarocchi, D., Borselli, L., & Rodríguez-Sedano, L.A. (2018). FabricS: A user-friendly, complete and robust software for particle shape-fabric analysis. *Computers & Geosciences*, 115, 20-30.
- Moreno-Chávez, G., Castillo-Rivera, F., Montenegro-Ríos, J. A., Borselli, L., Rodríguez-Sedano, L.A., & Sarocchi, D. (2020). Fourier Shape Analysis, FSA: Freeware for quantitative study of particle morphology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 404, 1-15.
- Mulchrone, K. F., & Meere, P. A., 2015. Shape fabric development in rigid clast populations under pure shear: The influence of no-slip versus slip boundary conditions. *Tectonophysics*, 659, 63-69.
- Németh, K., & Martin, U. (2007). *Practical volcanology*. Geological Institute of Hungary.
- Nixon, G.T., (1989). The Geology of Ixtaccíhuatl volcano and adjacent areas of the Sierra Nevada and Valley of México. *Geological Society of America Special Paper 219*, 1 - 58.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley & Sons.
- Ort, M.H., Rosi, M., & Anderson, C.D. (1999). Correlation of deposits and vent locations of the proximal Campanian Ignimbrite deposits, Campi Flegrei, Italy, based on natural remanent magnetization and anisotropy of magnetic susceptibility characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91(2-4), 167-178.
- Ort, M.H., Orsi, G., Pappalardo, L., & Fisher, R.V. (2003). Anisotropy of magnetic susceptibility studies of depositional processes in the Campanian Ignimbrite, Italy. *Bulletin of Volcanology*, 65(1), 55-72.
- Ort, M.H., Newkirk, T.T., Vilas, J.F., & Vázquez, J.A. (2015). Towards the definition of AMS facies in the deposits of pyroclastic density currents. *Geological Society, London, Special Publications*, 396(1), 205-226.
- Palladino, D.M. (2017). Simply pyroclastic currents. *Bulletin of Volcanology*, 79(7), 1-5.
- Panfil, M.S., Gardner, T.W., & Hirth, K.G. (1999). Late Holocene stratigraphy of the Tetimpa archaeological sites, northeast flank of Popocatepetl volcano, central Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 111(2), 204-218.
- Paquereau-Lebti, P., Fornari, M., Roperch, P., Thouret, J. C., & Macedo, O. (2008). Paleomagnetism, magnetic fabric, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Pliocene and Quaternary ignimbrites in the Arequipa area, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 70(8), 977-997.
- Pettijohn, F.J. (1975). *Sedimentary rocks* (Vol. 3). New York: Harper & Row.

