



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS

CARACTERIZACIÓN Y DINÁMICA DEL LAHAR SECUNDARIO
OCURRIDO EN 2010, VOLCÁN POPOCATÉPETL: MECANISMOS
DISPARADORES, CARACTERÍSTICAS TEXTURALES Y SIMULACIÓN
NUMÉRICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
ANA GABRIELA ZARAGOZA CAMPILLO

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ANA MARÍA LIZETH CABALLERO GARCÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2017





Universidad Nacional
Autónoma de México

UNAM



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

No podemos engañar a la naturaleza, pero sí podemos ponernos de acuerdo con ella.

Albert Einstein

La única batalla que se pierde, es la que se abandona.

Che Guevara

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a la **Dra. Lizeth Caballero García**, por todo el tiempo y apoyo que me ha dado desde que la conozco, que ya es bastante, por permitirme trabajar y aprender a su lado, por revisar cada detalle de este trabajo y hacerle las correcciones necesarias, que he de admitir fueron bastantes, por compartir conmigo un poco de sus conocimientos y pasión por los lahares, por hacerme responsable y una mejor persona. Pero sobre todo por creer en mí... Tendría muchas otras cosas que decir aquí, pero siento que son innecesarias, las palabras no pueden expresar lo que yo quisiera.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, quien desde hace ya varios años ha sido mi segundo hogar.

A la **Licenciatura en Ciencias de la Tierra** por aventurarme a este mundo lleno de fenómenos increíbles y darme la oportunidad de entenderlos un poco.

Al comité revisor de esta tesis **Dra. Beatriz Ortega Guerrero, Dra. Lucia Capra Pedol, Dra. Lizeth Caballero García, Dr. José Luis Arce Saldaña y Dr. Osvaldo Franco** por tomarse un fragmento de su valioso tiempo para leer el trabajo y transmitirme un poco de sus conocimientos a través de sus comentarios. También por la disposición mostrada para que el trabajo estuviera a tiempo, mil gracias!

A la **Dra. Beatriz Ortega Guerrero** por brindarme la oportunidad de trabajar a su lado.

A **Amiel Nieto Torres** quien desde un principio estuvo al pendiente de este trabajo, por sus comentarios hechos en algún momento durante la elaboración de la tesis, por acompañarnos en el trabajo de campo, por facilitarme el modelo digital de elevación y por las imágenes ASTER.

A **Roberto Velasco Segura** por enseñarme y dejar en mí una huella de lo que debe ser un buen profesor.

Al Laboratorio de secado de muestras y molienda del Instituto de Geología a cargo de la Dra. Lucy Mora.

También quiero agradecer a mis compañeras y amigas de la carrera con las que compartí tantos desvelos y con las que llegue al final de esta etapa (el orden de los factores no altera el producto) Aurora Hernández Hernández, Alitzel Guzmán Huerta, Maricruz Ramírez Vázquez, Zaira Martínez y Shaila Victoria Cervantes.

A mi familia por la paciencia que tuvo durante la realización de este trabajo.

A todos aquellos que por descuido no han sido incluidos y me brindaron su apoyo en algún momento, mis más sinceras disculpas y mis agradecimientos por lo que he recibido de ustedes.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN | 1 |
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN | 2 |
| 1.1. Importancia del trabajo..... | 3 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.2.1. Objetivo principal | 3 |
| 1.2.2. Objetivos particulares | 3 |
| CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN AL VOLCÁN POPOCATEPÉTL | 4 |
| 2.1. Geología..... | 4 |
| 2.2. Historia eruptiva..... | 4 |
| 2.3. Lahares en el Popocatépetl | 6 |
| CAPITULO 3. LAHARES | 9 |
| 3.1. Concepto de lahar | 9 |
| 3.2. Mecanismos disparadores | 10 |
| 3.3 Tipos de lahares | 11 |
| 3.3.1. Flujos de escombros..... | 11 |
| 3.3.1.1. Características de los depósitos de flujos de escombros..... | 13 |
| 3.3.2. Flujos Hiperconcentrados..... | 15 |
| 3.3.2.1. Comportamiento dinámico..... | 16 |
| 3.3.2.2. Características de los depósitos de flujos hiperconcentrados..... | 16 |
| 3.3.3 Transición entre flujos..... | 17 |
| CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA INTEGRAL | 20 |
| 4.1. Trabajo de campo..... | 20 |
| 4.2. Análisis de la lluvia | 21 |
| 4.3. Análisis textural | 21 |
| 4.3.1. Análisis granulométrico por el método de intersecciones de Rosiwal | 22 |
| 4.3.2. Análisis granulométrico total y análisis estadístico..... | 24 |
| 4.4. Imágenes satelitales ASTER..... | 25 |
| 4.5. Simulación numérica | 27 |

| | |
|--|-----------|
| 4.5.1. Modelo matemático FLO-2D | 27 |
| 4.5.2. Datos de entrada | 30 |
| CAPÍTULO 5. RESULTADOS | 33 |
| 5.1 Depósito “Lahar Nexpayantla” | 33 |
| 5.1.1. Localización del área de estudio | 33 |
| 5.1.2. Descripción del depósito y distribución de las muestras | 34 |
| 5.2. Análisis textural del depósito “lahar Nexpayantla” | 36 |
| 5.3. Mecanismo disparador..... | 45 |
| 5.4. Análisis de imágenes satelitales ASTER..... | 50 |
| 5.4.1. Material fuente | 53 |
| 5.5. Monitoreo Acústico de Flujos (AFM)..... | 55 |
| 5.6. Simulación numérica | 56 |
| 5.6.1. Morfología del sector NW del volcán Popocatepetl | 56 |
| 5.6.2. Datos de entrada | 58 |
| 5.6.3. Resultados FLO-2D | 59 |
| 5.6.3.1. Validación de la simulación..... | 62 |
| CAPITULO 6. DISCUSIÓN GENERAL | 66 |
| CAPITULO 7. CONCLUSIONES | 72 |
| APÉNDICES | 73 |
| A. Descripción del depósito..... | 74 |
| B. Granulometría | 76 |
| B.1. Tamizado seco..... | 76 |
| B.2. Intersecciones de Rosiwal | 77 |
| B.3. Granulometría total | 78 |
| B.4. Parámetros estadísticos | 79 |
| C. Reporte de actividad volcán Popocatepetl (CENAPRED) | 80 |
| D. Datos de los geófonos (AFM)..... | 81 |
| E. Coeficiente de Manning | 85 |
| F. Resultados FLO-2D..... | 86 |
| REFERENCIAS | 87 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 3. 1. Comportamiento reológico para los distintos tipos de flujos. | 9 |
| Figura 3. 2. Tipos de flujos gravitacionales basados en las proporciones de agua y sedimento | 10 |
| Figura 3. 3. Esquema en sección longitudinal de las partes de un flujo de escombros | 12 |
| Figura 3. 4. Hidrograma esquemático del pico de descarga para un flujo de escombros .. | 13 |
| Figura 3. 5. Formación de gradación normal en flujos de escombros .. | 14 |
| Figura 3. 6. Facies deposicionales mostradas en sección transversal | 15 |
| Figura 3. 7. Zona diluida y carpeta de tracción de un flujo hiperconcentrado .. | 16 |
| Figura 3. 8. Transformación de un flujo de escombros a un flujo hiperconcentrado..... | 18 |
| Figura 3. 9. Transición de un flujo de escombros a un flujo hiperconcentrado | 19 |
| | |
| Figura 4. 1. Trabajo realizado en las campañas a campo | 20 |
| Figura 4. 2. Métodos ópticos | 22 |
| Figura 4. 3. Imagen representando el método de las intersecciones de Rosiwal..... | 23 |
| Figura 4. 4. Imágenes ASTER de la zona de estudio | 26 |
| Figura 4. 5. Modelo digital de elevación | 30 |
| Figura 4. 6. Hidrograma | 31 |
| | |
| Figura 5. 1. Localización del área de estudio..... | 33 |
| Figura 5. 2. Fotografías del depósito del lahar Nexpayantla..... | 34 |
| Figura 5. 3. Mapa donde se observa la ubicación de los puntos de control | 35 |
| Figura 5. 4. Curvas acumulativas para la fase proximal. | 37 |
| Figura 5. 5. Fotografías donde se muestran los depósitos estudiados | 38 |
| Figura 5. 6. Fotografías donde se observan los depósitos de la fase distal. | 39 |
| Figura 5. 7. Curvas acumulativas para la fase distal..... | 40 |
| Figura 5. 8. Parámetros estadísticos. | 42 |
| Figura 5. 9. Diagrama ternario..... | 43 |
| Figura 5. 10. Histogramas granulométricos donde se puede inferir el comportamiento del lahar a lo largo de la trayectoria que siguió. | 44 |
| Figura 5. 11. Mapa donde se muestra la localización de las estaciones meteorológicas | 45 |
| Figura 5. 12. Gráficas de los datos de las medias y extremas mensuales de las cuatro estaciones. | 46 |
| Figura 5. 13. Gráficas donde se muestra la precipitación para el año 2010 | 48 |
| Figura 5. 14. Gráfica y tabla donde se muestran los datos para el día más lluvioso del año 2010. | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 5. 15. Visualización de la imagen del subsistema VNIR 21 de enero. | 51 |
| Figura 5. 16. Visualización de la imagen del subsistema VNIR 26 de marzo..... | 52 |
| Figura 5. 17. Fotografía de uno de los procesos de remoción en masa..... | 53 |
| Figura 5. 18. Mapa donde se muestran los procesos de remoción en masa que se delimitaron con ayuda de imágenes satelitales. | 54 |
| Figura 5. 19. Ubicación de las estaciones de Monitoreo Acústico de Flujos. | 55 |
| Figura 5. 20. Datos que representan un posible evento de lahar el día 4 de febrero de 2010, registrado en la estación PFM2 | 56 |
| Figura 5. 21. Mapa de pendientes y perfil del volcán Popocatépetl..... | 57 |
| Figura 5. 22. Distribución de los valores del coeficiente de Manning. | 58 |
| Figura 5. 23. Máxima profundidad del flujo. | 59 |
| Figura 5. 24. Resultados de la simulación del lahar de 2010. | 61 |
| Figura 5. 25. Distribución de la velocidad obtenida durante la simulación del flujo. | 62 |
| Figura 5. 26. Diferencias en la distribución longitudinal del lahar | 64 |
| Figura 5. 27. Diferencias observadas mediante el cálculo del parámetro e_1 | 65 |
| | |
| Figura 6. 1. Gráfica del tamaño medio de grano contra la clasificación. | 67 |
| Figura 6. 2. Perfiles donde se observa el emplazamiento del evento..... | 69 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 5. 1. Porcentajes de grava, arena y material fino | 37 |
| Tabla 5. 2. Parámetros estadísticos de las muestras de la fase proximal. | 38 |
| Tabla 5. 3. Porcentajes de grava, arena y material fino de las muestras de la zona distal.. | 41 |
| Tabla 5. 4. Parámetros estadísticos de las muestras de la fase distal..... | 41 |
| Tabla 5. 5. Datos de la ubicación de las cuatro estaciones de las que se tomaron datos. .. | 46 |
| Tabla 5. 6. Datos para el día más lluvioso del año 2010. | 49 |
| Tabla 5. 7. Características de las dos imágenes ASTER. | 50 |

RESUMEN

El estudio de los lahares es de gran importancia ya que representan una de las mayores amenazas en ambientes volcánicos debido a que son procesos capaces de movilizar grandes volúmenes de sedimentos y producen efectos devastadores para la población y la infraestructura. En la presente investigación se aborda el tema de un lahar ocurrido en la barranca Nexpayantla, volcán Popocatepetl en el año 2010, cuyo objetivo principal es determinar las características del evento con la finalidad de analizar su origen y comportamiento.

Para la realización del presente trabajo se realizó un análisis de la precipitación para identificar la fecha de ocurrencia, un análisis granulométrico para la caracterización de los depósitos asociados al lahar, un análisis visual de imágenes ASTER que ayudó a delimitar el área del evento y cálculos del área de inundación y se reprodujo el evento mediante simulaciones numéricas con el modelo matemático FLO-2D para obtener las zonas de inundación del lahar, la profundidad y la velocidad.

A partir del estudio de la precipitación pluvial y de las imágenes ASTER se encontró que el lahar fue iniciado a partir de una precipitación de 100 mm/día el 4 de febrero del 2010 y disparado por un proceso de remoción en masa que fue alimentado por otros procesos de remoción más pequeños. En las imágenes también se observó que la distancia que alcanzó el lahar es casi el doble de lo que se estimó con el depósito, mismo que se comprobó con la simulación numérica. El análisis granulométrico indica que el evento inició como un flujo hiperconcentrado y posteriormente a 100 metros se convirtió en un flujo de escombros. Finalmente, en la simulación numérica se obtuvieron datos de la profundidad del flujo en la que se observó una profundidad mínima de 67 cm y una máxima de casi 3 metros, en cuanto a la velocidad ésta fue de 5.9 m/s en la zona proximal y en la zona distal varió en un rango de 0.5 a 2.1 m/s. Por último se validó la simulación mediante dos parámetros, la función PLR y la función e_1 para saber si la simulación era una buena aproximación.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Un lahar es un término general que describe a los flujos de agua saturados de material que descienden a gran velocidad por los relieves volcánicos, y se considera un proceso y no un depósito (Smith y Lowe, 1991). Los lahares son uno de los eventos volcánicos más destructivos por el riesgo que suponen para las poblaciones asentadas en las faldas de los volcanes, por lo que han sido estudiados con la finalidad de comprender su origen y comportamiento y la evaluación del riesgo que representan.

El volcán Popocatepetl (19° 03'N, 98° 35'O, 5452 m snm) es un estratovolcán ubicado sobre el Cinturón Volcánico Transmexicano, arco continental que se distribuye de E a O sobre el paralelo 19° N. El volcán Popocatepetl es el segundo volcán más alto de México, se sitúa a unos 65 km al sudeste de la Ciudad de México y a 45 km al oeste de la ciudad de Puebla. Se estima que en un radio de 40 km alrededor del volcán habitan más de 1 millón de personas (Macías, 2005). Desde 1994, el volcán se encuentra en una fase de actividad eruptiva que se mantiene hasta la actualidad, esto es un factor determinante en la génesis de los lahares ya que el material originado sobre las laderas aporta material fácilmente removilizable en el cauce.

El registro geológico evidencia depósitos asociados a estos procesos especialmente en las barrancas ubicadas al norte, donde se localizan las poblaciones de Santiago Xalitzintla y San Nicolás de los Ranchos. La mayoría de los estudios están enfocados a los lahares ocurridos en el sector norte en la barranca Huiloac y están orientados principalmente al origen y dinámica de estos eventos. Entre ellos están los de González et al. (1997), Capra et al. (2004), Muñoz (2007), Muñoz et al. (2009) y en el flanco NW los de Sheridan et al. (2001) y Franco et al. (2016).

Desde la reactivación del volcán en 1994, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) realiza un monitoreo detallado del volcán que incluye el control visual, sísmico y la deformación. Es hasta el año 1998 que se instalan estaciones de monitoreo acústico de flujos (AFM), los cuales han sido utilizados exitosamente en otros volcanes. Sin embargo, en el caso del volcán Popocatepetl, estos se localizan solamente sobre el flanco NE dejando expuesta toda un área del volcán en la cual también es posible la generación de lahares, como lo es en el flanco noroeste y todo el sector sur.

El objetivo primordial de la presente investigación es determinar las características del lahar ocurrido en el año 2010 en la barranca Nexpayantla, ubicada en el flanco NW del Popocatepetl. Para estudiar este evento, se realizó trabajo de campo para la recolección de muestras y toma de datos y análisis texturales del depósito. Además, se realizó un análisis visual de imágenes ASTER para establecer la fecha de ocurrencia y delimitar el alcance del evento, ya que estos datos no se encontraban bien definidos, lo cual es de gran importancia para realizar un análisis del peligro. Finalmente, este evento se reprodujo a través de simulaciones numéricas, lo que permitió reproducir el evento con el

código numérico FLO-2D (O'Brien, 2009) y permitió calibrarlo con el objetivo de recrear eventos similares en otras barrancas del volcán.

Es importante mencionar que la actividad reciente del Popocatepetl representa un peligro latente para las poblaciones más cercanas al volcán, ya que la actividad explosiva influye en la generación de lahares secundarios al aportar nuevo material inestable en las pendientes, que es muy fácil de erosionar. Durante lluvias intensas aumenta el peligro por la consecuente formación de eventos como el estudiado en el presente trabajo. Por lo tanto, estudiarlos constituye un factor determinante en la prevención y mitigación de éstos fenómenos.

1.1. Importancia del trabajo

El Popocatepetl es el volcán mejor observado en México, cuenta con monitoreo sísmico, de la deformación, de manantiales y gases. Para el registro de lahares, existen estaciones de Monitoreo Acústico de Flujos (AFM por sus siglas en inglés), sin embargo, solo están instalados en las barrancas Tenenepanco, la Espinera y la unión de estas, ubicadas en el flanco NE del volcán, quedando sin vigilancia los flancos S y NW del volcán. Estudios como los de Sheridan et al. (2001) y Franco et al. (2016), han descrito depósitos de lahar en el sector NW dejando de manifiesto que dichos eventos pueden ocurrir en otras áreas del volcán.

El presente trabajo aborda un estudio sobre la formación de un lahar en 2010 en el flanco NW, dentro de la barranca Nexpayantla, asociado a lluvias intensas. El estudio a detalle de este evento es de gran importancia, ya que el pueblo de San Pedro Nexapa, que cuenta con 4633 habitantes, se encuentra en la desembocadura de esta barranca. Además, algunos pobladores de las áreas aledañas trabajan dentro de la barranca en la extracción de madera, lo cual los hace vulnerables a este tipo de eventos. Por lo tanto, caracterizar estos eventos podría ayudar a delimitar el área de inundación y su alcance.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo principal

El objetivo principal de la presente investigación es caracterizar el lahar secundario ocurrido en el 2010, en el flanco NW del volcán Popocatepetl (Lahar Nexpayantla).

1.2.2. Objetivos particulares

- Determinar las características texturales del lahar Nexpayantla.
- Establecer los mecanismos disparadores
- Determinar el comportamiento del lahar Nexpayantla.
- Aplicar el modelo matemático bidimensional FLO-2D para simular el evento y determinar las profundidades máximas y velocidades del flujo.

CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN AL VOLCÁN POPOCATEPÉTL

2.1. Geología

El volcán Popocatepetl (19° 03'N, 98° 35'O, 5450 m) se localiza en el extremo sur de la Sierra Nevada, es un estratovolcán de composición dacítico-andesítica que ha tenido actividad en los últimos 23,000 años (Robin y Boudal, 1987), con actividad que ha variado de erupciones efusivas con derrames de lava hasta erupciones de tipo explosivo que han ocasionado colapsos parciales del edificio volcánico.

Uno de los modelos que explica la evolución geológica del Popocatepetl es atribuido a Robin (1984); Robin y Boudal (1987) y Sosa-Ceballos (2015), en él se plantea la existencia de al menos tres etapas de construcción y destrucción de edificios volcánicos:

La primera de ellas se refiere a un edificio volcánico construido hace un millón de años aproximadamente, que se conoce como edificio primitivo o volcán Nexpayantla (Robin 1984; Mooser 1967), la edad del colapso no es clara pero Macías (2005) estima que pudo ocurrir hace aproximadamente 200,000 años A.P., dicho edificio colapsó casi en su totalidad, generando una avalancha de escombros (Robin y Boudal, 1987).

Una segunda etapa en la evolución geológica del Popocatepetl está definida por el nacimiento del volcán El Fraile (Robin y Boudal, 1987) o el Ventorrillo (Sosa-Ceballos et al. 2015), dentro de la caldera que originó la explosión del volcán primitivo. Inicialmente se estimó la edad del colapso entre 50,000 y 30,000 años A.P., (Robin y Boudal, 1987) sin embargo, estudios más recientes sugieren que el colapso sucedió hace 23,000 años A.P. (Siebe et al., 1996a; Macías, 2005; Sosa-Ceballos et al., 2015).

Un tercer edificio volcánico pudo haber colapsado durante la explosión ocurrida hace 14,100 ¹⁴C años AP (17000 años cal. A.P.) evento conocido como la erupción pliniana Tutti-Frutti (Sosa-Ceballos et al., 2012 y 2015). El origen del cono actual del Popocatepetl se asocia a la alternancia de eventos efusivos y explosivos.

2.2. Historia eruptiva

Durante la última etapa evolutiva, la actividad explosiva del Popocatepetl ha sido caracterizada por eventos plinianos. La de mayor magnitud ocurrió hace 14100 ¹⁴C años A.P. (~17000 años cal. A.P.) El evento generó una serie de flujos piroclásticos y oleadas en zonas proximales y culminó con la formación de una columna pliniana, la cual se dispersó hacia el noroeste en dirección de la Ciudad de México (Siebe et al., 1996b, 1997). Este horizonte de caída contiene pómez dacítica de color anaranjado, fragmentos de granodiorita gris, limolitas metamorizadas, skarns y otros fragmentos del basamento. Posiblemente este evento se originó en un cráter lateral, situado en la actual barranca de Nexpayantla. Este depósito de caída fue descrito en la cuenca de la Ciudad de México

como “Pómez con andesita” por Mooser (1967), con un espesor de 5 cm. Este depósito está ampliamente distribuido en los alrededores del volcán y por lo regular no contiene material carbonizado.

Durante el Holoceno se han producido otros tres eventos plinianos, El primer evento ocurrido hace 4965 ± 65 ^{14}C años A.P. (Siebe et al., 1996a, 1996b), inició con actividad hidromagmática que generó oleadas piroclásticas a distancias mínimas de 20 km. Este evento abrió el conducto volcánico y permitió que el magma fuera emitido a grandes velocidades para formar una columna pliniana que alcanzó alturas mínimas de 25 km (Siebe et al., 1996a, 1996b), para después ser transportada por los vientos en dirección N-NE-E. Las columnas plinianas se colapsaron debido al agotamiento del material juvenil en la cámara magmática. El colapso de las columnas eruptivas produjo flujos piroclásticos que se emplazaron alrededor del volcán y fueron capaces de carbonizar el material encontrado a su paso. Estas erupciones bloquearon la red hidrográfica del Popocatepetl y del Iztaccíhuatl, por lo que lluvias torrenciales durante y después de la erupción generaron lahares, que se depositaron en las planicies cercanas a la cuenca de Puebla (Siebe et al., 1996a, 1996b).

El segundo evento tuvo lugar alrededor de 2200-2100 años cal. A.P. (Siebe et al., 1996b) comenzó con pequeñas explosiones que generaron depósitos de caída y culminó con una columna pliniana que se dispersó hacia el ENE. Además se produjeron flujos de lava que cubrieron áreas del sureste (Siebe et al., 1996b). La erupción pliniana más reciente ocurrió hace 1100 años cal. A.P. y produjo la pómez Pink (Siebe et al., 1996b).

La actividad reciente inicia después de un periodo de 67 años de quietud, el Popocatepetl se reactivó el día 21 de diciembre de 1994, con la emisión de columnas de ceniza, vapor de agua y gases que se elevaban hasta alturas de 2 a 3 km. Estas emisiones provenían de pequeñas bocas eruptivas alineadas, que se localizaban en la parte este del interior del cráter. Esta serie de eventos continuaron esporádicamente hasta fines de marzo de 1995, cuando se registró un decremento en las emanaciones de ceniza. A pesar de haber tenido fluctuaciones en la actividad sísmica y emisión de gases, el volcán permaneció tranquilo sin la emisión de columnas de ceniza hasta inicios de marzo de 1996, cuando nuevas emanaciones tuvieron lugar. Finalmente, apareció una colada de lava muy viscosa, a partir de una fractura situada en el interior del cráter, el día 29 de marzo (Macías, 2005)

El 30 de junio de 1997 ocurrió una explosión precedida por una serie de sismos volcanotectónicos. La erupción formó una columna eruptiva de 8 km de altura y los vientos la dispersaron hacia la Ciudad de México, provocando una lluvia de ceniza. Esta erupción tuvo una intensidad de 2 a 3 en la escala VEI (Índice de Explosividad Volcánica). Un día después, se originaron lahares que alcanzaron los 12 km, hasta el poblado de

Santiago Xalitzintla (Macías, 2005). De julio de 1997 a noviembre del 2000 se emplazaron cuatro domos, los cuales fueron destruidos por explosiones que lanzaron proyectiles a 5 km del cráter. Del 12 al 16 de diciembre del 2000, la actividad del Popocatépetl se incrementó notoriamente, por lo que cerca de 40 000 habitantes fueron evacuados (Macías, 2005). Desde abril de 1996 al presente, se ha producido la formación de más de 20 domos en el interior del cráter del Popocatépetl, los cuales han sido destruidos por explosiones vulcanianas, proceso que ha sido controlado por la temperatura y la viscosidad del magma. Uno de los episodios más importantes fue el ocurrido el 21 de enero de 2001, dado que produjo una columna eruptiva de 8 km y un flujo piroclástico que viajó 5-6 km desde la cima hasta llegar al bosque. A partir de estos flujos se originaron lahares que viajaron alrededor de 15 km hacia el poblado de Xalitzintla (Capra et al., 2004).

El año 2002 se inició con erupciones menos violentas que las descritas anteriormente. Sin embargo, entre los meses de noviembre y diciembre de este año, se emitieron columnas de hasta 6 km de altura (Franco, 2005). Así mismo, durante el curso del año 2002, tuvieron lugar dos lahares que fluyeron desde los 4200 m hasta 2700 m de altitud aproximadamente (Muñoz, 2007). A pesar de que son eventos importantes, no existe un registro sobre el día en que ocurrieron, ni tampoco de las causas que los desencadenaron.

A partir del año 2002, la actividad del volcán ha ido disminuyendo considerablemente de manera progresiva hasta el año 2007. El registro de la actividad eruptiva en el volcán Popocatépetl, hasta la fecha, no recopila la información relacionada con la formación de lahares, con excepción de los ocurridos entre los años 3195 AP y el 1095 D.P (Siebe et al., 1996) y los del último periodo eruptivo 1994-2007.

2.3. Lahares en el Popocatépetl

Es importante mencionar la actividad lahárica que ha tenido el Popocatépetl a lo largo de su historia, sin embargo no hay estudios a detalle al respecto, algunos de los estudios están enfocados a los lahares que han ocurrido en el flanco NE del volcán es decir, en las barrancas Tenenepanco, Espinera y donde confluyen estas dos, la barranca Huiloac. A continuación se mencionan algunos estudios previos.

Durante el Holoceno, los tres periodos eruptivos principales del Popocatépetl (3195 – 2830 AP., 800 – 215 AP., y 675 – 1095 DP.) estuvieron caracterizados por un mismo esquema de actividad, que comenzaba con emisiones de pequeñas cantidades de ceniza (flujos y caídas) y alcanzaban su máxima intensidad con la deposición de grandes cantidades de pómez, flujos de cenizas y finalmente se producían extensos lahares (Siebe et al., 1996). Macías (2005) indica que el colapso de las columnas provocó el bloqueo de la red hidrográfica del Popocatépetl. Con la adición de agua, procedente de la fusión de hielo

y nieve (González et al., 1997), o de lluvias torrenciales (Macías, 2005), se generaron lahares que esparcieron la carga sedimentaria por la cuenca de Puebla. Este mecanismo fue probablemente el que generara el lahar denominado San Nicolás (González, 2000), que se produjo en la barranca Huiloac hace 1100 – 1300 años. Este flujo, con un volumen de $5 \times 10^7 \text{ m}^3$, se inició a media ladera del volcán y viajó unos 60 km hasta alcanzar la ciudad de Izúcar de Matamoros. Otro evento es el que reporta Sheridan et al. (2001) en la barranca de Nexpayantla que se generó por las mismas fechas que el evento de San Nicolás. Este autor estimó un volumen de $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ que rebasó el poblado de San Pedro Nexapa situado a más de 15 km al noroeste del volcán.

En el presente periodo eruptivo, iniciado en diciembre de 1994, los principales lahares en la barranca Huiloac han tenido lugar en 1995, 1997 y 2001. En abril de 1995, una emisión cubrió de piroclastos aproximadamente el 50 % del glaciar, lo que ocasionó su fusión repentina. El agua de fusión se canalizó por las barrancas Tepeteloncocone, La Espinera y Tenenepanco y saturó los materiales que se encontraban en ellas, una mezcla de sedimentos sin consolidar de anteriores avalanchas y ceniza volcánica (Palacios, 1995; Palacios, 1996).

Dos años después, entre el 30 de junio y el 1 de julio de 1997, se produce la mayor erupción registrada en el periodo eruptivo reciente. El agua de fusión, junto con el procedente de las fuertes precipitaciones que se produjeron en las laderas del volcán (Sheridan et al., 2001), movilizó los sedimentos que se encontraban en el fondo de las barrancas y se generó un flujo hiperconcentrado. Al ir incorporando material, se transformó en un flujo de escombros para después progresivamente cambiar a un flujo hiperconcentrado en su parte distal (Capra et al., 2004). Este lahar transportó $1.85 \times 10^5 \text{ m}^3$ de material sólido y agua (Muñoz-Salinas et al., 2009), alcanzó una velocidad entre 1.4 y 7.7 m/s (Muñoz-Salinas et al., 2007) y tras 21 km de recorrido, se detuvo en la población de San Nicolás de los Ranchos.

El lahar del 2001 tuvo un origen diferente. El 22 de enero de 2001 el volcán emitió un flujo piroclástico que recorrió 6 km por la ladera norte del volcán. Al atravesar el glaciar, causó una fuerte abrasión, lo que provocó el deshielo parcial del mismo (Capra et al., 2004). El agua de fusión saturó los materiales e inició un lahar en la barranca Tenenepanco, que continuó por Huiloac y finalizó 2 km antes de alcanzar la población de Santiago Xalitzintla. En los 14.3 km de recorrido, este lahar se comportó como un flujo de escombros (Capra et al., 2004). El volumen transportado fue de $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ (Muñoz Salinas et al., 2009) y desarrolló velocidades comprendidas entre 1.3 y 13.8 m/s (Muñoz Salinas, 2007).

Estudios más recientes como los de Franco et al., (2016) señalan varios lahares ocurridos en el periodo de 1959 al 2013 en la barranca Nexpayantla, estos autores identificaron 23

eventos intra-eruptivos fechados por medio del método de dendrocronología y asociados al fenómeno del Niño. Aproximadamente el 43% de estos lahares ocurrieron en la temporada de julio a octubre cuando la precipitación mensual media es de 120 mm, cerca del 37% ocurrieron durante la temporada de lluvias (de marzo a junio) y el 20% restante de esta actividad corresponde a la temporada de invierno.

CAPITULO 3. LAHARES

3.1. Concepto de lahar

Existen distintas definiciones de lahar, a continuación se mencionan algunas:

La palabra lahar es de origen indonesio y es ampliamente utilizada en la literatura geológica y en vulcanología. Van Bemmelen (1949) los describe como flujos de lodo que contienen escombros y bloques angulares de origen volcánico.

Smith y Lowe (1991), proponen una definición de lahar, la cual considera que éste es un proceso y no un depósito, que comprende a los flujos de agua saturados de material que descienden a gran velocidad por los relieves volcánicos.

El comportamiento reológico de los lahares puede ser newtoniano o no newtoniano (Figura 3.1) en función de la concentración y el tipo de sedimentos y el tamaño de las partículas (Pierson y Scott, 1985).

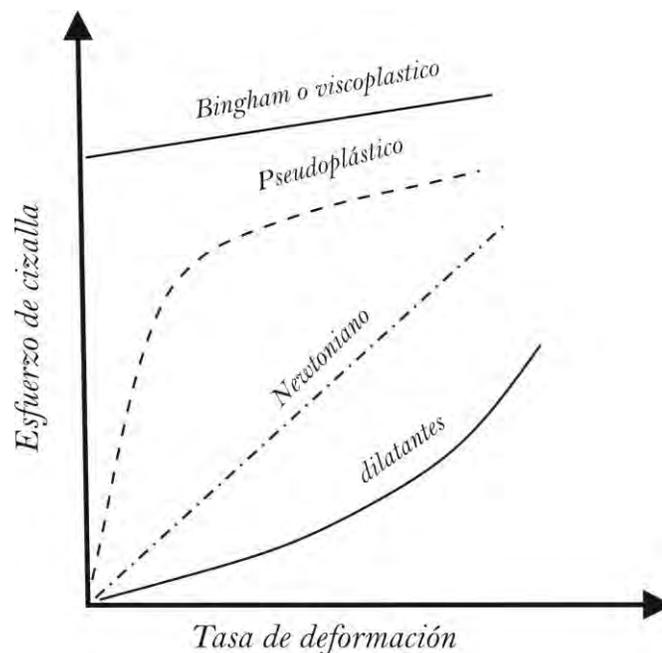


Figura 3. 1. Comportamiento reológico para los distintos tipos de flujos.

De acuerdo a la cantidad de sedimento y características reológicas podemos tener dos tipos de lahares. (Figura 3.2). Los flujos hiperconcentrados que poseen un volumen de material de entre 20% y 60% (Beverage y Culbertson, 1964) y los flujos de escombros con un volumen de entre 60% y 80%, es decir más del 80% en peso del sedimento (Pierson y Scott, 1985).

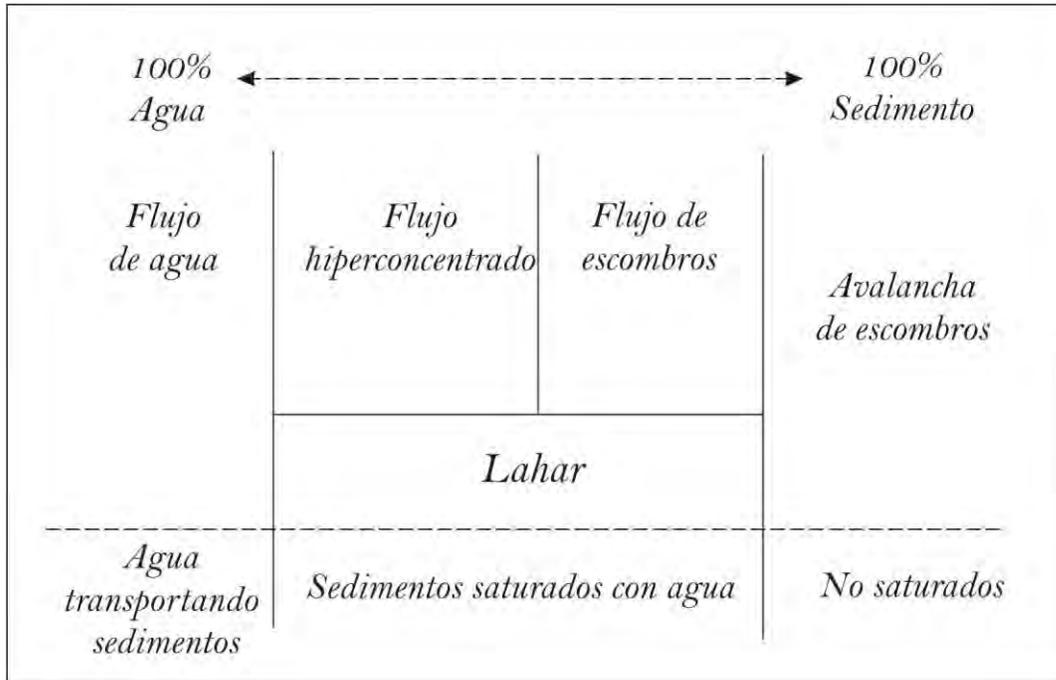


Figura 3. 2. Tipos de flujos gravitacionales basados en las proporciones de agua y sedimento (Tomado de Pierson y Costa, 1987; Smith y Lowe, 1991).

Las condiciones necesarias para la formación de un lahar son:

- 1) Una cantidad considerable de agua ya sea atmosférica, hidrotermal, de poro, de lagos, glaciario, etc.
- 2) Una cantidad abundante de sedimento de origen volcánico como material piroclástico, suelo o material de coluvión.
- 3) Pendientes abruptas en el área de origen y
- 4) Un mecanismo disparador como un temblor, una erupción volcánica, intensas precipitaciones, factores antrópicos, etc.

3.2. Mecanismos disparadores

Los lahares pueden ser primarios (sineruptivos) asociados directamente con la actividad volcánica y secundarios (post eruptivos) desencadenados por intensas precipitaciones ocurridas durante o después de un evento eruptivo.

Los lahares primarios se generan por las siguientes causas (Muñoz-Salinas 2007):

- 1.- Liberación de agua de un cráter.
- 2.- Emisión de corrientes piroclásticas que asimilan agua a lo largo de su recorrido.

- 3.- Deshielo de nieve o hielo al contacto con flujos de lava o con piroclastos o por calor geotérmico en la base de un glaciar.
- 4.- Transformación de una avalancha de escombros.

Los lahares secundarios pueden generarse por:

- 1.- Intensas precipitaciones posteriores a la actividad volcánica.
- 2.- Alteración hidrotermal del volcán.
- 3.- Transformación de un flujo no saturado.

3.3 Tipos de lahares

Los flujos de escombros y los flujos hiperconcentrados que ocurren en zonas volcánicas son comúnmente denominados como lahares (Smith & Fritz, 1989, Smith & Lowe, 1991). A continuación se describen las características de cada uno.

3.3.1. Flujos de escombros

Los flujos de escombros son mezclas de agua y sedimento que fluyen pendiente abajo debido a la fuerza de gravedad, dependiendo del autor, las concentraciones de sedimento pueden variar. De acuerdo con Beverage y Culbertson (1964) estos tienen concentraciones de sedimento mayores al 80 % en peso o 60 % en volumen, según Costa (1984) la concentración es de 70-90 % en peso y 47-77 % en volumen.

Un flujo de escombros está compuesto de agua y por partículas gruesas pobremente clasificadas con diámetros que van de 2 mm hasta grandes bloques de más de 1 m de diámetro. Estos clastos gruesos se encuentran dentro de un fluido intersticial constituido por agua, arena, limo y arcilla. Los flujos de escombros pueden subdividirse dependiendo del contenido de arcilla en flujos cohesivos y flujos no cohesivos. Los flujos no cohesivos contienen entre 3 y 5 % en peso de arcilla. Los flujos de escombros cohesivos contienen más del 5% en peso de material arcilloso (Scott, 1988 a,b; Scott et al, 1995) y son originados por la transformación de una avalancha de escombros la cual contiene material que ha sufrido alteración hidrotermal o intemperismo.

Los flujos de escombros se mueven en pulsos (Iverson, 1997) y cada uno se compone de (Figura 3.3):

- 1) Cabeza, la cual tiene una alta concentración de material grueso (bloques) que se acumulan al frente y en los márgenes del flujo.

- 2) Cuerpo, en estado de licuefacción donde el flujo de escombros se encuentra totalmente desarrollado y es muy móvil.
- 3) Cola, donde la concentración de sedimento disminuye (Pierson y Scott, 1985; Pierson y Costa, 1987).

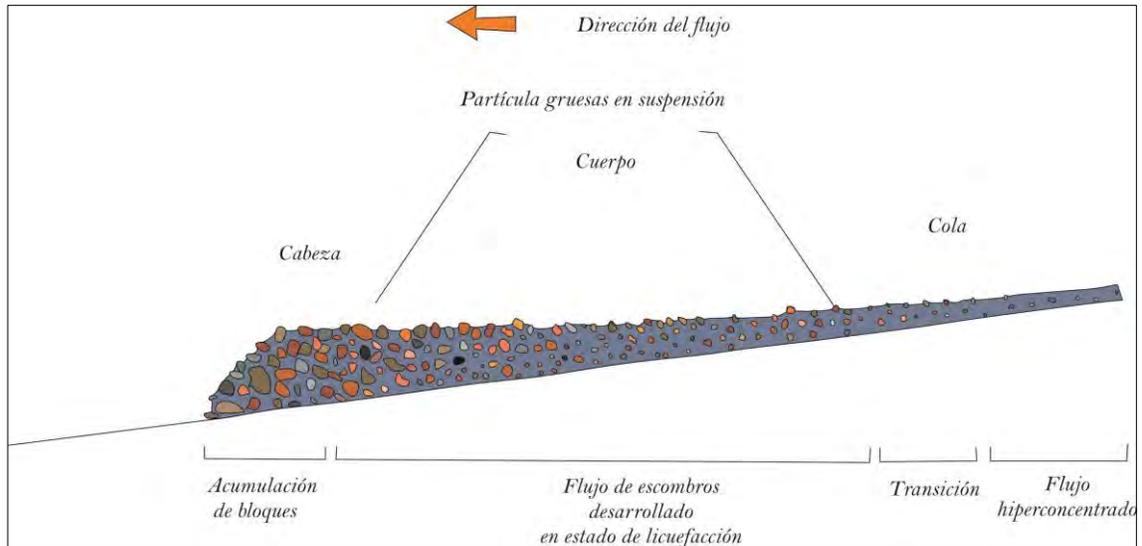


Figura 3.3. Esquema en sección longitudinal de las partes de un flujo de escombros (Pierson 1986).

Los flujos de escombros pueden viajar a velocidades bajas, menores a 5-15 m/s (18 y 54 km/h) dependiendo de la profundidad y la composición. Bajo estas condiciones, los flujos de escombros tienen un comportamiento laminar. Para velocidades más altas que pueden alcanzar hasta los 40 m/s (144 km/h) (Pierson, 1998), en donde el sustrato es irregular el flujo tiene un comportamiento turbulento, generalmente las velocidades del frente o cabeza son menores a las velocidades del cuerpo principal.

La descarga (Figura 3.4) o volumen total de un flujo de escombros depende de los volúmenes iniciales de agua y sedimento y del volumen de material que se incorpora durante el trayecto. Algunos flujos de escombros pueden tener picos de descarga como 100 000 m³/s (Pierson, 1995). El pico de descarga puede incrementarse corriente abajo por la erosión y la incorporación de sedimento y agua, pero generalmente hay una disminución en la descarga con la distancia corriente abajo.

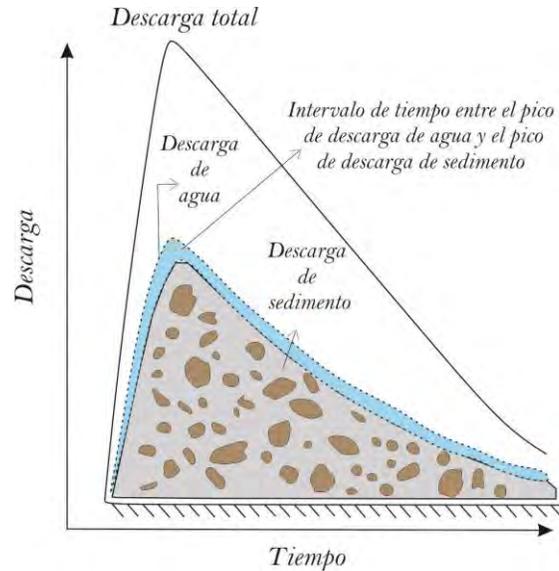


Figura 3.4. Hidrograma esquemático del pico de descarga para un flujo de escombros (Vallance, 2015).

3.3.1.2. Características de los depósitos de flujos de escombros

El depósito de los flujos de escombros pueden ocurrir de varias formas 1) tamaño preferencial o segregación de clastos con deposición localizada, 2) acreción basal de material (Pierson, 1990). La segregación ocurre con partículas gruesas que son grandes y pesadas para ser transportadas en suspensión, dichas partículas son depositadas de manera longitudinal atrás de rocas y troncos de árboles (Pierson, 1990). La segregación también puede presentarse cuando partículas gruesas en suspensión ascienden a la parte superior y al frente del flujo. Este tipo de segregación permite la formación de márgenes laterales de flujo y levees.

Los flujos de escombros son compactos, de espesor uniforme, con superficies planas con excepción de clastos grandes que sobresalen de la matriz, siguen el contorno de la topografía, muestran evidencia de escape de agua durante su consolidación mediante estructuras conocidas como pipas de drenaje, pequeños montículos de arena, pequeños canales superficiales y capas de acumulación de limo y arcilla (Caballero, 2012; González, 2000). Si los flujos de escombros se encuentran confinados, al llegar a los valles se depositan y adquieren en el frente una forma lobular.

Como depósitos remanentes se pueden encontrar los levees que son acumulaciones de clastos gruesos que se forman cuando el sedimento en los márgenes laterales se detiene debido a un adelgazamiento del flujo y a la presencia de vegetación en las orillas (Pierson, 1986).

Los depósitos de flujos de escombros pueden presentar gradación normal (Figura 3.5) debido a la acción de la gravedad y a la sedimentación de partículas gruesas. También puede ser el resultado de la deposición por partes, empezando por la cabeza (grano grueso) y terminando con la cola del flujo (grano fino) (Vallance y Scott, 1997). La gradación inversa se forma cuando el flujo es diluido y compuesto por partículas finas y luego se convierte en un flujo compuesto por partículas de mayor diámetro (Pierson y Scott, 1985).

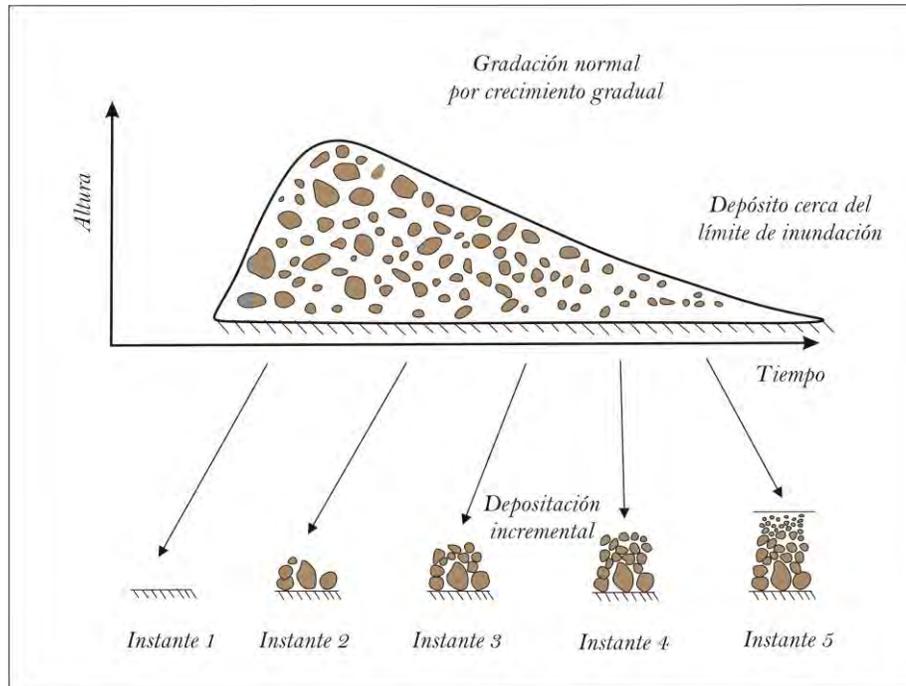


Figura 3.5. Formación de gradación normal en flujos de escombros debido a la acción de la gravedad y la sedimentación de partículas (Vallance y Scott, 1997).