- Porreca, M., Mattei, M., Giordano, G., De Rita, D., & Funiciello, R. (2003). Magnetic fabric and implications for pyroclastic flow and lahar emplacement, Albano maar, Italy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B5).
- Postma, G., (1986). Classification for sediment gravity flow deposits based on flow conditions during sedimentation. *Geology*, 14, 291–294.
- Reading, H. G., & Levell, B. K. (1996). Controls on the sedimentary rock record. *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy*, 3, 5-36.
- Roberge, J., Flores-Ríos, M.F., Jerram, D.A., Mercer, C.N. & Ángeles-De la Torre, C.A. (2018). Probing the Pink Pumice: petrological and textural insight into Popo's youngest Plinian eruption. *EGU General Assembly Conference*. EGU. Vienna, Austria. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA.2018820R/abstract>
- Robin, C. (1981). *Relations volcanologie-magmatologie-géodynamique* (Ph.D. Thesis). Université Clermont Ferrand, Clermont, France.
- Robin, C., (1984). Le volcan Popocatepetl (Mexique): structure, evolution petrologique et risques. *Bulletin of Volcanology*, 47, 1–23.
- Robin, C. & Boudal, C., (1987). A gigantic Bezumianny-type event at the beginning of modern volcan Popocatépetl. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31, 115-130.
- Rodríguez-Sedano, L. A., Sarocchi, D., Caballero, L., Borselli, L., Ortiz-Rodríguez, A. J., Cerca-Ruiz, M. F., ... & Ramos, O. F. (2022). Post-eruptive lahars related to the 1913 eruption in La Lumbre Ravine, Volcán de Colima, Mexico: The influence of ravine morphometry on flow dynamics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 421, 107423.
- Rose, W.I., Murrow, P., Bonadonna, C., Durant, A.J. & Ernst, G.J., (2008). Nature and significance of small volume fall deposits at composite volcanoes: Insights from the October 14, 1974 Fuego eruption, Guatemala. *Bulletin of Volcanology*, 70(9), 1043-1067.
- Rosiwal, A., (1898). Ueber geometrische Gesteinsanalysen usw. *Verhandl. K.k. Geol. Reich. Wien*, 5-6: 143.
- Ross, C. & Smith, R.L. (1961). *Ash-Flow Tuffs: Their Origin, Geologic Relations and Identification* (Vol. 366). Washington.
- Saltikov, S.A. (1958). Stereometric Metallography: Moscow. USSR, *Metallurgizdat*.
- Sarocchi, D. (1993). Studio delle Successioni Piroclastiche mediante L'Impiego di Sensori CCD e Tecniche di Elaborazione delle Immagini (Lic. Thesis). Università degli Studi di Firenze.
- Sarocchi, D., Borselli, L., & Macías, J.L. (2005). Construcción de perfiles granulométricos de depósitos piroclásticos por métodos ópticos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(3), 371-382.
- Sarocchi, D., (2006). *Análisis textural del depósito de flujo de bloques y ceniza del 17 de julio de 1999 en el volcán de Colima*. (Ph D Thesis). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sarocchi, D., Sulpizio, R., Macías, J.L., & Saucedo, R. (2011). The 17 July 1999 block-and-ash flow (BAF) at Colima Volcano: new insights on volcanic granular flows from textural analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 204(1-4), 40-56.

- Sato, H., Fujii, T., & Nakada, S. (1992). Crumbling of dacite dome lava and generation of pyroclastic flows at Unzen volcano. *Nature*, 360(6405), 664-666.
- Saucedo, R., Macías, J.L., Sarocchi, D., Bursik, M., & Rupp, B. (2008). The rain-triggered Atenquique volcanoclastic debris flow of October 16, 1955 at Nevado de Colima Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 173(1-2), 69-83.
- Savage, S.B., (1984). The mechanics of rapid granular flows. *Adv. Appl. Mech.*, 24, 289–366.
- Schaaf, P., Stimac, J.I.M., Siebe, C., & Macías, J.L. (2005). Geochemical evidence for mantle origin and crustal processes in volcanic rocks from Popocatepetl and surrounding monogenetic volcanoes, central Mexico. *Journal of Petrology*, 46(6), 1243-1282.
- Scheil, E. (1931). Die Berechnung der Anzahl und Grössenverteilung kugelförmiger Kristalle in undurchsichtigen Körpern mit Hilfe der durch einen ebenen Schnitt erhaltenen Schnittkreise. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 201(1), 259-264.
- Schmeeckle, M.W., Nelson, J.M., (2003). Direct numerical simulation of bedload transport using a local, dynamic boundary condition. *Sedimentology*, 50, 279–301.
- Scott, K.M., (1988). *Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River system* (No. 1447-A).
- Sestini, G. & Pranzini, G., (1965). Correlation of sedimentary fabric and sole marks as current indicators in turbidites. *Journal of Sedimentary Research*, 35(1), 100-108.
- Siebe, C., Abrams, M., Macías, J.L., & Obenholzner, J. (1996a). Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, central Mexico: Past key to the future? *Geology*, 24(5), 399-402.
- Siebe, C., Abrams, M., Macías, J.L., & Obenholzner, J. (1996b). La destrucción de Cacaxtla y Cholula: un suceso en la historia eruptiva del Popocatepetl. *Ciencias*, 41, 36-45.
- Siebe, C., Schaaf, P., & Urrutia-Fucugauchi, J. (1999). Mammoth bones embedded in a late Pleistocene lahar from Popocatepetl volcano, near Tocuila, central México. *Geological Society of America Bulletin*, 111(10), 1550-1562.
- Siebe, C., & Macías, J.L. (2006). Volcanic hazards in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatepetl, Nevado de Toluca, and Jocotitlán stratovolcanoes and monogenetic scoria cones in the Sierra Chichinautzin Volcanic Field. *Special Papers Geological Society of America*, 402, 1 - 253.
- Simón-Muzás, A., Casas-Sainz, A.M., Soto, R., Gisbert, J., Román-Berdiel, T., Oliva-Urcia, B., ... & Beamud, E. (2022). Axial longitudinal flow in volcanic materials of the Late Carboniferous-Permian Cadí basin (Southern Pyrenees) determined from anisotropy of magnetic susceptibility. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 421, 107443.
- Smith, R.L. (1960). Ash flows. *Geological Society of America Bulletin*, 71(6), 795-841.
- Smithsonian Institution, (2022a). St. Helens. *Smithsonian Institution. National Museum of Natural History. Global Volcanism Program*. <https://volcano.si.edu//>
- Smithsonian Institution, (2022b). Soufrière St. Vincent. *Smithsonian Institution. National Museum of Natural History. Global Volcanism Program*. <https://volcano.si.edu//>