El grado de redondez de las partículas es inherente al origen de las partículas antes de la incorporación al flujo, si el flujo en un inicio contiene fragmentos piroclásticos estos pueden permanecer muy angulosos o angulosos después de ser transportados, sin embargo las partículas más gruesas se vuelven más redondeadas. (González, 2000). Si el flujo contiene pómez y escoria, estos serán fácilmente redondeados en breves periodos de tiempo. Los flujos de escombros también pueden transportar diversos tipos de materiales fáciles de erosionar como fragmentos de suelo, arena, aluvi6n, dep6sitos volcanocl6sticos y vegetaci6n.

Los flujos de escombros exhiben tres facies deposicionales (Figura 3.6), identificadas por Scott (1988):

- 1) Depósitos de facies de canal. En esta facies se incluyen un flujo basal y depósitos de barras que se depositan a lo largo del eje principal del canal y cerca de la cabeza del flujo. Tienen texturas soportadas por clastos y pueden presentar gradación normal e inversa (Vallance y Scott, 1997).
- 2) Depósitos de facies de planicie de inundación. Los depósitos incluyen las superficies de terrazas, en las paredes de los valles y en la planicie de inundación, alejadas del eje principal del flujo. Estos depósitos presentan partículas más finas que los de la facies de canal y se encuentran soportados por matriz.
- 3) Depósitos de facies transicionales. Incluyen depósitos del cuerpo principal del flujo, que pueden representar la transición entre un flujo de escombros y un flujo hiperconcentrado y depósitos que representan la transición entre un flujo hiperconcentrado y un flujo normal de agua o depósitos diluidos de la cola del flujo.

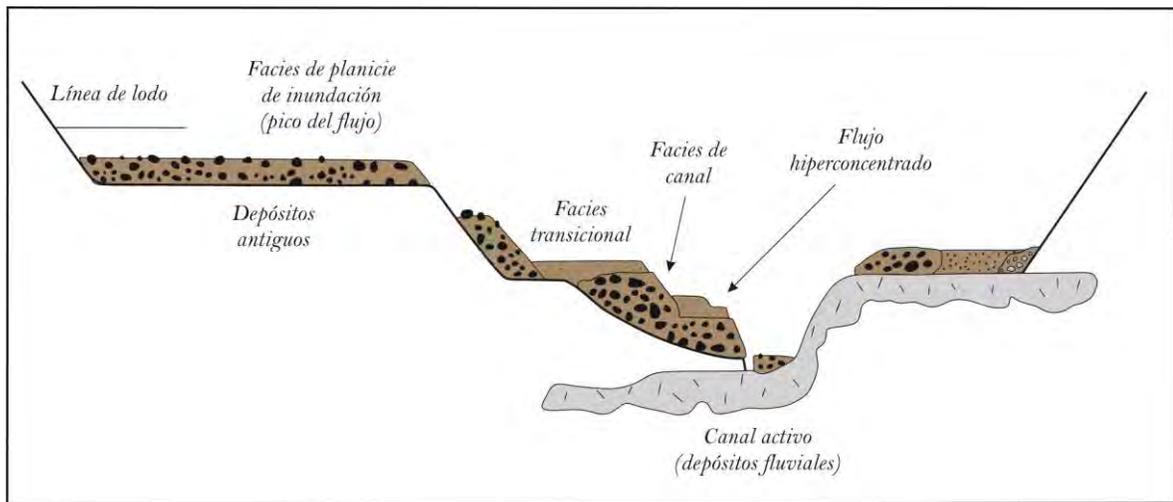


Figura 3.6. Facies deposicionales mostradas en sección transversal (Pierson y Scott, 1998).

De manera general los depósitos presentan una distribución de tamaños amplia, el soporte es por matriz o clasto a clasto y están mal seleccionados. Algunos depósitos de flujos de escombros pueden ser bimodales o multimodales en sus distribuciones granulométricas cerca de la fuente y ser unimodales a mayores distancias de la fuente (Scott, 1988a).

3.3.2. Flujos Hiperconcentrados

Los flujos hiperconcentrados son fluidos no newtonianos caracterizados por una turbulencia elevada, aunque esta depende de la concentración y granulometría del sedimento (Beverage Culbertson, 1964).

Según Beverage y Culbertson (1964) y Pierson y Scott (1985) la concentración de sedimento varía entre el 40 % en peso ó 20% en volumen, como límite inferior, y 80 % en peso ó 60% en volumen, como límite superior. El transporte de las partículas se da por tracción, flotación, suspensión y solución en regímenes turbulentos y laminares.

3.3.2.1. Comportamiento dinámico

En los flujos hiperconcentrados podemos encontrar dos zonas principales (Figura 3.7) (Sohn, 1997).

- a) Zona diluida. Zona relativamente con baja concentración de sedimentos en suspensión, básicamente está constituida por arcillas, limo y arena fina pero también podemos encontrar pómez y fragmentos de madera
- b) Carpeta de tracción. Zona de gran carga de transporte y concentración de sedimento arena y grava, esta puede ser subdividida en una región colisional con intenso esfuerzo cortante debida al flujo sobreyacente, hay colisión entre las partículas, alta temperatura granular y generación de presión, también podemos encontrar una región friccional en la que se encuentra una capa de granos que se mueven más lentamente.

El perfil de velocidades para un flujo hiperconcentrado es de carácter logarítmico (Pierson y Scott, 1998).

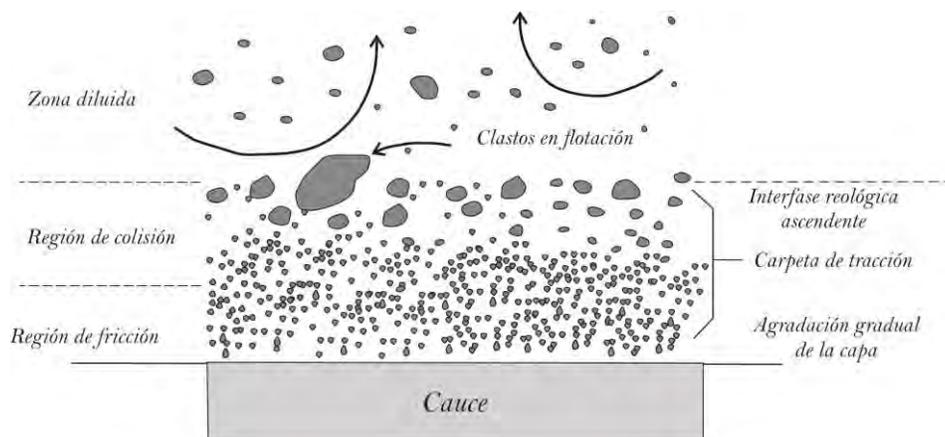


Figura 3.7. Zona diluida y carpeta de tracción de un flujo hiperconcentrado (Sohn, 1997).

3.3.2.2. Características de los depósitos de flujos hiperconcentrados

Los flujos hiperconcentrados se pueden depositar de dos maneras 1) por asentamiento de sedimento transportado en suspensión y 2) por acreción de la carpeta de tracción. La fracción más gruesa se deposita a lo largo del canal principal y el depósito va disminuyendo de tamaño con la distancia (Pierson y Scott, 1985).

Los depósitos en general son masivos pero pueden presentar estratificación cerca de la fuente, cerca de los márgenes del canal y en áreas estancadas (Scott, 1988). Pueden presentar lentes o capas discontinuas de materiales de baja densidad, gradación normal o inversa. También pueden mostrar diversas estructuras como chimeneas, diques y estructuras de plato en la cima del depósito, debidas a la rápida deposición y a la gran cantidad de material fino para atrapar agua de poro (Costa, 1984).

3.3.3 Transición entre flujos

Una vez generado un lahar, estos pueden tener transformaciones, ya sea de flujo hiperconcentrado a flujo de escombros o de flujo de escombros a flujo hiperconcentrado y tener aumento de volumen (bulking o acreción) o pérdida (debulking) que puede cambiar las propiedades del flujo dependiendo de las cantidades de material y agua que sean incorporadas o que se pierdan a lo largo de la trayectoria del lahar (Vallance, 2000).

Generalmente la transformación entre flujos se da de dos formas:

- a) Transición de un flujo de escombros a un flujo hiperconcentrado

Si un flujo de escombros incorpora suficiente agua o deposita sedimento en su trayecto río abajo puede transformarse en un flujo hiperconcentrado (lahar run-out) (Scott, 1988 a).

Pierson y Scott (1985); Scott (1988 a), infieren que la transformación sigue la siguiente secuencia:

- 1) La mezcla con agua da como resultado la dilución del flujo de escombros
- 2) La transformación a un flujo hiperconcentrado ocurre con la pérdida de competencia de transportar las partículas gruesas como arena gruesa y grava.
- 3) La depositación del material más grueso (arena y grava) ocurre por la acreción sobre el lecho del canal.
- 4) Los depósitos en la zona de transición son impuestos por la fase del flujo de escombros del cuerpo principal, en la cual se acrecionan capas de depósito de flujo de escombros encima de los depósitos de la zona de transición y
- 5) La cola del lahar se transforma en un flujo hiperconcentrado.

Esta transformación (Figura 3.8) comienza en el frente del flujo y se va desplazando hasta llegar a la cola, también puede ocurrir esta transformación cuando los sedimentos más gruesos se depositan debido a un cambio de velocidades y a una incorporación de agua lo que hace que el flujo de escombros se vuelva más diluido.

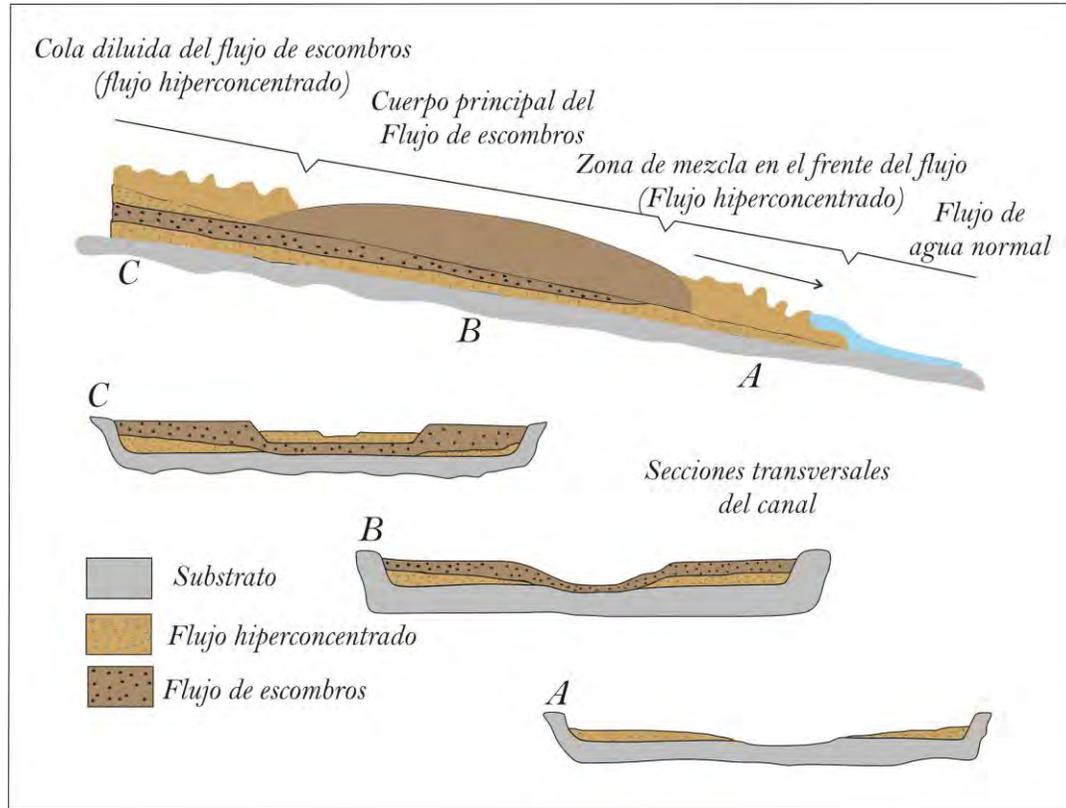


Figura 3.8. Transformación de un flujo de escombros a un flujo hiperconcentrado (Pierson y Scott, 1988).

En esta transformación podemos encontrar un depósito con una textura arenosa, soportada clasto a clasto, con bajo grado de selección. El contacto entre la unidad del flujo hiperconcentrado y la unidad del flujo de escombros es gradual y puede mostrar gradación inversa (Figura 3.9).

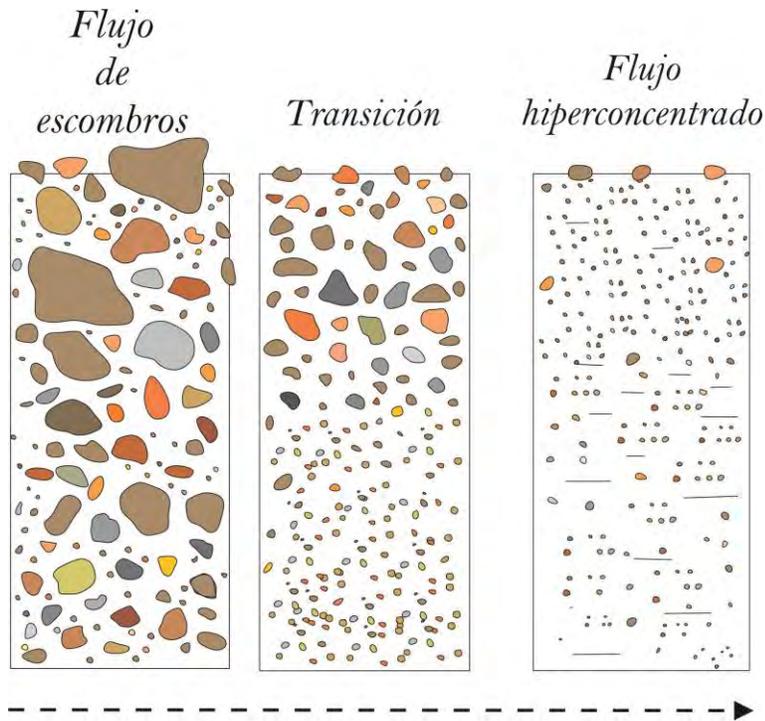


Figura 3.9. Transición de un flujo de escombros a un flujo hiperconcentrado (Pierson y Scott, 1998).

b) Transición de un flujo hiperconcentrado a un flujo de escombros

Resulta de la alteración en la concentración de sedimentos y la combinación de los siguientes mecanismos (Pierson y Scott, 1985):

- 1) Erosión e incorporación de sedimentos saturados del lecho del río y
- 2) Sedimentación progresiva de las partículas más gruesas en la fase granular.

El fenómeno aumenta la resistencia crítica del fluido y este es capaz de transportar en suspensión partículas del tamaño de la grava.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA INTEGRAL

En este capítulo se da una descripción de los métodos y técnicas que se emplearon para la realización de este trabajo, en el cual se realizaron los siguientes estudios 1) Análisis textural, 2) Análisis por imágenes satelitales y 3) simulación numérica. Para posteriormente discutirlos y formular conclusiones acerca de la formación y dinámica del lahar Nexpayantla. Básicamente el estudio consistió en las siguientes etapas:

- 1) Trabajo de campo
- 2) Trabajo de laboratorio (análisis textural)
- 3) Análisis de imágenes satelitales.
- 4) Simulación numérica.
- 5) Procesamiento, integración y análisis de datos.
- 6) Obtención de las conclusiones finales de la investigación.

En los siguientes apartados se explica a detalle en que consistió cada etapa y se complementó con información bibliográfica.

4.1. Trabajo de campo

Se realizaron diversas campañas de campo (Figura 4.1) a la barranca Nexpayantla para describir el depósito del lahar, se tomaron muestras a lo largo del depósito para realizar los análisis texturales y se describieron las características de los depósitos (ver apéndice A). Para describir sus características como distancia alcanzada y espesor. Posteriormente, se integró la información en un sistema de información geográfica, en este caso se utilizó ArcGis 10.2 para la elaboración de la cartografía del lahar usando un modelo digital de elevación (DEM) proporcionado por el Departamento de Vulcanología del CENAPRED con una resolución de 3 m.



Figura 4.1. Trabajo realizado en las campañas a campo, descripción del depósito y toma de muestras. En las fotografías se observan las terrazas estudiadas y el canal activo.

4.2. Análisis de la lluvia

Uno de los aspectos considerados para la generación de lahares secundarios es la cantidad de precipitación que reciben las cabeceras de las barrancas y el mismo cauce, en este trabajo se propone a la lluvia como mecanismo disparador del lahar Nexpayantla. Para realizar este trabajo se obtuvieron datos de las estaciones meteorológicas más cercanas al volcán Popocatepetl es decir, las estaciones San Pedro Nexapa, Atlautla, Hueyapan Tetela y San Andrés Calpan, para posteriormente elaborar histogramas con la precipitación y así observar algún pico anómalo y relacionarlo con el origen de este lahar ya que la fecha de ocurrencia no se encontraba bien definida.

4.3. Análisis textural

Los análisis granulométricos o sedimentológicos son de suma importancia para el estudio de los depósitos, a partir de ellos se puede inferir su dinámica de transporte y emplazamiento. Sin embargo, un solo método no es suficiente para describir a todo el depósito, ya que estos pueden estar caracterizados por partículas de tamaños muy variados. La manera de solucionar este problema es emplear varios métodos para el mismo fin.

De este modo, en el presente trabajo se emplearon dos métodos para el análisis textural del depósito. Para el análisis de la fracción de 4ϕ a -4ϕ se utilizó el método de tamizado en seco y para la fracción gruesa mayor a -4ϕ se utilizó el método de intersecciones de Rosiwal. La fracción fina no se analizó de forma detallada, ya que representaba menos del 2%.

Los resultados de la granulometría se expresaron en unidades phi

$$\phi = -\log_2 d$$

Siguiendo todas las medidas posibles para aumentar la calidad del resultado para el estudio textural del lahar de Nexpayantla se efectuaron los siguientes pasos:

1. Se colectaron en campo 3 kg de muestra representativa del depósito.
2. Se secó cada muestra en una charola de aluminio a una temperatura de 95°C durante 24 horas en el Laboratorio de secado de muestras y molienda del Instituto de Geología, UNAM.
3. Se calibró la balanza y posteriormente se pesó cada muestra.
4. Se agitó la pila en promedio 10 minutos para asegurarse que toda la muestra pasara adecuadamente por las mallas.
5. Se pesó cada fracción retenida en cada tamiz individualmente y se colocaron en bolsas de plástico antes etiquetadas y pesadas.

6. Se sumaron todas las fracciones para obtener el peso total de la muestra y convertirla a porcentaje en peso.
7. Finalmente, con los datos obtenidos de todas las fracciones, se representaron gráficamente por medio de histogramas granulométricos y curvas acumulativas.

4.3.1. Análisis granulométrico por el método de intersecciones de Rosiwal

Los métodos granulométricos ópticos (Figura 4.2) se aplican a rocas compactas o sedimentos endurecidos de los cuales se tiene que medir el diámetro de las partículas que los componen, la mayoría de los métodos ópticos empleados con el análisis de imágenes se basan en la medición del área de los rasgos en cortes bidimensionales, dentro de estos métodos los más empleados son el conteo de píxeles (Figura 4.2a), el conteo de puntos y las intersecciones de Rosiwal. El conteo de puntos es el método óptico más utilizado por su sencillez, es ampliamente utilizado en petrografía donde se le conoce como análisis modal, (Figura 4.2b). Sin embargo las intersecciones de Rosiwal (Figura 4.2c) es el método menos conocido pero es más preciso que los anteriores. (Sarocchi et al, 2005; Sarocchi, 2006).

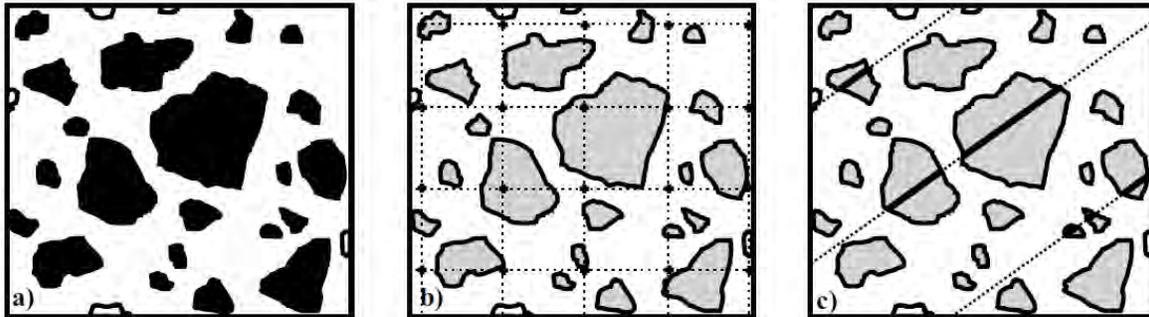


Figura 4.2. Métodos ópticos a) conteo de píxeles; b) conteo de puntos y c) intersecciones de Rosiwal (Sarocchi et al, 2005).

Rosiwal (1898) descubrió que sobreponiendo líneas rectas a un corte de material y midiendo las intersecciones o rasgos sobresalientes (Figura 4.2c), la razón entre la longitud total de las intersecciones y la longitud total de las líneas trazadas era igual a la razón entre la superficie ocupada por los rasgos y la superficie total medida (Sarocchi et al, 2005). La relación entre intersecciones y áreas se puede extender a la relación entre áreas y volúmenes por medio de la siguiente relación:

$$\frac{Ll}{Lt} = \frac{Aa}{At} = \frac{Va}{Vt}$$

Dónde:

Ll: es la longitud de las intersecciones o rasgos sobresalientes;

Lt: la longitud total de la línea trazada;

Aa: el área ocupada por los rasgos de las partículas;

At: el área total analizada;

Va: el volumen ocupado por las partículas y

Vt: el volumen total analizado

Como en el depósito del lahar estudiado se observó una fracción gruesa mayor a -4ϕ se utilizó el método de Intersecciones de Rosiwal para analizar esta fracción.

Para efectuar el análisis se coloca sobre una fotografía del afloramiento un grid o rejilla de líneas horizontales, sobre el grid se miden las intersecciones de los clastos y de esta manera es posible obtener la fracción gruesa del depósito. Para efectuar el análisis granulométrico por este método, se realizaron los siguientes pasos:

- 1.- Se tomaron fotografías de cada punto muestreado con una escala (pica o cinta métrica) a una distancia de entre 1 y 2 metros y se calibraron por medio del software Image Pro Plus versión 6.1 (Media Cybernetics Inc).
- 2.- Ya calibrada la imagen se añadió un grid o malla.
- 3.- Posteriormente se marca cada clasto que se intersecta con el grid para obtener así su diámetro, para este análisis se midieron entre 50 y 505 partículas y entre 1 y 24 líneas (Figura 4.3).



Figura 4.3. Imagen representando el método de las intersecciones de Rosiwal.

4.- Finalmente se separan los datos por tamaños de partículas en ϕ y se calculan parámetros estadísticos como la media, desviación estándar, los percentiles 25, 50,75 y 95, etc. Todos los datos obtenidos mediante este método se muestran en el apéndice B.2.

4.3.2. Análisis granulométrico total y análisis estadístico

Una vez integrada toda la información fue posible elaborar histogramas granulométricos completos de la fracción gruesa mayor a -4ϕ y del rango de 4ϕ a -4ϕ , asimismo se elaboraron las y curvas de acumulación para calcular parámetros estadísticos por medio del software Decolog 5.0 (Borcelli y Sarocchi 2004,2012). Dicho programa separa la distribución granulométrica en las tres curvas log-normales que más se aproximen a las modas principales de la distribución. Este programa proporciona los parámetros estadísticos por medio de varios métodos, método de Montecarlo, el método de Folk y Ward y el promedio ponderado de los componentes.

Los parámetros estadísticos utilizados aquí, son los desarrollados por Folk y Ward (1957) por ser los más ampliamente utilizados, los cuales se mencionan a continuación:

Media (Mz): Este parámetro determina el diámetro promedio de cada muestra y se obtiene mediante la fórmula:

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

| | |
|--------------|------------------|
| -1.00 – 0.01 | Arena muy gruesa |
| 0.01 -1.0 | Arena gruesa |
| 1.01 – 2.0 | Arena mediana |
| 2.01 – 3.00 | Arena fina |
| 3.01 – 4.00 | Arena muy fina |

Desviación estándar o clasificación (σ): Este parámetro mide el grado de dispersión o uniformidad de los valores con respecto a la media, este valor es dado en unidades ϕ , al igual que la curtosis, mide el grado de selección dentro de la muestra.

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$$

| | |
|-------------|----------------------------------|
| <0.35 | Muy bien clasificado |
| 0.35 – 0.49 | Bien seleccionado |
| 0.50 – 0.70 | Moderadamente bien seleccionado |
| 0.71 – 0.99 | Moderadamente seleccionado |
| 1.00 – 1.99 | Pobrementemente seleccionado |
| 2.00 – 3.99 | Muy pobrementemente seleccionado |
| >4.00 | Extremadamente mal seleccionado |

Asimetría (Sk): es una medida de la tendencia de la distribución de tamaño de partículas a estar hacia el lado fino o grueso de las partículas. Valores positivos indican una cola en el lado derecho de la curva o de lado del material fino y valores negativos o de lado izquierdo de la curva, indican un exceso de material grueso.

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

| | |
|---------------|-----------------------------|
| -1.00 - -0.31 | Altamente asimétrico grueso |
| -0.30 - -0.11 | Asimétrico grueso |
| -0.10 - 0.09 | Casi simétrico |
| 0.10 - 0.29 | Asimétrico fino |
| 0.30 - 0.99 | Altamente asimétrico fino |

Curtosis (Kg): es una medida de que tan amplia o estrecha es la curva de distribución de tamaños de las partículas. Básicamente mide el grado de selección de las partículas en los extremos de la curva y en la parte central, si la parte central está mejor seleccionada que los extremos la curva es leptocúrtica o puntiaguda, si las colas son las que se encuentran mejor seleccionadas entonces la curva es platicúrtica o aplanada.

$$Kg = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

| | |
|-----------|-----------------------------|
| <0.67 | Muy platicúrtica |
| 0.67-0.89 | Platicúrtica |
| 0.90-1.09 | Mesocúrtica |
| 1.10-1.49 | Leptocúrtica |
| 1.50-2.99 | Muy leptocúrtica |
| > 3.00 | Extremadamente leptocúrtica |

4.4. Imágenes satelitales ASTER

Para efectuar el análisis de imágenes satelitales se buscaron imágenes de todas las fechas disponibles cercanas a los picos de lluvia observados durante el 2010 (año reportado por CENAPRED), en las estaciones cercanas al volcán Popocatepetl. Cabe mencionar que solo se encontraron picos en febrero, junio y julio, y dentro de los meses mencionados solo se encontraron indicios del evento en las imágenes de enero y marzo del 2010.

Para llevar a cabo el análisis de las imágenes se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- 1) Adquisición de una imagen ASTER con fecha 21 de Enero de 2010 y hora 5:14 pm
- 2) Adquisición de una imagen ASTER con fecha 26 de Marzo de 2010 y hora 5:24 pm (Figura 4.4).

- 3) Procesamiento de las imágenes mediante el software de información geográfica ArcGis 10.2, combinación de bandas y delimitación del lahar.

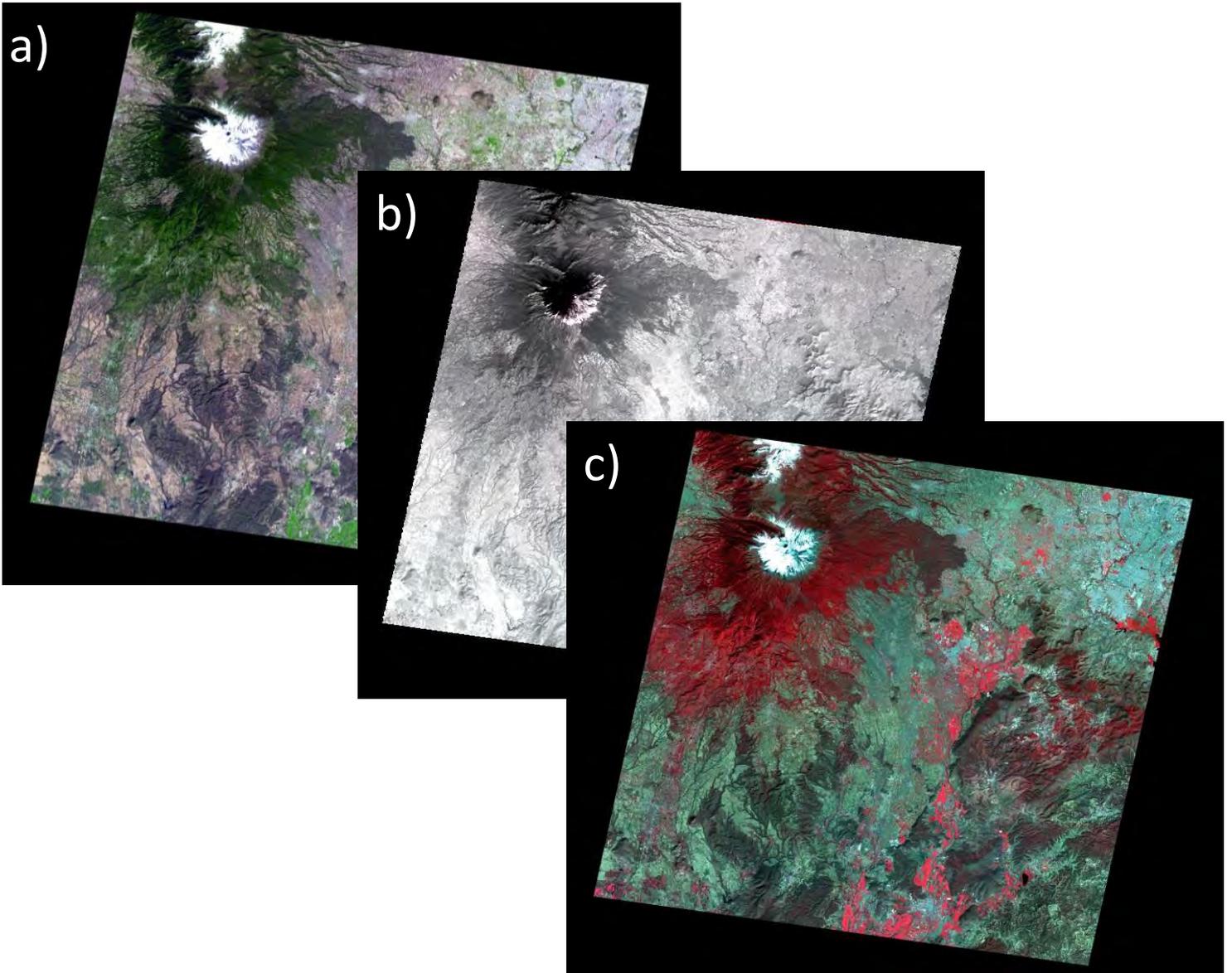


Figura 4.4. Imágenes ASTER de la zona de estudio a) Visual, b) TIR (Thermal Infrared) y c) VNIR (Visible and Near Infrared)

4.5. Simulación numérica

Con la modelación matemática se pretende representar un fenómeno mediante ecuaciones matemáticas que simulan los procesos físicos. En el caso de lahares, la modelación matemática puede calcular la distancia alcanzada por el flujo, las velocidades, el transporte de sedimentos, las áreas inundadas, etc., mediante la solución de las ecuaciones hidrodinámicas que intervienen en estos fenómenos.

Los modelos matemáticos bidimensionales son los más utilizados para simular los diferentes procesos hidrodinámicos, sedimentológicos y reológicos. En el presente trabajo se utilizó el modelo bidimensional FLO-2D.

4.5.1. Modelo matemático FLO-2D

FLO-2D (O'Brien, 2009) es un modelo bidimensional de diferencias finitas, de conservación de volumen, que permite simular flujos en topografías complejas, simula el flujo de fluidos no-newtonianos tales como flujos hiperconcentrados y flujos de escombros. Este modelo permite simular la trayectoria y las áreas inundadas. Como parámetros de entrada se requiere la topografía del terreno (modelo digital de elevación), la geometría del canal, valores estimados de rugosidad (coeficiente de Manning), hidrograma de entrada (sólidos + líquidos) y coeficientes reológicos α y β relacionados a la viscosidad.

El modelo matemático FLO-2D se basa en la ley de conservación de volumen:

$$\text{Volumen total de entrada} = \text{volumen de salida} + \text{volumen almacenado} + \text{pérdidas de volumen por infiltración}$$

En el modelo FLO-2D, los flujos son transportados en canales a través de celdas que en conjunto representan la malla del dominio computacional. Cada una de estas celdas contiene información de la topografía del área de estudio, un coeficiente relacionado a la rugosidad del terreno. El tamaño de la celda es muy importante, ya que influye en el tiempo de la simulación.

La modelación matemática se logra integrando numéricamente la ecuación diferencial de continuidad y la ecuación de movimiento, que se presentan a continuación (O'Brien, 2009):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = i \quad [1]$$

La ecuación de continuidad es un caso particular de la ecuación de conservación de la masa donde h es la profundidad hidráulica, V es la componente de la velocidad en una de las ocho direcciones de desplazamiento x , i es la intensidad de la lluvia y t el tiempo.

La ecuación de movimiento en la dirección x

$$S_{f_x} = S_{0_x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad [2]$$

La ecuación de movimiento en la dirección y

$$S_{f_y} = S_{0_y} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad [3]$$

Donde S_f es la componente de la pendiente de fricción basada en la ecuación de Manning, S_0 es la pendiente del lecho, los otros términos incluyen el gradiente de presión y los términos de aceleración local y convectiva. Esta ecuación representa el tirante promedio del flujo unidimensional en el canal.

$\frac{\partial h}{\partial x}$ *Gradiente de presión en x*

$\frac{\partial h}{\partial y}$ *Gradiente de presión en y*

$\frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y}$ *Aceleración convectiva en x*

$\frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x}$ *Aceleración convectiva en y*

$\frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t}$ *Aceleración local en x*

$\frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t}$ *Aceleración local en y*

En las ecuaciones 2 y 3 se asume que el volumen del lahar es constante, que la diferencia en velocidad entre la fase líquida y sólida es despreciable en la dirección del desplazamiento y la concentración de sedimentos es constante.

Para las planicies de inundación, las ecuaciones de movimiento son aplicadas calculando la velocidad del flujo a través de la frontera de una celda de la malla computacional en una dirección a la vez. Son cuatro direcciones principales Norte, Sur, Este y Oeste y cuatro direcciones diagonales Noreste, Noroeste, Sureste y Suroeste.

Los flujos hiperconcentrados y flujos de escombros se analizan mediante un modelo reológico cuadrático (O'Brien y Julien, 1985) que corresponden a fluidos no-newtonianos:

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad [4]$$

Donde dv/dy es el gradiente de velocidad, η es la viscosidad dinámica, τ es el esfuerzo cortante total, τ_y es la resistencia crítica y C es un coeficiente de esfuerzo cortante. El último término representa la suma de esfuerzos cortantes dispersivos y turbulentos que dependen del cuadrado del gradiente de velocidad.

La pendiente de fricción se calcula de la siguiente manera:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta V}{8\gamma_m h^2} + \frac{n^2 V^2}{h^{4/3}} \quad [5]$$

Donde n es el coeficiente de Manning, η es la viscosidad dinámica, γ_m es el peso específico de la mezcla, el parámetro de resistencia K , que depende de la pendiente y condiciones del canal. La resistencia crítica τ y la viscosidad dinámica η varían con la concentración de sedimentos y se utilizan las siguientes relaciones (O'Brien y Julien, 1988):

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad [6]$$

$$\tau = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad [7]$$

Donde α y β son coeficientes empíricos definidos experimentalmente por O'Brien y Julien (1988), la viscosidad y el esfuerzo están en función de la concentración volumétrica de sedimentos C_v , limo, arcilla y en algunos casos arena fina.

El modelo FLO-2D utiliza un esquema de diferencias finitas sobre la base de una malla de celdas o elementos cuadrados, en cada celda el modelo determina las velocidades y profundidades del flujo. Con el fin de hacer más rápido este proceso el modelo cuenta con un programa auxiliar GDS (Grid Developer System), que utiliza un algoritmo de interpolación mediante el cual se calculan las cotas del terreno a partir de puntos (x, y, z). A través del GDS se ingresa la información topográfica y se discretiza en celdas mediante la creación de la malla computacional.

4.5.2. Datos de entrada

Los datos de entrada requeridos por FLO-2D son:

1) Modelo Digital de Elevación

La caracterización de la geomorfología, geomorfometría e hidrología está fuertemente relacionada al modelo digital de terreno por lo que la resolución es sumamente importante, a mayor resolución, mayor detalle de la superficie del terreno. Debido a que el objetivo del trabajo es simular un lahar pequeño, se necesita un DEM detallado. Para llevar a cabo este análisis se obtuvo un DEM con una resolución de 3 metros proporcionado por el Departamento de Vulcanología del CENAPRED (Figura 4.5).

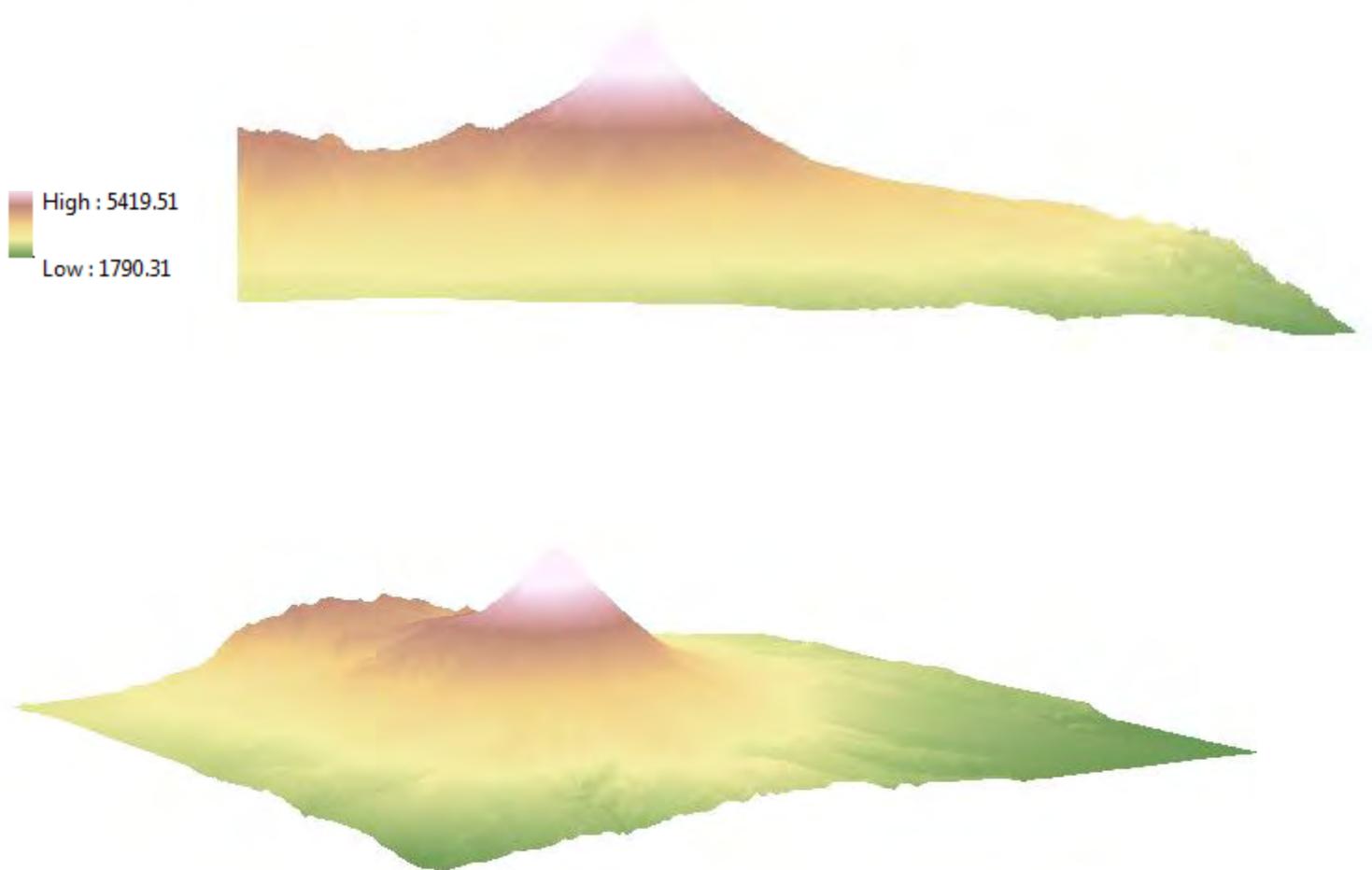


Figura 4.5. Modelo digital de elevación con una resolución de 3 m.

2) Hidrograma

Un hidrograma es la representación gráfica que expresa la variación en el tiempo de la descarga máxima del flujo. En este caso se utilizó un hidrograma unitario triangular (Figura 4.6), elaborado a partir de relaciones empíricas (Rickenmann, 1999), que permiten a partir del cálculo del volumen del depósito, hacer una estimación del pico de descarga Q_p de la siguiente manera:

$$Q_p = 0.00135V^{0.870}$$

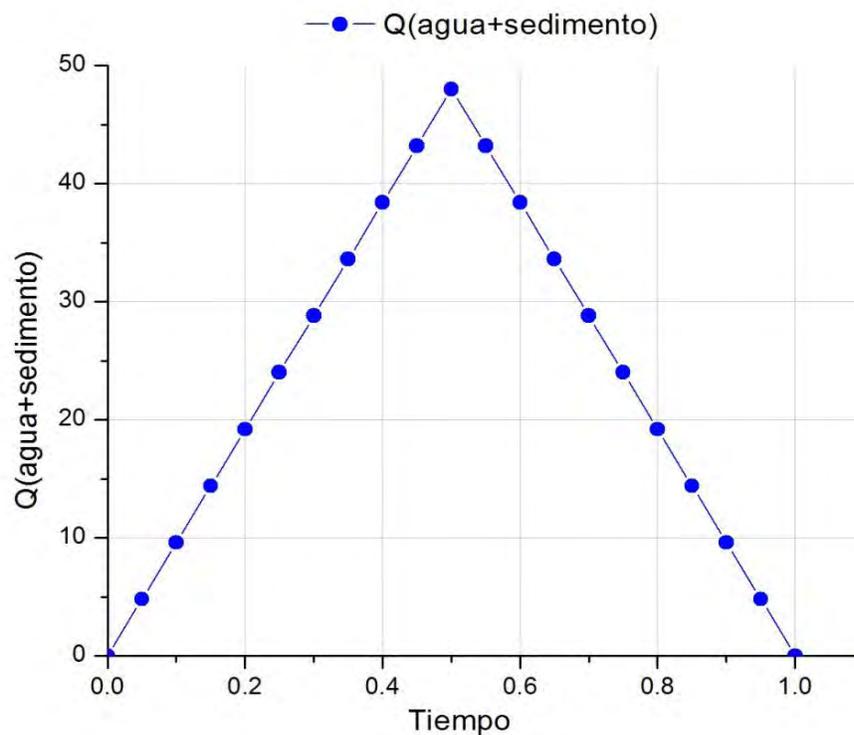


Figura 4.6. Hidrograma obtenido a partir de relaciones empíricas.

3) Coeficiente de Manning

El coeficiente de Manning n nos brinda información acerca de la rugosidad del terreno. Existen diversos factores que afectan el coeficiente de Manning entre los que podemos mencionar las irregularidades del canal, las obstrucciones, depósitos, vegetación, tamaño y forma del canal.

El valor n se calcula de la siguiente manera (Jeff V. P., et al 2007):

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + \dots n_n)m$$

Donde

n : Coeficiente de Manning

n_0 : Valor base para un canal regular (recto y uniforme)

n_1 : Grado de irregularidad de la superficie

n_2 : Variación en la sección transversal del canal (forma y tamaño)

n_3 : Obstrucciones u obstáculos al paso de flujos

n_4 : Vegetación

m : sinuosidad a lo largo del canal

Tomando en cuenta las características de la barranca Nexpayantla se calculó el coeficiente de Manning por secciones, de acuerdo con la variación en las características mencionadas en el párrafo anterior y con ayuda de los valores de la tabla del anexo E, los cuales se reportan en el capítulo de la simulación numérica.

Asimismo, el modelo FLO-2D utiliza el número de Froude que define el régimen del flujo, supercrítico, crítico o subcrítico, para realizar dichas simulaciones, se utilizó un número de Froude de 0.9 que define a los flujos subcríticos, régimen que siguen la mayoría de los lahares.

Las simulaciones fueron calibradas con los datos de los puntos de control POPO 15-01, POPO 15-02, POPO 15-03, POPO 15-04, POPO 15-05, POPO 15-06, POPO 15-07, POPO 15-08, POPO 15-09, POPO 15-10, POPO 15-11 y POPO 15-12.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 Depósito “Lahar Nexpayantla”

5.1.1. Localización del área de estudio

La zona de estudio, en este caso la barranca Nexpayantla, cubre un área de 21.7 km² y se localiza sobre el flanco NW del volcán, tiene un ancho de más de 100 m en promedio y una longitud de 17.6 km. Sus paredes son casi verticales, presenta sinuosidades o meandros y sobre su base fluye una pequeña corriente. En su desembocadura se localiza el poblado de San Pedro Nexapa (Figura 5.1). Durante el transcurso de los periodos fríos que duraron hasta el inicio del Holoceno fue excavada por la acción glacial, esta dinámica generó grandes volúmenes de detritos que quedaron depositados en el fondo de la barranca (Franco, 2005).