- Smithsonian Institution, (2022c). El Chichón. *Smithsonian Institution. National Museum of Natural History. Global Volcanism Program*. <https://volcano.si.edu/>
- Smithsonian Institution, (2022d). Fuego. *Smithsonian Institution. National Museum of Natural History. Global Volcanism Program*. <https://volcano.si.edu/>
- Smithsonian Institution, (2022e). Arenal. *Smithsonian Institution. National Museum of Natural History. Global Volcanism Program*. <https://volcano.si.edu/>
- Smithsonian Institution, (2022f). Popocatepetl. *Smithsonian Institution. National Museum of Natural History. Global Volcanism Program*. <https://volcano.si.edu/>
- Sohn, Y.K., Chough, S.K., (1989). Depositional processes of the Suwolbong tuff ring, Cheju Island (Korea). *Sedimentology* 36, 837-855.
- Sohn, Y.K., Chough, S.K., (1993). The Udo tuff cone, Cheju Island, South Korea — transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain flow on a steep volcanic cone slope. *Sedimentology*, 40, 769–786.
- Sosa-Ceballos, G., Gardner, J.E., Siebe, C., & Macías, J.L. (2012). A caldera-forming eruption ~ 14,100 14C yr BP at Popocatepetl volcano, México: Insights from eruption dynamics and magma mixing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 213, 27-40.
- Sosa-Ceballos, G., Macías, J.L., García-Tenorio, F., Layer, P., Schaaf, P., Solís-Pichardo, G., & Arce, J.L. (2015). El Ventorrillo, a paleostructure of Popocatepetl volcano: insights from geochronology and geochemistry. *Bulletin of Volcanology*, 77(10), 1-20.
- Sparks, R. S. J. (1976). Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows. *Sedimentology*, 23(2), 147-188.
- Sparks, R. S. J., Self, S., & Walker, G.P. (1973). Products of ignimbrite eruptions. *Geology*, 1(3), 115-118.
- Sulpizio, R. & Dellino, P. (2008). Sedimentology, depositional mechanisms and pulsating behaviour of pyroclastic density currents. *Developments in Volcanology*, 10: 57-96.
- Sulpizio, R., Dellino, P., Doronzo, D.M., & Sarocchi, D. (2014). Pyroclastic density currents: state of the art and perspectives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 283, 36-65.
- Thomson, E., (1930). Quantitative Microscopic Analysis. *Journ. Geol.*, 38(3): 193-222.
- USGS, (s.f.). Mount St. Helens, Washington, Precursors to the May 18, 1980 Eruption. *USGS*. <http://vulcan.wr.usgs.gov/home.html>
- Vallance, J.W., & Scott, K.M. (1997). The Osceola Mudflow from Mount Rainier: Sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow. *Geological Society of America Bulletin*, 109(2), 143-163.
- Valentini, L., Capaccioni, B., Rossi, P.L., Scandone, R., & Sarocchi, D. (2008). Vent area and depositional mechanisms of the Upper Member of the Neapolitan Yellow Tuff (Campi Flegrei, Italy): new insights from directional fabric through image analysis. *Bulletin of Volcanology*, 70(9), 1087-1101.
- Vázquez, R., Capra, L., Caballero, L., Arámbula-Mendoza, R., & Reyes-Dávila, G. (2014). The anatomy of a lahar: Deciphering the 15th September 2012 lahar at Volcán de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 272, 126-136.