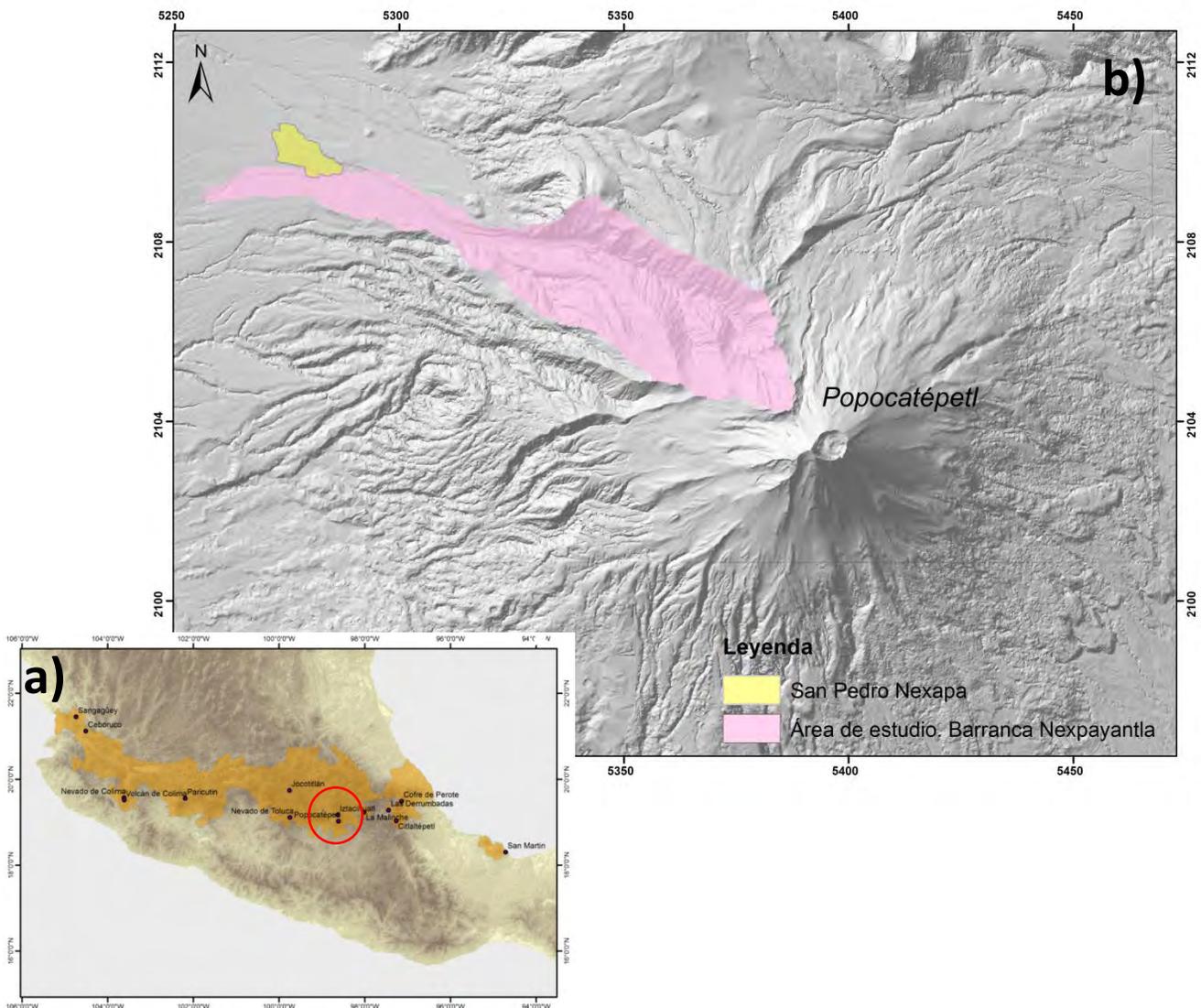


Figura 5.1. a) Localización geográfica del volcán Popocatepetl y b) área de estudio, el polígono rosa muestra la cuenca Nexpayantla y el polígono amarillo el poblado de San Pedro Nexapa.

5.1.2. Descripción del depósito y distribución de las muestras

El depósito aflora entre una altura de 3300 y 3100 m, tiene una extensión observada en campo de 1.5 kilómetros, cubre un área de 77,830 m², su espesor varía de 45 a 128 cm, el espesor promedio es de 67 cm. El depósito muestra sólo una unidad y está constituido por líticos subredondeados de color gris, de composición dacítica, con fenocristales de plagioclasa y piroxenos, mientras que otros son de color gris oscuro subredondeados, en los cuales pueden observarse pequeños minerales de plagioclasa y su composición es andesítica. Algunos de estos líticos presentan coloraciones rojizas debido al intemperismo. Una gran proporción del material incorporado lo representan troncos, los cuales se pueden observar en la cima del depósito y sobre el cauce (Figura 5.2).



Figura 5. 2. Fotografías del depósito del lahar Nexpayantla a) podemos observar como el depósito cubre todo el ancho de la barranca y como troncos de diversos tamaños fueron incorporados por el flujo, b) acumulación de troncos y partículas gruesas y c) acumulación de troncos perpendiculares a la cañada que obstruyeron el paso de material grueso.

Las muestras se colectaron en la parte media de la barranca, a lo largo del cauce, donde se distinguen los depósitos del lahar Nexpayantla (Figura 5.3), se describieron doce puntos en campo.

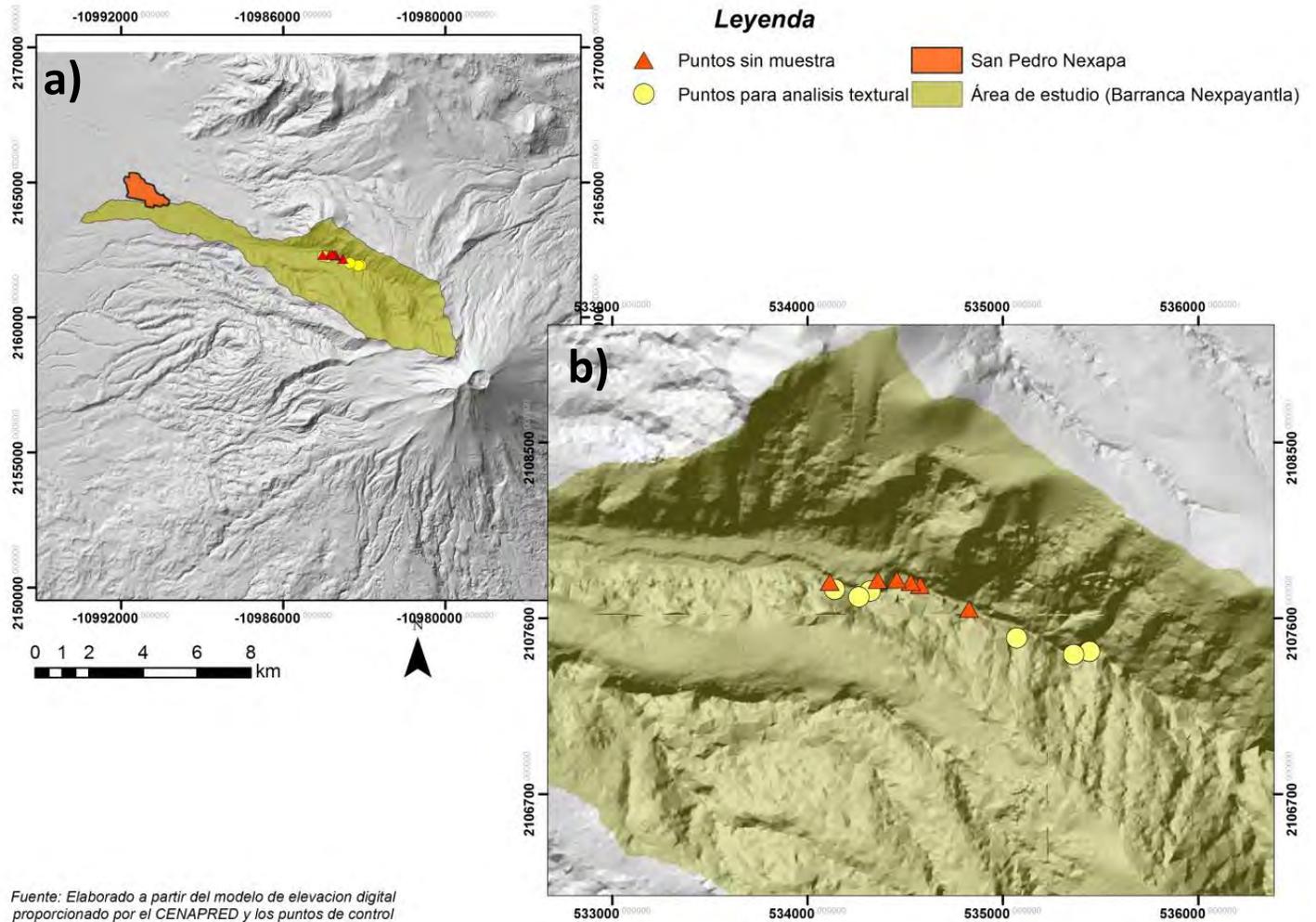


Figura 5.3. a) Mapa donde se observa la barranca Nexpayantla y el lugar donde se tomaron las muestras b) Zoom de la ubicación de los puntos de control, puntos donde se colectaron muestras para su posterior análisis textural.

5.2. Análisis textural del depósito “lahar Nexpayantla”

En este apartado se exponen las variaciones granulométricas observadas en el depósito y los parámetros estadísticos (Folk y Ward, 1957) tales como la media, desviación estándar, el grado de asimetría y curtosis, con la finalidad de conocer e interpretar las diferencias texturales de cada muestra y conocer el tipo de flujo involucrado. Las tablas con los resultados granulométricos totales y los parámetros estadísticos obtenidos se muestran en el apéndice B.

Zona proximal

Es el sitio donde comienza a verse el vestigio del lahar se ubica en las coordenadas 535445 y 2107427 a una altitud de 3300 m donde la barranca Nexpayantla se estrecha, abundan los árboles y troncos que obstruyen la cañada. A continuación se presenta la descripción de los depósitos a los que se les realizó un análisis granulométrico total.

En esta fase se encuentran las muestras con clave POPO 15-03, POPO 15-04 y POPO 15-05. El espesor del depósito varía de 45 cm a 92 cm y la distancia alcanzada va de los 0 a los 412.17 metros.

Los histogramas granulométricos presentan una distribución generalmente unimodal con una moda muy pronunciada en 2ϕ para la muestra POPO 15-03, mientras que las muestras POPO 15-04 y POPO 15-05 presentan una distribución multimodal con modas en -7ϕ , -4ϕ y -3ϕ y -9ϕ , -5ϕ y 0ϕ respectivamente.

Las curvas acumulativas (Figura 5.4) muestran que la moda se encuentra en los clastos gruesos mayores a 2 mm, ya que la pendiente es más pronunciada en el rango de -6 a -1ϕ que representa al tamaño de guijarros. Esto se observa en las muestras POPO 15-04 y POPO 15-05 y representa poco más del 50% del material que constituye el depósito mientras que la muestra POPO 15-03 tiene una tendencia al tamaño del gránulo que va de -2 a 0ϕ representando casi el 40% del material. Adicionalmente las curvas acumulativas muestran el enriquecimiento en material grueso con la distancia.

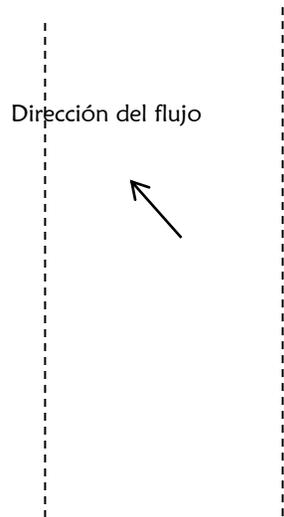


Figura 5.4. Curvas de frecuencia acumulativas para la fase proximal obtenidas mediante la aplicación de los métodos de tamizado e intersecciones de Rosiwal.

En el sitio POPO 15-03 podemos observar como el depósito en su mayoría está constituido por arenas y no abundan los clastos gruesos, mientras que en la muestra POPO 15-04 el tamaño de los clastos aumenta considerablemente, no se observa imbricación y en la muestra POPO 15-05 se observa la terraza bien definida, (Figura 5.5).

Esta sección del depósito contiene un porcentaje de grava que va del 40.01 al 72.50 %, un porcentaje de arena en el rango de 27.08 y 59.55 %, mientras que los finos (limo y arcilla) representan menos del 1% (Tabla 5.1)

| Muestra | % Grava | % Arena | % Finos (Limo+arcilla) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| POPO 15-03 | 40.01 | 59.55 | 0.43 |
| POPO 15-04 | 72.50 | 27.08 | 0.40 |
| POPO 15-05 | 64.66 | 34.64 | 0.69 |

Tabla 5.1. Porcentajes de grava, arena y material fino de las muestras de la fase proximal.

El valor la media (ϕ) en las muestras POPO 15-03 y POPO 15-04 se encuentra entre -0.47 y -2.29 que representa un diámetro promedio en el rango de arena fina a gruesa, la desviación estándar calculada se encuentra entre 2.37 y 3.20 lo que corresponde a depósitos muy pobremente seleccionados y este parámetro aumenta en esta zona. El

grado de asimetría va de -0.34 a 0.09, que corresponde a curvas casi asimétricas e indica un enriquecimiento hacia los tamaños gruesos. El valor de la curtosis está entre 0.68 y 0.84, que representa curvas platicúrticas, donde las colas se encuentran mejor seleccionadas, mientras que la muestra POPO 15-05 muestra un valor de 2.09 que indica una curva muy leptocúrtica, es decir, que la parte central está mejor seleccionada que el resto. (Tabla 5.2).

| Muestra | Distancia (m) | Espesor (cm) | Media (ϕ) | Desviación estándar | Asimetría | Curtosis |
|------------|---------------|--------------|------------------|---------------------|-----------|----------|
| POPO 15-03 | 0 | 45 | -0.47 | 2.37 | -0.34 | 0.68 |
| POPO 15-04 | 89.96 | 92 | -2.96 | 3.01 | 0.28 | 2.09 |
| POPO 15-05 | 412.17 | 62 | -2.29 | 3.20 | 0.09 | 0.84 |

Tabla 5.2. Parámetros estadísticos de las muestras de la fase proximal.

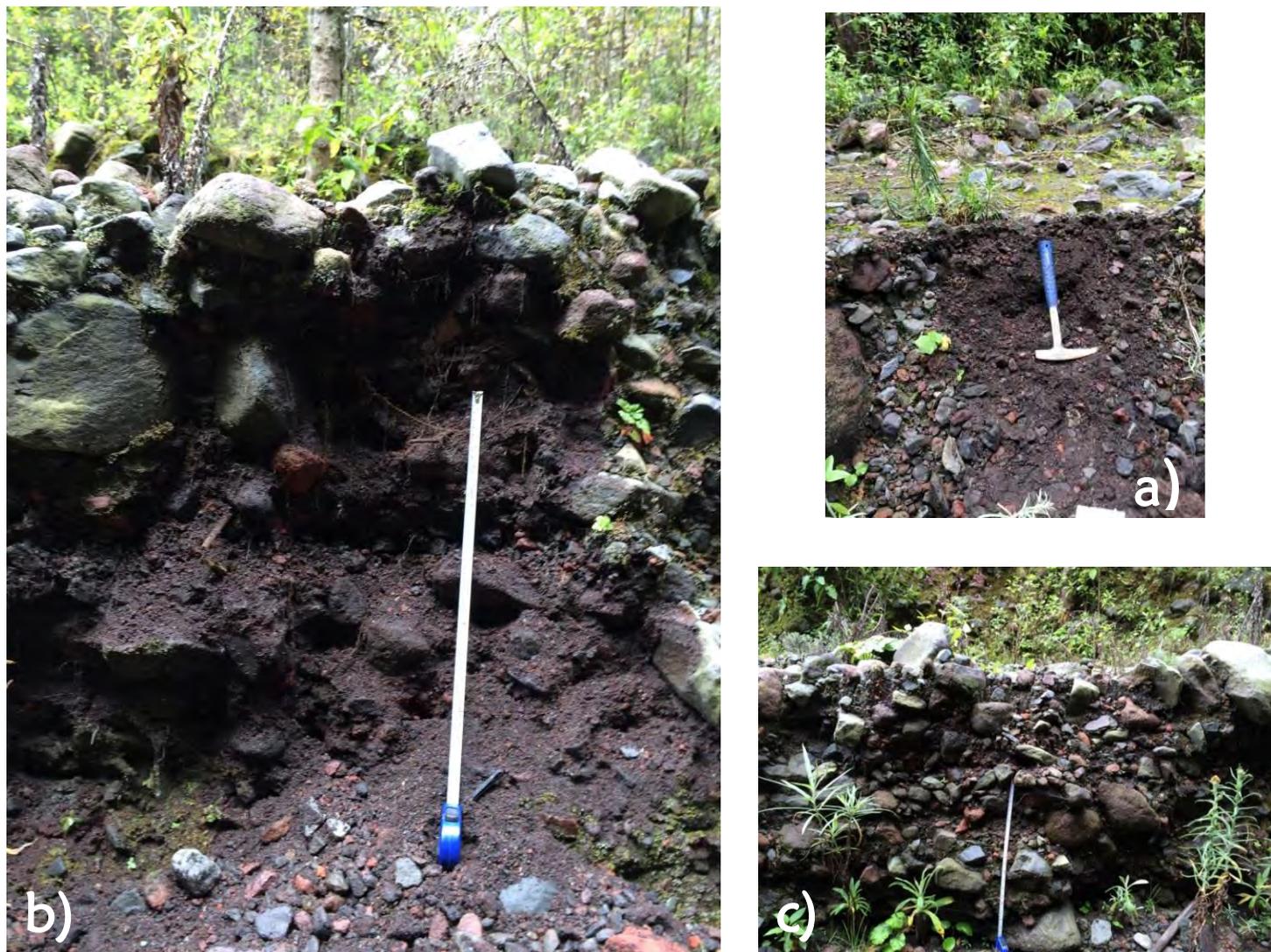


Figura 5. 5. Fotografías donde se muestran los depósitos estudiados, la cinta muestra 50 cm a) muestra POPO 15-03 el depósito en su mayoría está conformado por una matriz arenosa, b) POPO 15-04 se puede observar la terraza bien definida y presenta gradación inversa y c) POPO 15-05 la terraza está bien definida no se observa una gradación.

Zona distal

La zona distal comienza a los 3123 metros de altitud y a los 1300 m de distancia de iniciado el evento. La barranca es más ancha y sinuosa en esta parte y hay una mayor abundancia de árboles y troncos sobre el cauce. En esta parte se puede observar el depósito formando terrazas bien definidas. A continuación se describen las características de esta zona.

En esta fase se encuentran las muestras POPO 15-09, POPO 15-10 y POPO 15-11, su espesor varía de los 47 cm a los 128 cm, la distancia alcanzada va de los 1300 metros a los 1508 metros. En esta fase se observa un aumento en el tamaño de los clastos con respecto a la fase proximal, algunos clastos presentan imbricación (Figura 5.6).



Figura 5. 6. Fotografías donde se observan los depósitos de la fase distal a) POPO 15-09 representa el inicio de la fase distal, compuesta en su mayoría por arena, b) POPO 15-10 compuesta en su mayoría por arenas no se ve definida la terraza y c) POPO 15-11 la terraza se ve bien definida los clastos presentan cierta imbricación.

Los histogramas granulométricos representan distribuciones bimodales para todas las muestras de la fase distal. La muestra POPO 15-09 tiene modas en 2 ϕ , 1 ϕ y 0 ϕ . La muestra POPO 15-10 tiene una moda dominante es 2 ϕ , seguido de modas en 3 ϕ y 1 ϕ . Y la muestra POPO 15-11 tiene modas en -3 ϕ y 4 ϕ .

Las curvas de acumulación (Figura 5.7) muestran que la mayor acumulación de clastos se encuentra en el rango de -2 ϕ a 1 ϕ , que representa al tamaño de guijarros y arenas. Esto se observa en las muestras POPO 15-09 y POPO 15-10 y representa poco más del 50% del material que constituye el depósito, mientras que la muestra POPO 15-11 tiene una tendencia al tamaño del guijarro representando casi el 50% del material.

Figura 5.7. Curvas acumulativas para la fase distal, obtenidas mediante la aplicación de los métodos de tamizado e intersecciones de Rosiwal.

En esta fase abunda la arena con un porcentaje que va del 58.3 % al 66.74%, seguido de las gravas con un porcentaje del 31.97% al 64.75% y el porcentaje de material fino aumentó con respecto a la fase proximal sin embargo este porcentaje fue muy pequeño alcanzando el 1.60% (Tabla 5.3).

| Muestra | % Grava | % Arena | % Finos (Limo+arcilla) |
|------------|---------|---------|------------------------|
| POPO 15-09 | 39.99 | 58.39 | 1.60 |
| POPO 15-10 | 31.97 | 66.74 | 1.28 |
| POPO 15-11 | 64.75 | 64.75 | 0 |

Tabla 5. 3. Porcentajes de grava, arena y material fino de las muestras de la zona distal.

Los valores de la media nos indican que en esta fase abundan las arenas gruesas, la desviación estándar se encuentra entre 2.24 y 3.68 lo que nos indica que es un depósito muy pobremente seleccionado, el grado de asimetría arrojó valores que van de lo altamente asimétrico grueso a lo asimétrico fino. Los valores de la curtosis nos indican que se trata de una curva platicúrtica (Tabla 5.4).

| Muestra | Distancia (m) | Espesor (cm) | Media (ϕ) | Desviación estándar | Asimetría | Curtosis |
|------------|---------------|--------------|------------------|---------------------|-----------|----------|
| POPO 15-09 | 1300.04 | 86 | -1.43 | 3.53 | -0.46 | 0.67 |
| POPO 15-10 | 1370.12 | 128 | -0.91 | 3.68 | -0.67 | 0.64 |
| POPO 15-11 | 1508.24 | 47 | -2.09 | 2.24 | 0.27 | 0.69 |

Tabla 5. 4. Parámetros estadísticos de las muestras de la fase distal.

En general el análisis de los parámetros sedimentológicos nos indican que el lahar mantiene sus características granulométricas a lo largo de su trayecto, como lo muestra la figura 5.8 donde la desviación estándar, asimetría y curtosis tienen una tendencia similar a lo largo de la distancia, mientras que la media cambia un poco en la muestra POPO 15-04 lo que nos indica una diferencia en el diámetro de las partículas con respecto a las otras muestras.

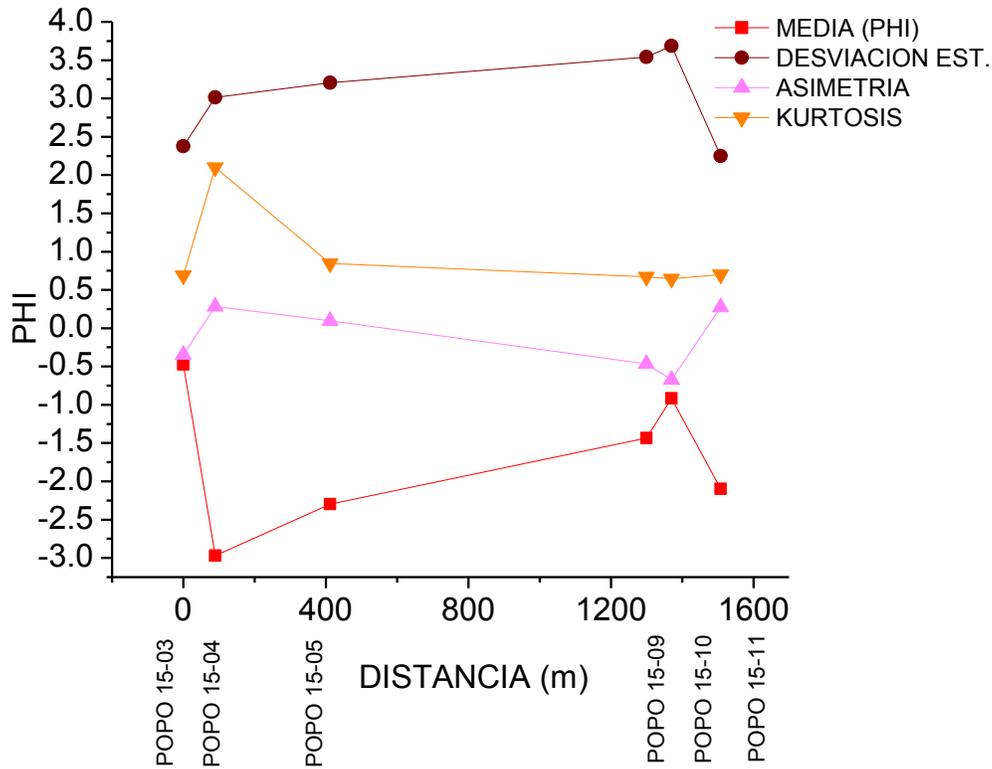


Figura 5.8. Parámetros estadísticos: media, desviación estándar, curtosis y asimetría graficados contra la distancia.

Al graficar las porciones de grava, arena y finos de la parte proximal y distal en un diagrama ternario (Figura 5.9) se puede observar claramente una tendencia de las muestras POPO 15-04, POPO 15-05 y POPO 15-11 a migrar hacia la fracción de la grava mientras que las muestras POPO 15-03, POPO 15-09 y POPO 15-10 tienden a estar más hacia las arenas. En la parte proximal todas las muestras tienen menos del 1% de material fino, mientras que en la parte distal este incrementa a 1.6 % en la muestra POPO 15-09.

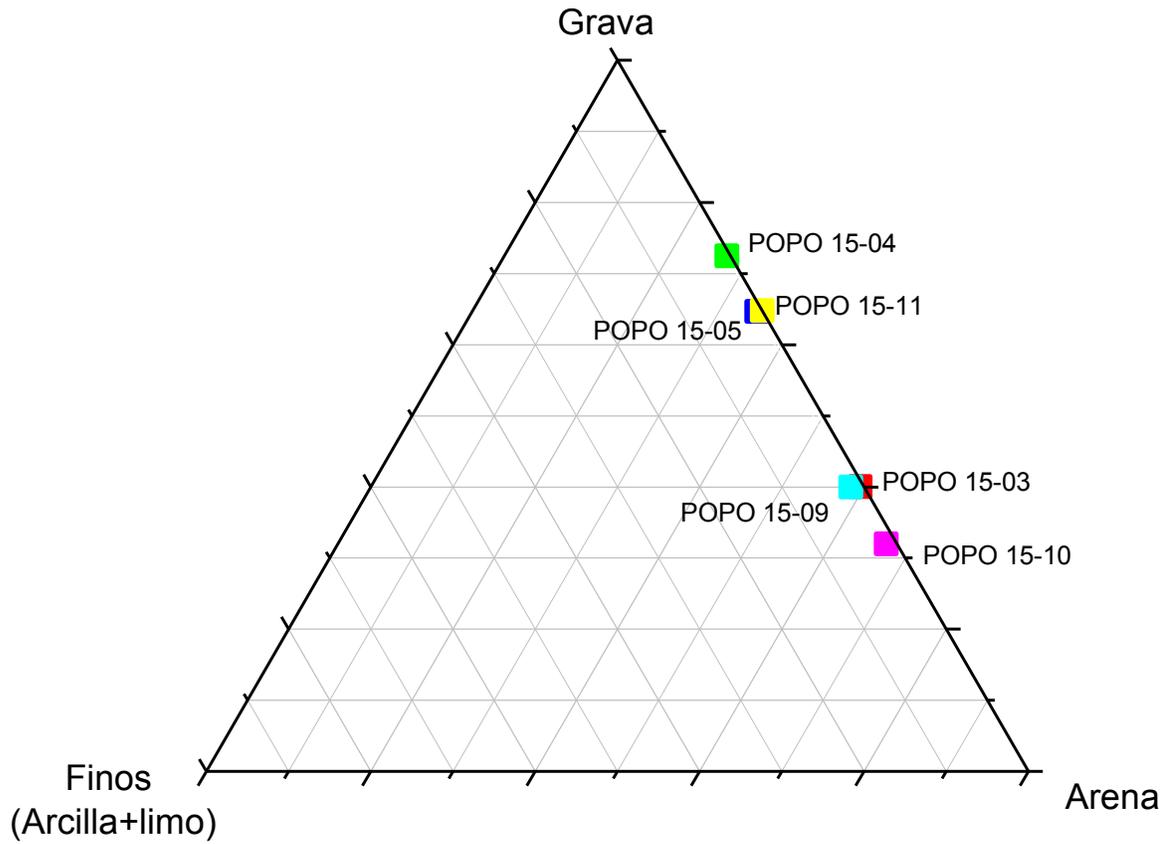


Figura 5.9. Diagrama ternario, donde se puede observar cierta tendencia de las muestras a estar hacia un tamaño de partículas.

En la figura 5.10 se puede observar cómo fue la trayectoria que siguió el lahar a lo largo del cauce de la barranca Nexpayantla, de acuerdo a las características texturales antes mencionadas y a los histogramas, podemos deducir que en el punto de inicio del lahar, el punto POPO 15-03, tiene características texturales de un flujo hiperconcentrado y a los 90 metros aproximadamente este comienza a tener características texturales de un flujo de escombros, el cual continúa a lo largo de su trayecto hasta alcanzar los 1500 metros, donde ya no se observa el depósito.

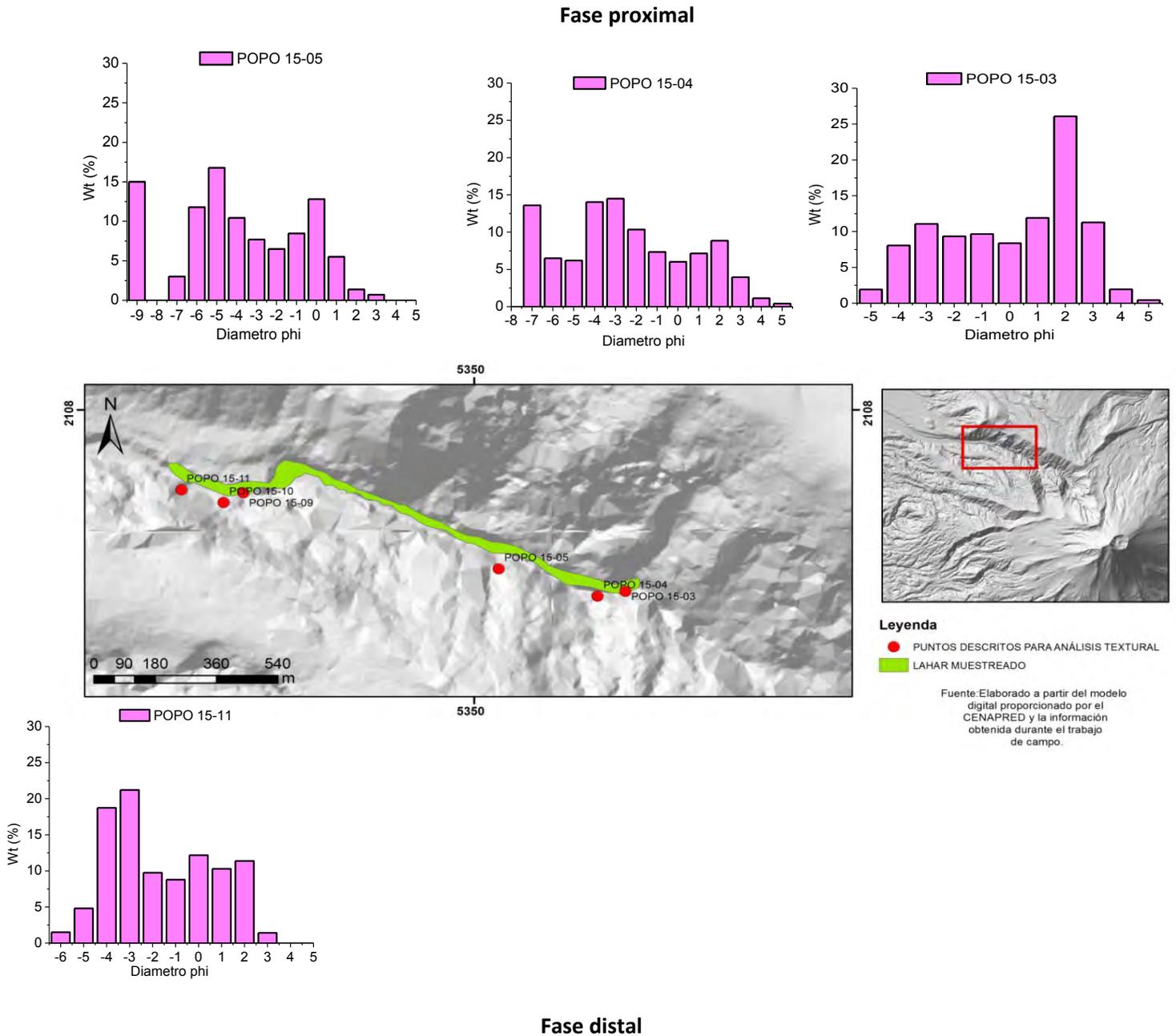


Figura 5.10. Histogramas granulométricos donde se puede inferir el comportamiento del lahar a lo largo de la trayectoria que siguió.

5.3. Mecanismo disparador

El lahar Nexpayantla, fue un evento disparado por lluvias, dado que no hay un reporte de un pico en la actividad explosiva durante el evento, por lo que se considera un lahar secundario. En el estudio de estos eventos uno de los aspectos más importantes al considerar su origen es la duración de las precipitaciones y la cantidad total que reciben las cabeceras de las barrancas y el cauce. Diversos autores han realizado estudios de esta índole en varios volcanes del mundo, llegando a establecer umbrales en la intensidad de las precipitaciones. Así por ejemplo, Lavigne (1998) reporta una precipitación de 33 mm/hora para la generación de un lahar en el volcán Merapi (Indonesia), Iwamoto (1996) estima valores de 7 mm/hora para los lahares del Unzen (Japón) y Barclay et al. (2007) señalan una relación entre los lahares generados en Isla Monserrat, con precipitaciones superiores a los 10 mm en 24 horas. Para el caso de México Vázquez et al. (2014) señalan precipitaciones máximas de 95 mm/h en el volcán de Colima.

Para determinar el umbral de lluvia para formar el lahar Nexpayantla, se emplearon los datos pluviométricos normalizados, las medias y extremas mensuales de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional más cercanas al volcán Popocatepetl (Figura 5.11 y tabla 5.5). Dichos datos representan las cantidades de precipitación en 24 horas, estos datos son los más precisos que se poseen, lamentablemente las estaciones no reportan las precipitaciones en intervalos de tiempo más cortos como horas o minutos, lo que sería ideal para relacionar la intensidad de la precipitación con la producción de un lahar.

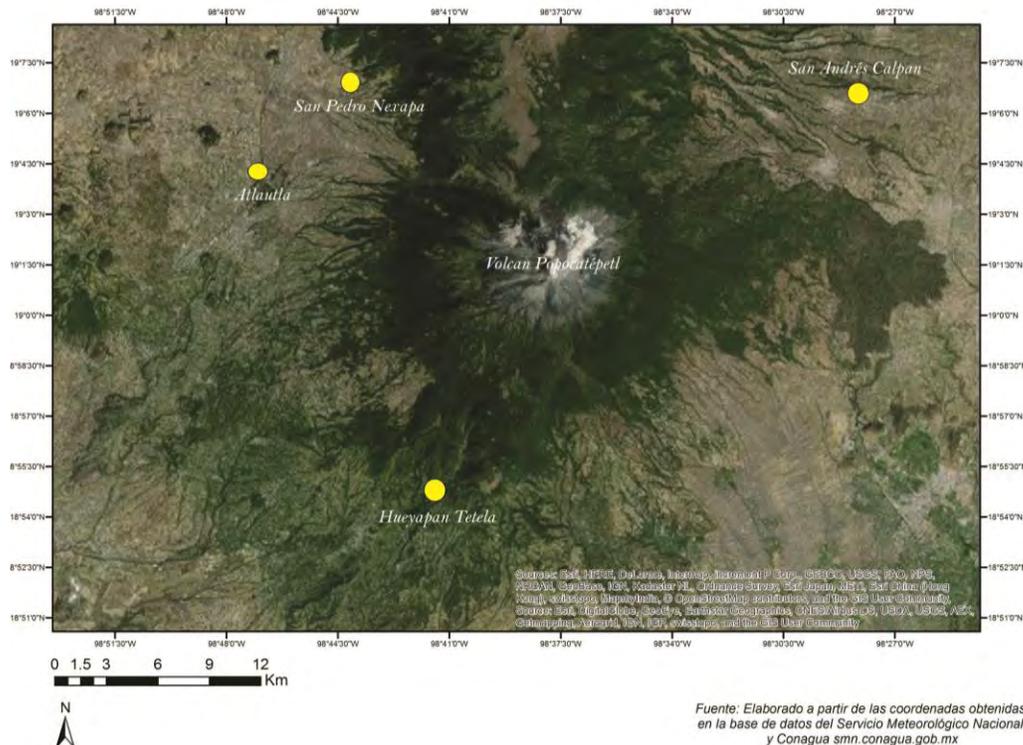


Figura 5.11. Mapa donde se muestra la localización de las estaciones meteorológicas más cercanas al volcán Popocatepetl.

| NOMBRE | LATITUD | LONGITUD | ALTITUD (m snm) | MUNICIPIO/ESTADO |
|-------------------|---------|----------|--------------------|----------------------------|
| San Pedro Nexapa | 19.0836 | -98.7383 | 2,620 | Amecameca/Estado de México |
| Atlautla | 19.0269 | -98.7797 | 2,350 | Atlautla/Estado de México |
| Hueyapan | 18.885 | -98.6903 | 2,285 | Tetela del volcán/Morelos |
| San Andrés Calpan | 19.1056 | -98.4636 | 2,317 | Calpan/Puebla |

Tabla 5.5. Datos de la ubicación de las cuatro estaciones de las que se tomaron datos (CNA-SMN. 2015).

Los datos de las medias y extremas mensuales obtenidos de las estaciones (Figura 5.12) indican que los meses más lluviosos son de mayo a octubre, julio el más lluvioso presentó precipitaciones de hasta 141.5 mm en la estación San Pedro Nexapa y 132 mm en San Andrés Calpan mientras que la temporada seca va de noviembre-abril con diciembre y noviembre los meses más secos.

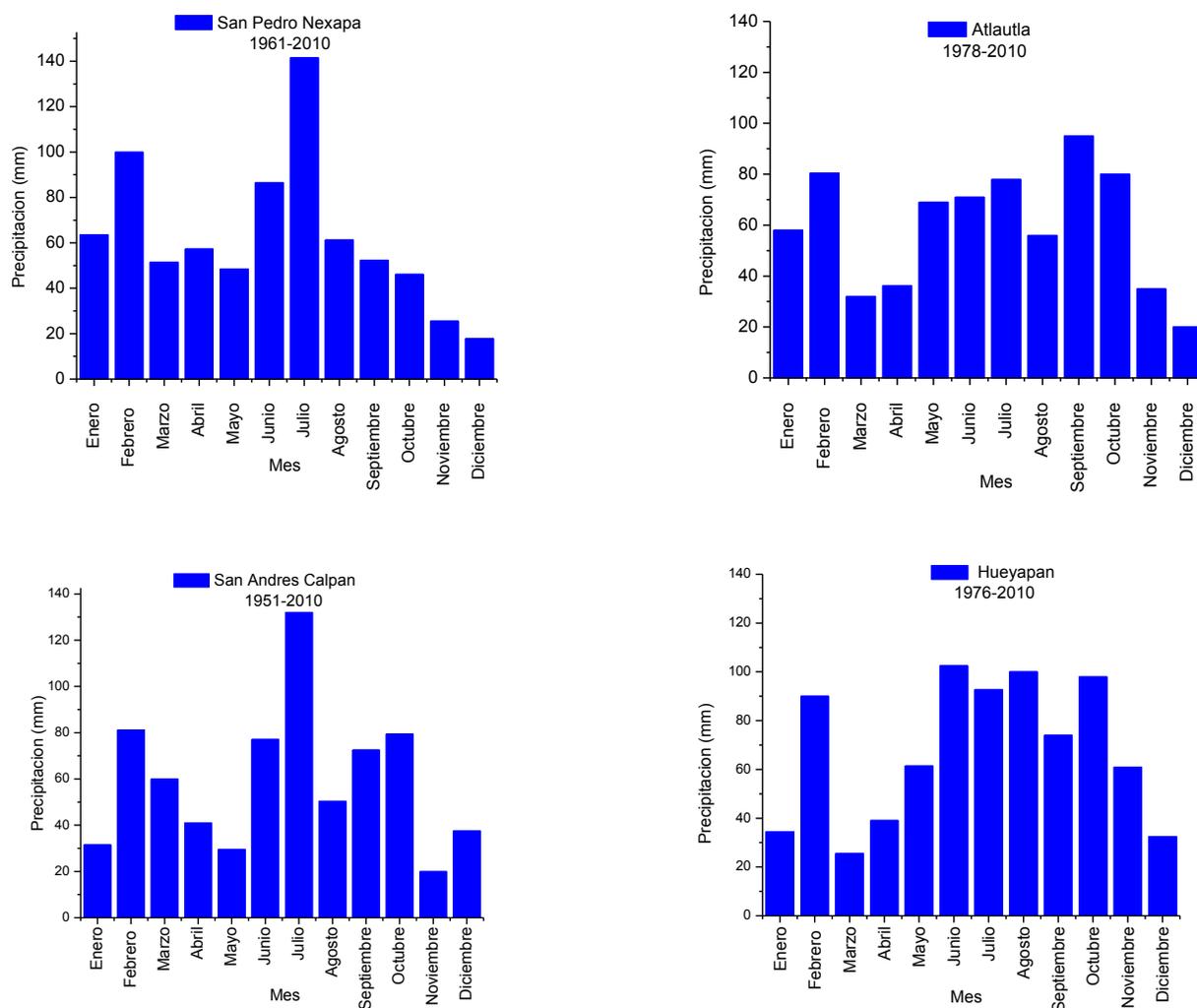
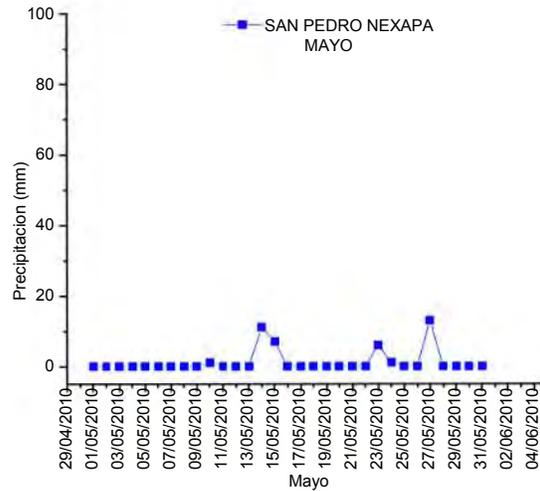
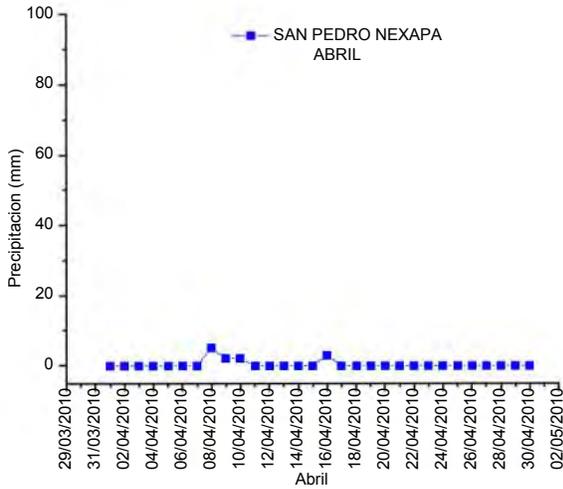
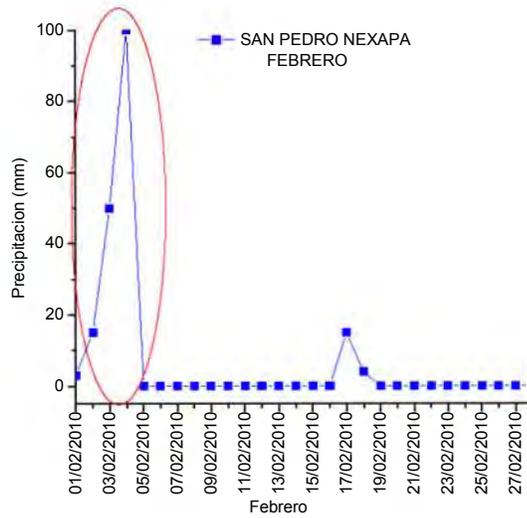
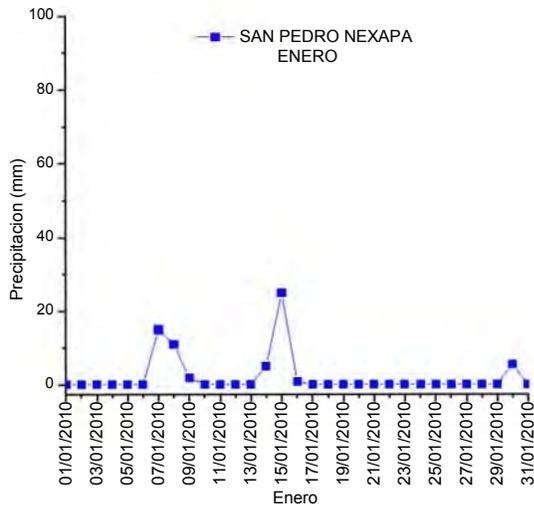


Figura 5.12. Gráficas de los datos de las medias y extremas mensuales de las cuatro estaciones (CNA-SMN. 2015).

Dado que sólo se conocía el año de ocurrencia del lahar (comunicación personal, CENAPRED) y no la fecha exacta, se analizaron los registros de precipitación de las estaciones antes mencionadas y se encontró que las fechas probables son en febrero, junio y julio (Figura 5.13).