- Vitouš, P. (2020). *From deposition to caldera resurgence: pyroclastic density current dynamics as revealed by magnetic anisotropy of the Teplice rhyolite, Bohemian Massif*. (M.Sc Thesis). Charles University, Prague.
- Walker, G.P. (1983). Ignimbrite types and ignimbrite problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17(1-4), 65-88.
- Wentworth, C.K. (1919). A laboratory and field study of cobble abrasion. *The Journal of Geology*, 27(7), 507-521.
- Willcock, M.A., Mattei, M., Hasalová, P., Giordano, G., Cas, R.A., & Morelli, C. (2015). Flow behaviour in the intra-caldera setting: an AMS study of the large (> 1290 km³) Permian Ora ignimbrite. *Geological Society, London, Special Publications*, 396(1), 177-204.
- Zaragoza, G., Caballero-García, L., Capra, L., & Nieto-Torres, A. (2020). Lahares secundarios en el volcán Popocatepetl: El lahar Nexpayantla del 4 de febrero, 2010. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(2), 121-134.
- Zrelak, P.J., Pollock, N.M., Brand, B.D., Sarocchi, D., & Hawkins, T. (2020). Decoding pyroclastic density current flow direction and shear conditions in the flow boundary zone via particle-fabric analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 402, 1-13.



<http://1.bp.blogspot.com/>

APÉNDICES

8.1 Apéndice I. Datos de tamizados

8.1.1 Unidad Gris

Depósito	Código de afloramiento	PT2101			PT2107			PT2102			PT2106			
	Muestra	Do			A			Aomed			C-gris			
		Peso	Porcentaje	Porcentaje acumulado										
Gris	Peso inicial (g)	283.45	-	-	404.24	-	-	441.36	-	-	495.61			
	-6	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00				
	-5	-	-	0.00	-	-	-	80.89	18.75	18.75	69.65	14.11	14.11	
	-4	20.61	7.31	7.31	9.42	2.34	2.34	24.32	5.64	24.39	24.32	4.93	19.04	
	-3	42.97	15.25	22.56	40.00	9.94	12.28	92.01	21.33	45.72	65.06	13.18	32.22	
	-2	28.01	9.94	32.50	20.68	5.14	17.42	30.06	6.97	52.69	37.32	7.56	39.78	
	Escala phi	-1	21.37	7.58	40.09	14.52	3.61	21.03	22.78	5.28	57.97	20.20	4.09	43.87
	0	31.01	11.00	51.09	46.01	11.43	32.46	37.21	8.63	66.60	36.76	7.45	51.31	
	1	34.95	12.40	63.49	76.15	18.92	51.38	37.83	8.77	75.37	46.81	9.48	60.80	
	2	40.94	14.53	78.02	72.43	18.00	69.38	41.58	9.64	85.01	60.53	12.26	73.06	
	3	21.26	7.54	85.57	33.04	8.21	77.59	21.19	4.91	89.92	30.94	6.27	79.33	
	4	16.22	5.76	91.32	33.64	8.36	85.94	15.43	3.58	93.49	35.96	7.28	86.61	
	Fondo	24.45	8.68	100.00	56.57	14.06	100.00	28.06	6.51	100.00	66.10	13.39	100.00	
	Total	281.79		% recuperado	99.41	402.46	% recuperado	99.56	431.36	% recuperado	97.73	493.65	% recuperado	99.60