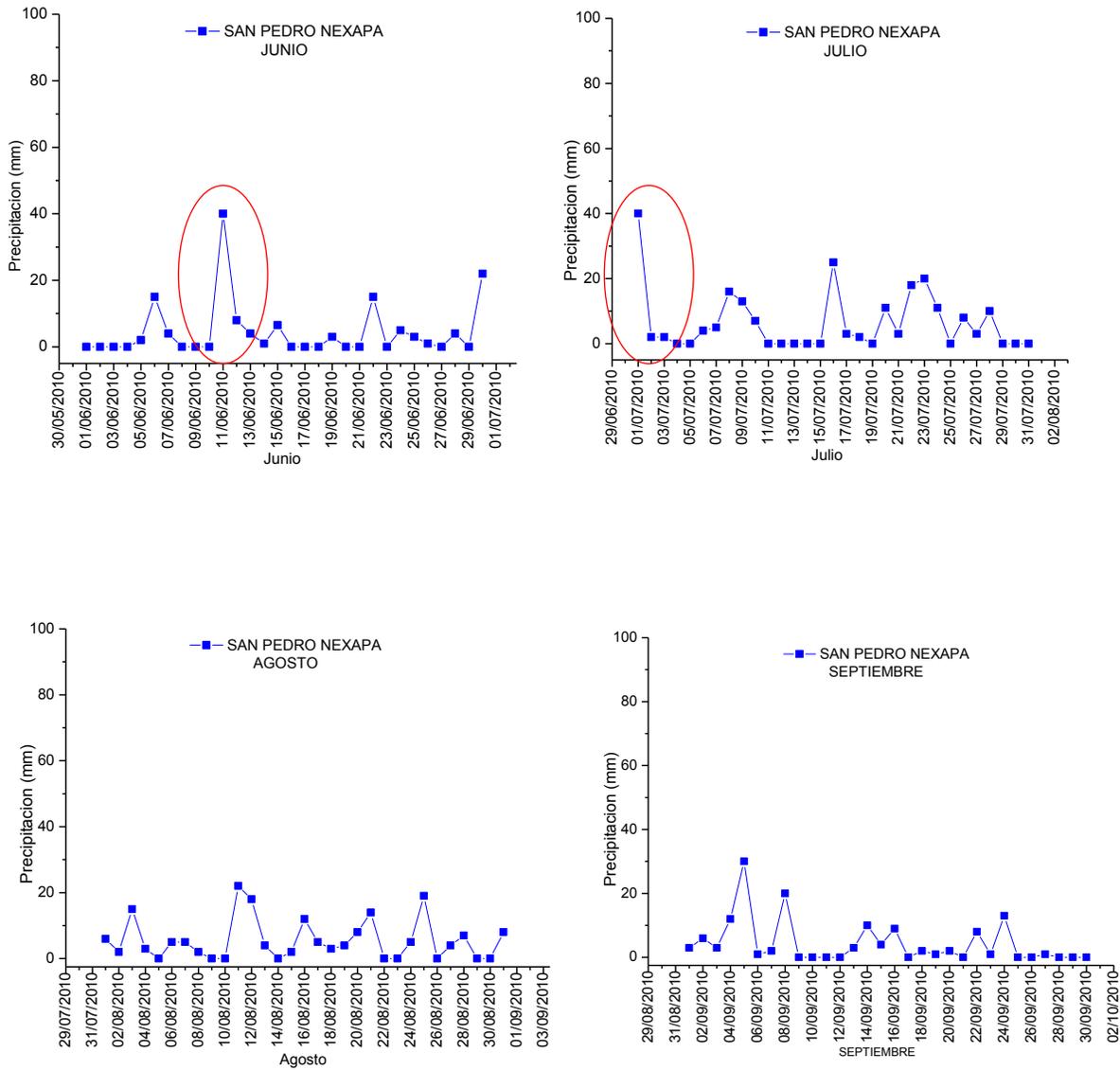


Figura 5.13. Gráficas donde se muestra la precipitación para el año 2010 en la estación San Pedro Nexapa y donde se observa un pico anómalo para el mes de febrero (CNA-SMN. 2015).

Posteriormente, se buscaron imágenes satelitales para observar si existían evidencias de este evento que coincidieran con los picos observados de la precipitación. Integrando ambos tipos de datos, se encontró que dicho evento se generó entre el 21 de enero y el 26 de marzo del 2010. Se tomó en cuenta el valor máximo de precipitación registrado en estos días, en este caso, los valores para el mes de febrero fueron los más altos que se registraron en el año.

Los datos arrojan que el valor máximo de la precipitación ocurrió en el mes de febrero, que se considera dentro de la temporada seca. El valor más alto de precipitación se registró el día 4 de febrero en todas las estaciones, en la estación San Pedro Nexapa, se registraron 100 mm, seguido de Hueyapan con 90 mm, San Andrés Calpan con 81.5 y Atlautla registro 80.5 mm. Por lo tanto, se considera el día 4 de febrero del 2010 como la fecha más probable de la ocurrencia del lahar. Los datos se presentan en la figura 5.14 y en la tabla 5.6.

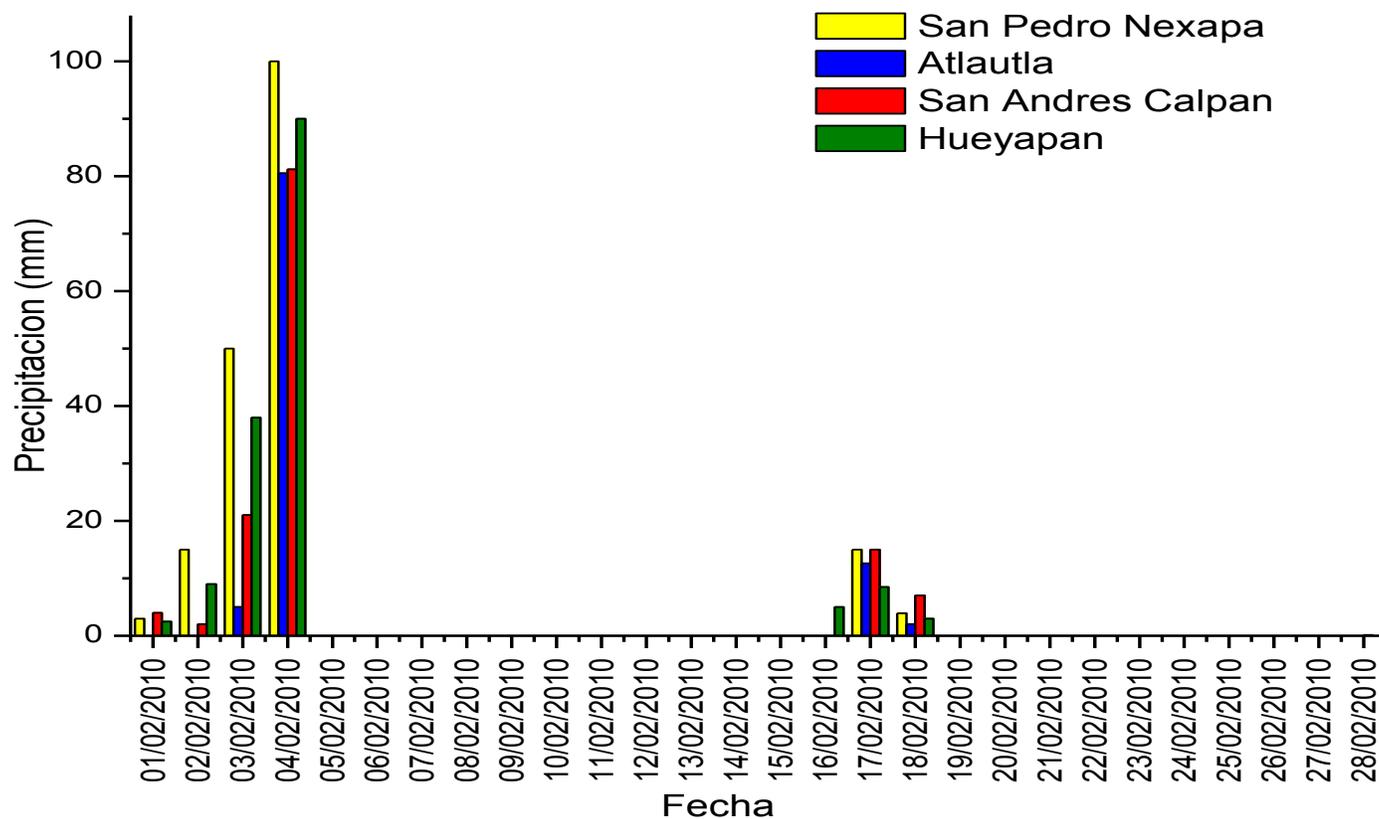


Figura 5.14. Gráfica donde se muestran los datos para el día más lluvioso del año 2010.

| ESTACIÓN | DÍA | | | | |
|-------------------|-----|----|----|-------------|----|
| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 |
| San Pedro Nexapa | 3 | 15 | 50 | 100 | 0 |
| Atlautla | 0 | 0 | 5 | 80.5 | 0 |
| Hueyapan | 2.5 | 9 | 38 | 90 | 0 |
| San Andrés Calpan | 4 | 2 | 21 | 81.2 | 0 |

Tabla 5. 6. Datos para el día más lluvioso del año 2010.

Para cerciorarse de que la lluvia ocasionó el lahar y no actividad eruptiva del Popocatepetl, se analizaron los reportes emitidos por el CENAPRED para esta fecha (anexo C), en el cual se registraron 9 exhalaciones de baja intensidad y dos sismos. De igual manera el reporte menciona lluvias intensas que podrían generar el arrastre de materiales sólidos.

5.4. Análisis de imágenes satelitales ASTER

La combinación entre el trabajo de campo y el análisis tanto de fotografías aéreas como de imágenes de satélite es adecuado para el análisis de los lahares, ya que podemos distinguir entre el depósito reciente y el depósito tiempo después y observar si es que ha sufrido algún cambio.

Las imágenes ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) son captadas por el satélite Terra de la NASA a una distancia de 705 kilómetros con un ciclo de 16 días y tiene un ancho de barrido de 60 kilómetros. ASTER está compuesto por tres subsistemas VNIR (visible and near infrared), SWIR (shortwave infrared) y TIR (thermal infrared) conformando un total de 14 bandas en el espectro electromagnético. Estas imágenes se caracterizan por poseer una mayor resolución espectral que las convencionales imágenes multiespectrales. Específicamente, se utilizó una imagen normal (color natural) y una imagen VNIR (visible and near infrared) con una resolución de 15 m.

Con el objetivo de corroborar las fechas establecidas a partir del análisis de la precipitación y de visualizar el alcance del evento, se analizaron imágenes satelitales tipo ASTER en fechas cercanas a los picos de lluvia observados en las estaciones. Se observaron evidencias de un evento en las imágenes con fecha 21 de enero de 2010, a las 5:24 pm y en la imagen del 26 de marzo del 2010 a las 5:14 pm. Tabla 5.6.

| | |
|--------------------|--|
| Tipo de satélite | ASTER (Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer) |
| Fecha de toma | 21 de enero de 2010 y 26 de marzo de 2010 |
| Bandas | Subsistema VNIR |
| Resolución | 15 m |
| Cobertura de nubes | 2% y 0% |
| Tipo de proyección | Universal Transversa de Mercator - Zona 14 |
| Datum | WGS84 |
| Esferoide | WGS84 |

Tabla 5. 7. Características de las dos imágenes ASTER utilizadas en este trabajo.

En la figura 5.15 se puede observar la barranca Nexpayantla, la imagen inferior corresponde al subsistema VNIR en las bandas 1,2 ,3N del día 21 de enero de 2010 y la imagen superior corresponde a la banda visual en las bandas 3N, 2,1 (RGB), ambas con una cobertura de nubes del 2%. La imagen ASTER visual en la combinación de bandas 3N, 2,1 nos muestra una imagen de color natural, es decir, refleja el área tal como la observa el ojo humano. En ella podemos notar que la barranca se encuentra cubierta de vegetación mostrada en color verde. En la imagen del subsistema VNIR en las bandas 3N, 2,1 podemos notar la vegetación en color rojo. Ambas imágenes son anteriores a la ocurrencia del lahar.

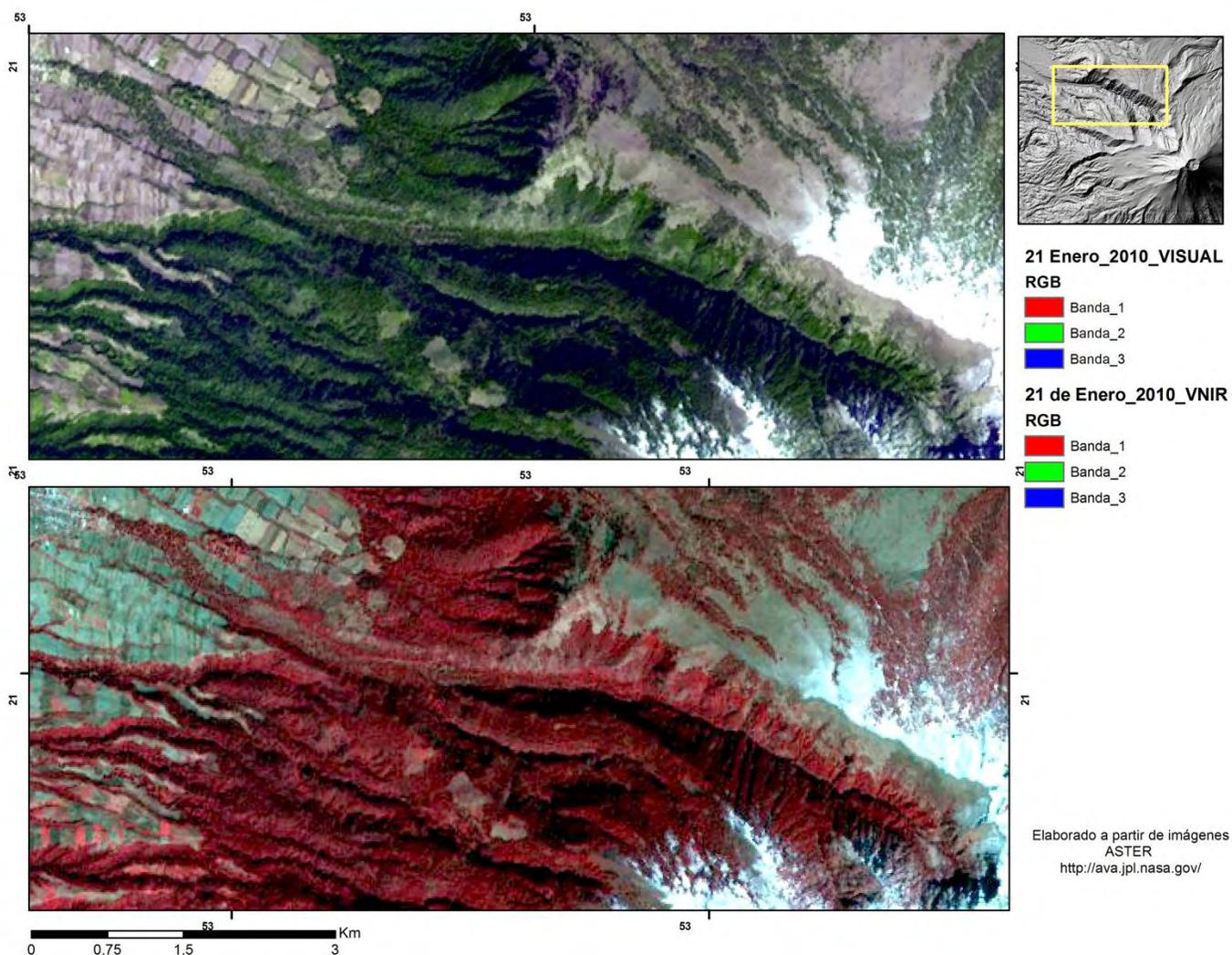


Figura 5. 15. Visualización de la imagen del subsistema VNIR en combinación de bandas 1, 2, 3 N e imagen visual en combinación de bandas 3N, 2,1 (RGB) del 21 de enero del año 2010 antes del evento aquí estudiado.

En la figura 5.16 podemos observar la imagen inferior que corresponde al subsistema VNIR en las bandas 3N, 2,1 (RGB) del 26 de marzo de 2010 a las 5:14 pm y la imagen superior corresponde a la banda visual en las bandas 1, 2,3N ambas con una cobertura de nubes de 0%. En ambas se puede observar el depósito del lahar “Nexpayantla”. Tomando en cuenta estas imágenes, se encontró que dicho evento se generó entre el 21 de enero y el 26 de marzo del 2010, reafirmando la fecha del 4 de febrero arrojada por los datos de lluvia. En estas imágenes también se puede observar que es notable que el depósito está ligado a las cicatrices de los procesos de remoción en masa.

El estudio de las imágenes ASTER también ayudó a observar la clara diferencia entre el alcance del evento observado en la imagen y el alcance del depósito. Básicamente el depósito observado en campo es la mitad del alcance verdadero mostrado en las imágenes, lo cual tiene implicaciones importantes relacionadas con la evaluación del peligro, como se tratará en el capítulo siguiente.

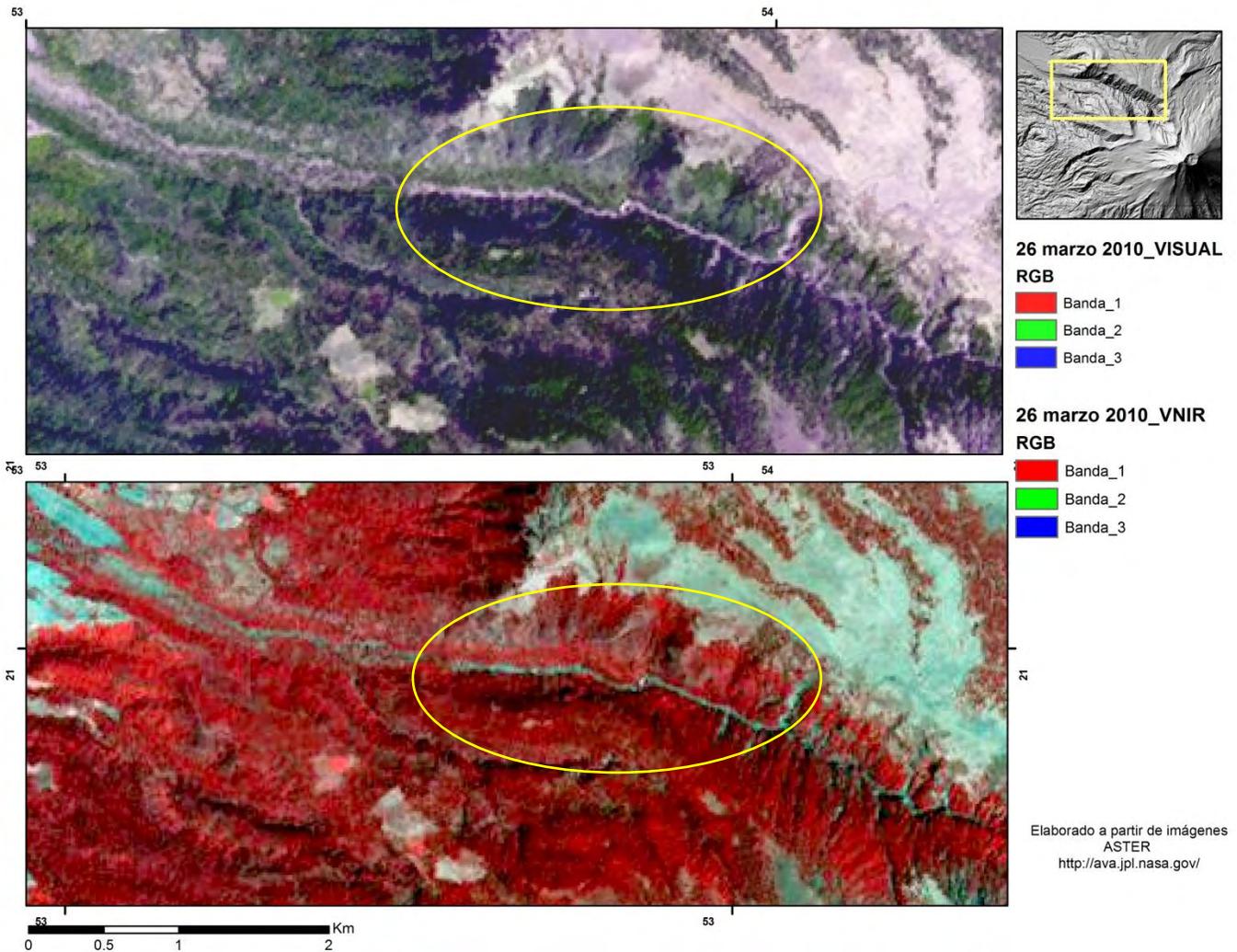


Figura 5. 16. Visualización de la imagen del subsistema VNIR en combinación de bandas 1, 2, 3 N e imagen visual en combinación de bandas 3N, 2,1 (RGB) del 26 de marzo del año 2010 donde ya se puede observar el depósito del lahar.

5.4.1. Material fuente

Durante el trabajo de campo se observaron diversos procesos asociados al desprendimiento de material (Figura 5.17) de las paredes de la barranca (procesos de remoción en masa PRM), los cuales se encuentran desde la cabecera de la barranca hasta su desembocadura, estos procesos tienen alturas variadas desde unos metros hasta decenas de ellos.



Figura 5.17. Fotografía de uno de los procesos de remoción en masa que se observaron en campo.

En la imagen 5.18 se muestran algunos de ellos, los cuales fueron delimitados mediante imágenes satelitales, en esta imagen se puede observar como el inicio del lahar Nexpayantla está asociado a un proceso de remoción en masa (PRM3), el cual es el más grande observado en la barranca. Así mismo se pueden observar diversos procesos que pudieron alimentar al lahar (PRM4 y PRM5) durante su movimiento. Es importante mencionar esto ya que estos procesos son frecuentes en la barranca y podrían favorecer la formación de lahares en el futuro.

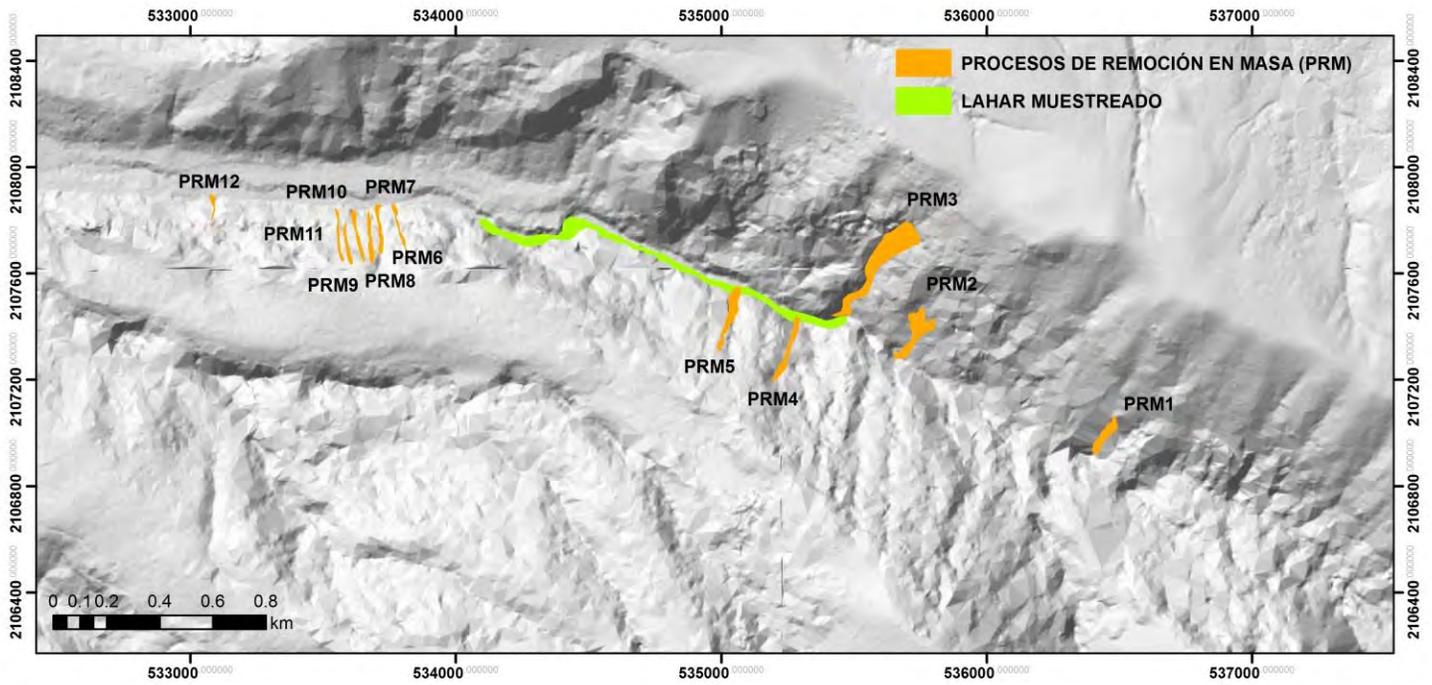


Figura 5.18. Mapa donde se muestran los procesos de remoción en masa que se delimitaron con ayuda de imágenes satelitales, ArcGis 10.2 y Google Earth).