8.1.2 Unidad Rosada

		8.1.2 Unidad Rosada												
		PT2101			PT2107			PT2102			PT2106			
Depósito	Código de afloramiento	D1			B			Amed			D-rosa			
	Muestra	Peso	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Peso	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Peso	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Peso	Porcentaje	Porcentaje acumulado	
	Peso inicial (g)	332.05			351.12			434.94			766.10			
	-6	-	-	0.00				-	-	0.00				
	-5	-	-	0.00	65.89	18.90	18.90	33.80	7.89	7.89	80.43	10.55	10.55	
	-4	13.64	4.25	4.25	0.00	0.00	18.90	26.94	6.29	14.17	7.44	0.98	11.53	
	-3	44.53	13.87	18.11	26.81	7.69	26.59	48.14	11.23	25.41	105.87	13.89	25.42	
	-2	29.02	9.04	27.15	17.80	5.11	31.70	33.68	7.86	33.26	36.47	4.78	30.20	
Rosado	Escala phi	-1	25.53	7.95	35.10	10.55	3.03	34.72	28.33	6.61	39.87	29.26	3.84	34.04
	0	39.34	12.25	47.35	26.20	7.52	42.24	48.17	11.24	51.11	60.36	7.92	41.96	
	1	42.65	13.28	60.63	44.50	12.76	55.00	51.38	11.99	63.10	101.16	13.27	55.23	
	2	48.81	15.20	75.83	55.24	15.85	70.85	59.16	13.80	76.91	138.53	18.17	73.40	
	3	25.46	7.93	83.76	29.78	8.54	79.39	29.69	6.93	83.83	66.27	8.69	82.10	
	4	19.69	6.13	89.89	28.26	8.11	87.50	21.79	5.08	88.92	64.07	8.41	90.50	
	Fondo	32.48	10.11	100.00	43.58	12.50	100.00	47.49	11.08	100.00	72.38	9.50	100.00	
	Total	321.15	% recuperado	96.72	348.61	% recuperado	99.29	428.57	% recuperado	98.54	762.24	% recuperado	99.50	

8.2 Apéndice II. Programas empleados

Programa	Descripción	Funciones principales	Referencia del programa
Image-Pro Plus 6.0	Es un software para el análisis de imágenes en 2D.	Filtros morfológicos Segmentación automática Mejoramiento de imágenes Filtros de pseudo-color Clasificación de imágenes binarias por tamaño Medición a detalle sobre imágenes Mediciones interactivas Co-localización <i>Track moving objects</i>	Media Cybernetics., (2022). Image-Pro Plus Get Started. <i>Products</i> . https://www.mediacy.com/
Photoshop CC 2015	Photoshop es un potente software con diversas funciones para diseñadores y fotógrafos digitales.	Función de pinceles Relleno selectivo Efectos fotográficos	Adobe., (2022). Resumen de funciones / versiones de Photoshop CC 2015.X. <i>Photoshop</i> . https://helpx.adobe.com/
FabricS	FabricS es un software que permite obtener la fábrica de forma a partir del procesado de imágenes digitales. Emplea un algoritmo basado en estadística circular, donde el software otorga valores como media, iso-orientación, varianza y la orientación preferencial de las partículas (mediante un diagrama de rosas).	Filtros de área a estudiar, tamaño y excentricidad	Moreno-Chávez, G., Castillo-Rivera, F., Sarocchi, D., Borselli, L., & Rodríguez-Sedano, L.A. (2018). FabricS: A user-friendly, complete and robust software for particle shape-fabric analysis. <i>Computers & Geosciences, 115</i> , 20-30.
FSA	FSA es un programa que emplea el análisis de Fourier para clasificar la morfología de las partículas a partir de su forma general, redondez y textura superficial.	Filtros por área a estudiar e introducir hasta tres rangos de armónicos a estudiar al mismo tiempo	Moreno-Chávez, G., Castillo-Rivera, F., Montenegro-Ríos, J. A., Borselli, L., Rodríguez-Sedano, L.A., & Sarocchi, D. (2020). Fourier Shape Analysis, FSA: Freeware for quantitative study of particle morphology. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research, 404</i> , 1-15.
DECOLOG 6.0	DECOLOG 6.0 es un poderoso programa computacional que permite decodificar las distribuciones de tamaño de grano de depósitos geológicos para su caracterización a partir de distribuciones Log-normales y Weibull.	Descripción granulométrica mediante el método de Monte Carlo aplicado a la estadística de Folk e Inman. Decodificación de distribuciones a partir de distribuciones Log-normales o de tipo Weibull Identificación del número de parámetros / poblaciones presentes en una distribución granulométrica	https://www.lorenzo-borselli.eu/decolog/