5.5. Monitoreo Acústico de Flujos (AFM)

El Centro Nacional de Prevención de Desastres cuenta con estaciones de monitoreo acústico de flujos (AFM por sus siglas en inglés) (Figura 5.19). Estas estaciones están localizadas de la siguiente manera, la estación Canario (PFM1) se encuentra en la parte alta de la barranca Tenenepanco a 4170 m de altitud, la estación Zorzal (PFM2) en la parte alta de la barranca Espinera a una altitud de 3985 m y la estación Unión (PFM3) donde confluyen las dos barrancas anteriores.

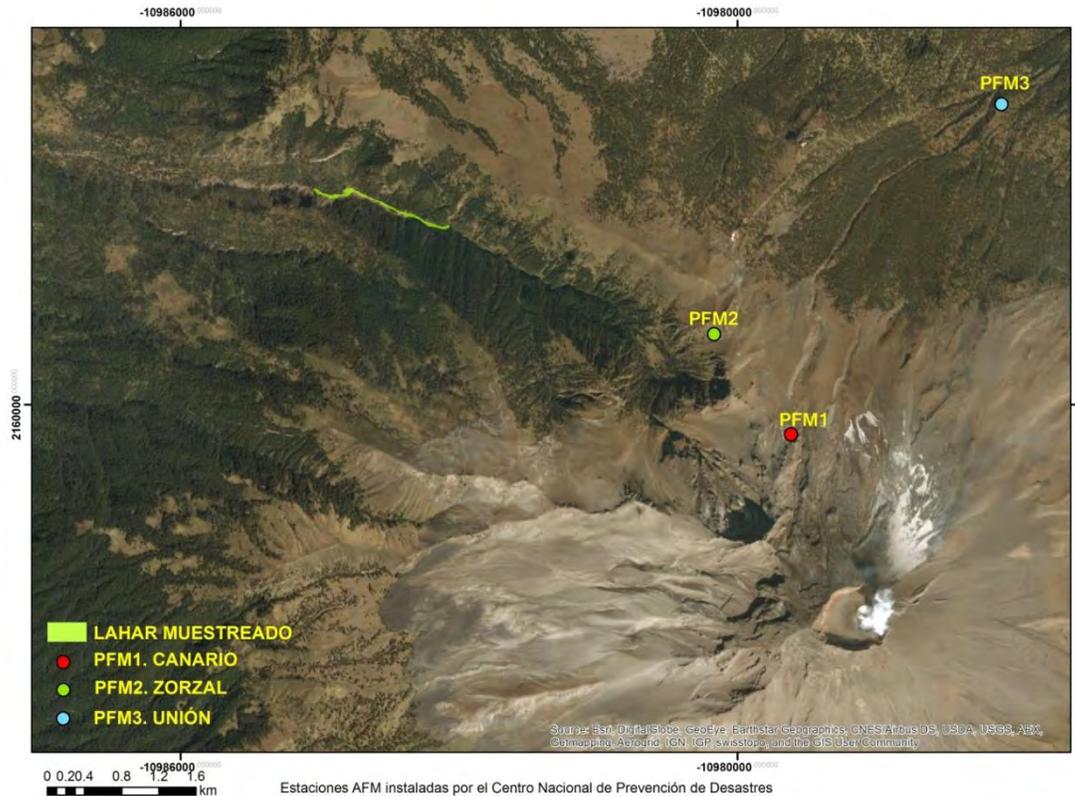


Figura 5.19. Ubicación de las estaciones de Monitoreo Acústico de Flujos.

Estas estaciones detectan las vibraciones de los flujos cuando pasan cerca de ellas. Los AFM trabajan en tres bandas de frecuencia: banda completa (10-250 Hz), banda alta (100-250 Hz) y la banda baja (10-100 Hz). La mayoría de los lahares (flujos de escombros y flujos hiperconcentrados) generan frecuencias en el rango de 30 a 80 Hz, mientras que una corriente fluvial genera frecuencias más altas.

Una vez analizados los datos de las estaciones, proporcionados por el Departamento de Vulcanología del CENAPRED se encontró un evento (Figura 5.20). Dicho evento se registró en la estación PFM1 Canario el día 4 de febrero del año 2010 a las 21:56 hora GMT y terminó a las 23:57, este evento se toma en cuenta debido al umbral de duración (2 horas

aproximadamente) y a la banda donde se registró mejor (Anexo D). Por lo tanto, estas lluvias generaron lahares en varias barrancas del Popocatépetl y no solo en la barranca Nexpayantla.

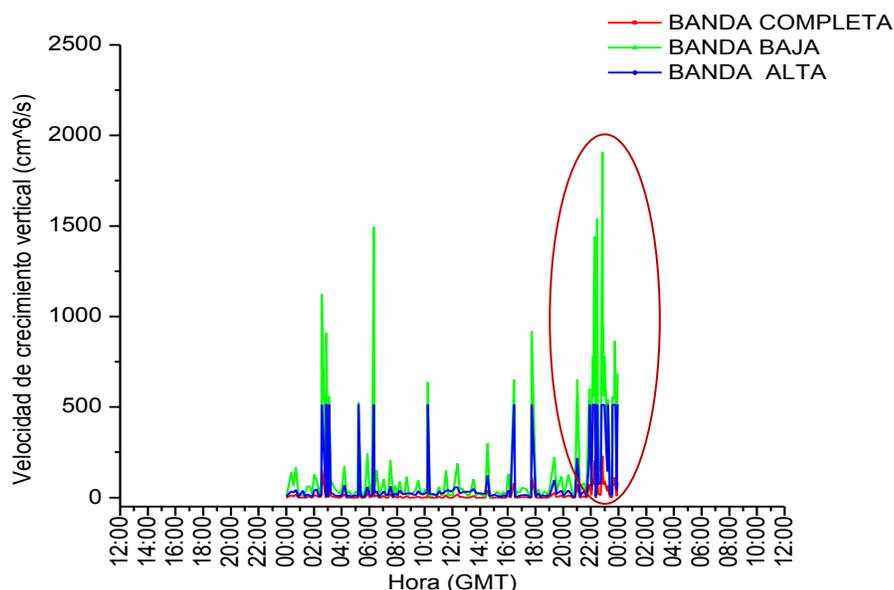


Figura 5.20. Datos que representan un posible evento de lahar el día 4 de febrero de 2010, registrado en la estación PFM1, en verde se representa a la banda baja donde se representan mejor los lahares.

5.6. Simulación numérica

La reconstrucción de un evento eruptivo, en este caso los lahares, se fundamenta en el estudio de los depósitos asociados, cuyo propósito es caracterizar el evento y estimar propiedades como el alcance, velocidad y la profundidad, para delimitar zonas de inundación. Para hacer una evaluación del peligro, los datos de campo se complementan con simulaciones numéricas y así conseguir una zonificación más precisa. Para este estudio se utilizó el modelo matemático FLO-2D, calibrando el modelo con datos tomados en campo.

5.6.1. Morfología del sector NW del volcán Popocatépetl

Un factor muy importante a la hora de realizar simulaciones son las características de la topografía de la barranca, ya que influyen directamente con la trayectoria de los flujos que se generan sobre ella, por lo que es muy importante una descripción morfológica del sector NW para definir cambios topográficos que controlen el emplazamiento de dichos flujos.

La barranca Nexpayantla se sitúa dentro de la cuenca que drena hacia el poblado de San Pedro Nexapa, dicha cuenca tiene una extensión de 17.6 km, área de 21.7 km², una

profundidad de 500 m aproximadamente, un perímetro de 33.2 km y la orden de la red hídrica es de 3. El mapa de pendientes (Figura 5.21) muestra que dentro podemos encontrar pendientes abruptas mayores a 70° en la parte alta de la barranca, donde comienza el cono, pendientes entre los 30 y 45° en las paredes internas y en menor grado, pendientes por debajo de los 15° en la parte inferior de la barranca. Esta distinción es fundamental ya que limitan una zona de alimentación caracterizada por las zonas de mayor pendiente donde ocurren los procesos de inestabilidad de laderas que, para el caso del lahar Nexpayantla, sirven como fuente de material. Por otro lado, existe una zona de deposición, donde el material depositado a partir de lahares y corrientes fluviales se deposita.

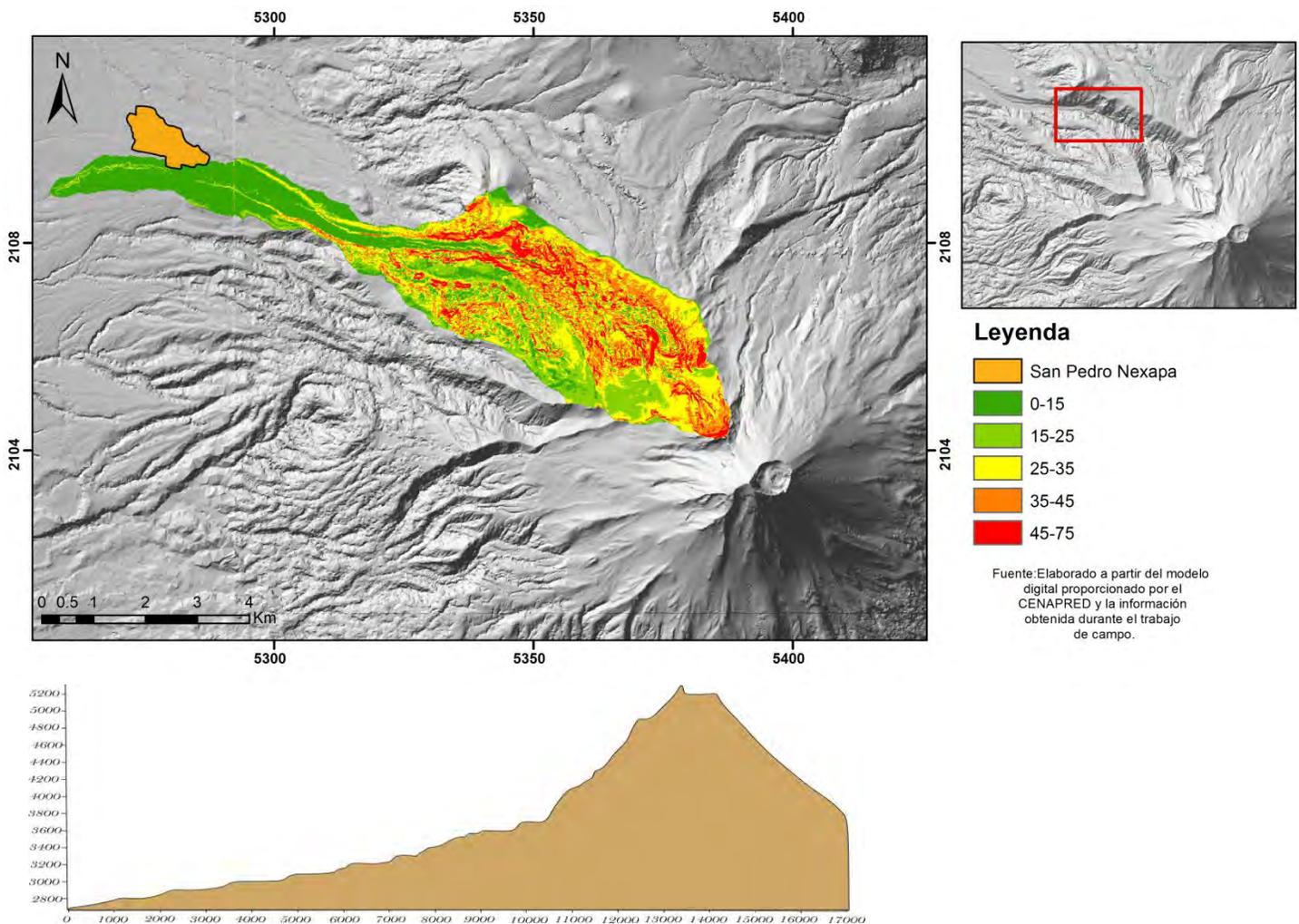


Figura 5. 21. Mapa de pendientes y perfil del volcán Popocatepetl.

5.6.2. Datos de entrada

Como se mencionó anteriormente, para las simulaciones se utilizó un DEM de 3 metros de resolución. Para obtener el coeficiente de rugosidad de Manning, se tomaron en cuenta las características físicas de la barranca Nexpayantla y los coeficientes fueron calculados por zonas como se muestra en la figura 5.22. Cada sección presenta diferencias en rugosidad, vegetación, obstrucciones y sinuosidad.

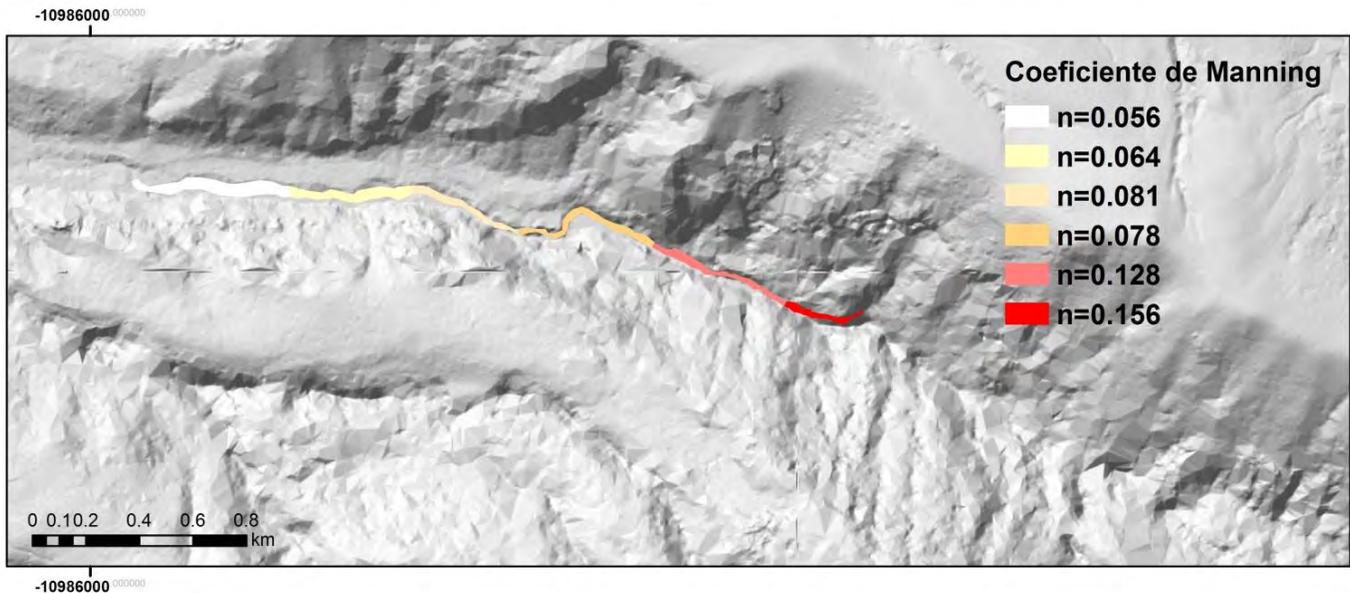


Figura 5. 22. Distribución de los valores del coeficiente de Manning utilizados en las simulaciones.

Uno de los parámetros de entrada más importantes que requiere el software FLO-2D para las simulaciones son los coeficientes para predecir la viscosidad y la resistencia crítica del flujo. Estos coeficientes reológicos α y β están relacionados con la concentración de sedimentos (C_v) de la siguiente forma:

$$\mu = \alpha_{\tau} \cdot e_{\tau}^{\beta C_v}$$

$$\tau_y = \alpha_{\eta} \cdot e^{\beta_{\eta} C_v}$$

Para simular el evento de 2010 se utilizaron coeficientes para lahares con bajo contenido de material fino, para la viscosidad μ , se usó un coeficiente $\alpha_{\eta} = 0.0648$ y un exponente $\beta_{\eta} = 6.20$, y para la resistencia crítica τ_y se usó un coeficiente $\alpha_{\tau} = 0.0765$ y un exponente $\beta_{\tau} = 6.19$. Donde α y β son coeficientes empíricos definidos experimentalmente por O'Brien y Julien (1988).

El último parámetro de entrada es el número de Froude y se estableció para todas las simulaciones en 0.9 lo que define a un flujo subcrítico.

5.6.3. Resultados FLO-2D

Una vez obtenidas las simulaciones estas se visualizaron mediante el software Mapper ++ (Figura 5.23) y se pueden consultar los datos mediante un resumen (apéndice F). La simulación final fue validada con base en la información obtenida a partir de las imágenes ASTER y los datos de campo y se compararon los espesores del depósito con la profundidad del lahar simulado.



Figura 5. 23. Máxima profundidad del flujo (Max Flow Depth), obtenida con FLO-2D y visualizada mediante Mapper ++.

Es importante mencionar que los valores que se obtienen de las simulaciones corresponden a los espesores del flujo es decir agua y sedimento y no del depósito. Las simulaciones de los flujos corresponden a flujos hiperconcentrados y flujos de escombros con una relación entre sedimento y agua de aproximadamente 0.5.

Los resultados de la simulación se muestran en la figura 5.24. Se compararon aspectos entre la simulación y los datos obtenidos en campo para observar la precisión de la simulación: distribución espacial, profundidad del flujo, volumen y velocidad del flujo.

La simulación del flujo alcanzó 3 km aproximadamente y se detuvo a 4.4 km antes de llegar al poblado de San Pedro Nexapa, aunque los últimos afloramientos del lahar observados en campo se encuentran a casi 6 km de San Pedro Nexapa, FLO-2D obtuvo los tramos distales. Para la comparación de la profundidad del flujo se realizaron perfiles

transversales y secciones (Figura 5.24). Los perfiles muestran las profundidades del flujo obtenidas por FLO-2D y el espesor medido en campo. Las profundidades del flujo consideran el sedimento + agua por lo que la línea de inundación debe de estar siempre por encima del depósito. A continuación se describen los puntos de control.

El punto de control que corresponde a la sección POPO 15-03, aflora un depósito de flujo hiperconcentrado el cual tiene un espesor de 45 cm y el flujo simulado muestra una profundidad de 1.09 m. En el punto POPO 15-04 el depósito tiene un espesor de 92 cm mientras que el flujo simulado tiene una profundidad de 2.83 m. El punto POPO 15-05 tiene un espesor de 62 cm y el flujo simulado tiene 71 cm de profundidad. El punto POPO 15-02 tiene un espesor de 70 cm y la simulación muestra una profundidad de 82 cm. El punto POPO 15-07 tiene un espesor de 42 cm y el flujo simulado tiene una profundidad de 67 cm. El punto POPO 15-09 tiene un espesor de 86 cm mientras que la profundidad en la simulación es de 83 cm al igual que el punto POPO 15-10, cuyo espesor es de 1.28 m y la profundidad de 57 cm estas diferencias en el espesor con respecto a los datos obtenidos por FLO-2D pueden deberse a las fluctuaciones y descargas del flujo o a la topografía en esta zona de la barranca. Por último el punto POPO 15-11 el espesor es de 47 cm mientras que la profundidad del flujo aquí es de 77 cm.

En la figura 5.24 se muestran los valores antes descritos, así como la ubicación de los puntos de control. A partir de esta información se observa que hay 5 puntos en los que los valores de la profundidad calculados por FLO-2D concuerdan con los valores del espesor del depósito, que por tratarse del cálculo de agua y sedimento son mayores al espesor del depósito.

Es importante resaltar que el alcance del fenómeno no quedó registrado en el depósito pero en la imagen ASTER sí. Por lo tanto, para validar la simulación presentada, se utilizó la imagen ASTER para el alcance y los datos de campo para las profundidades de flujo.

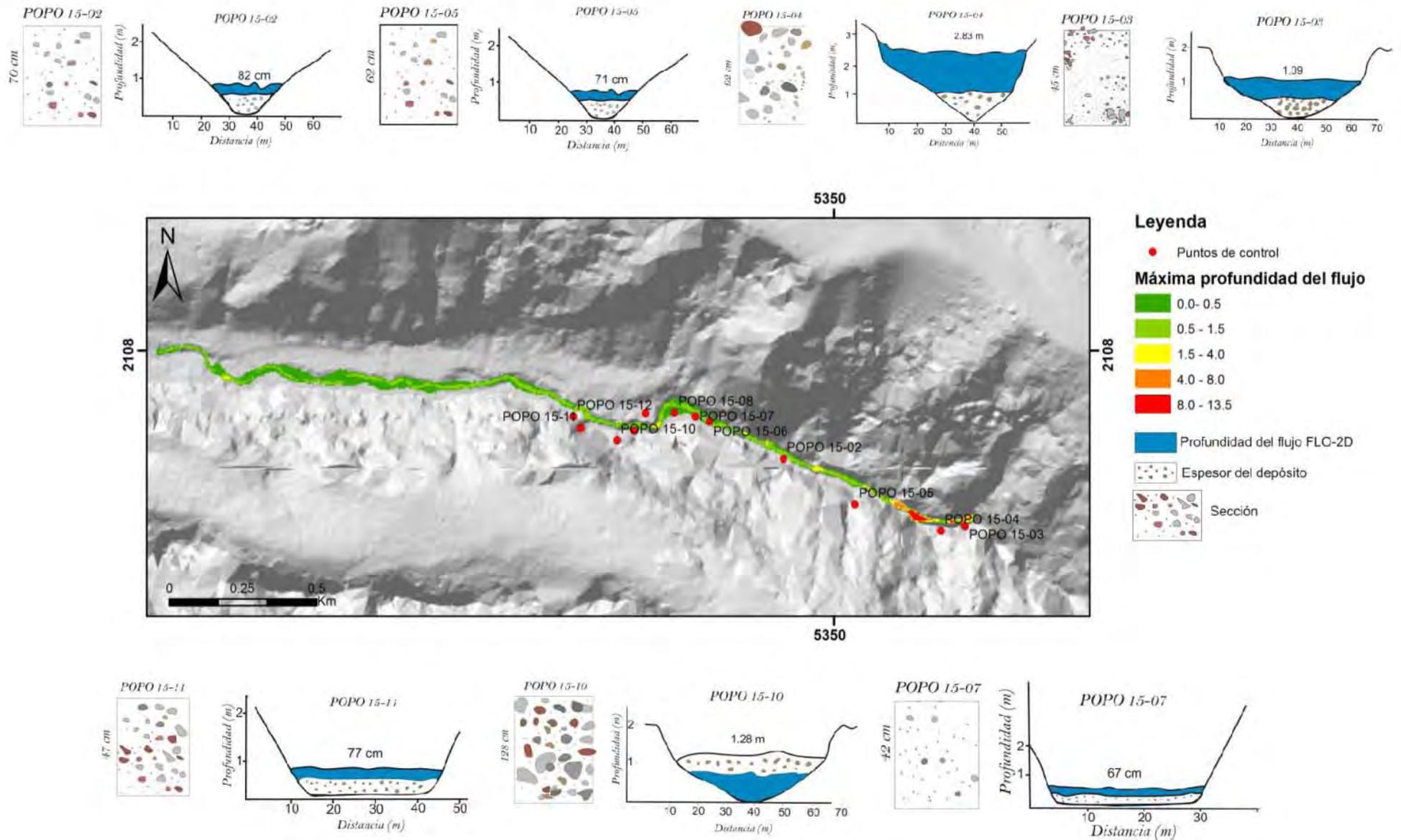


Figura 5. 24. Resultados de la simulación del lahar de 2010 para la profundidad del flujo. Los círculos rojos corresponden a datos tomados en campo. Los perfiles y secciones comparan las profundidades del flujo calculadas por FLO-2D con datos recopilados en campo.

Las distribuciones de la velocidad del lahar se muestran en la figura 5.25. Las velocidades máximas calculadas por FLO-2D son alrededor de 5.9 m/s en la zona proximal y velocidades desde 0.5 hasta 2.1 m/s en la zona distal.

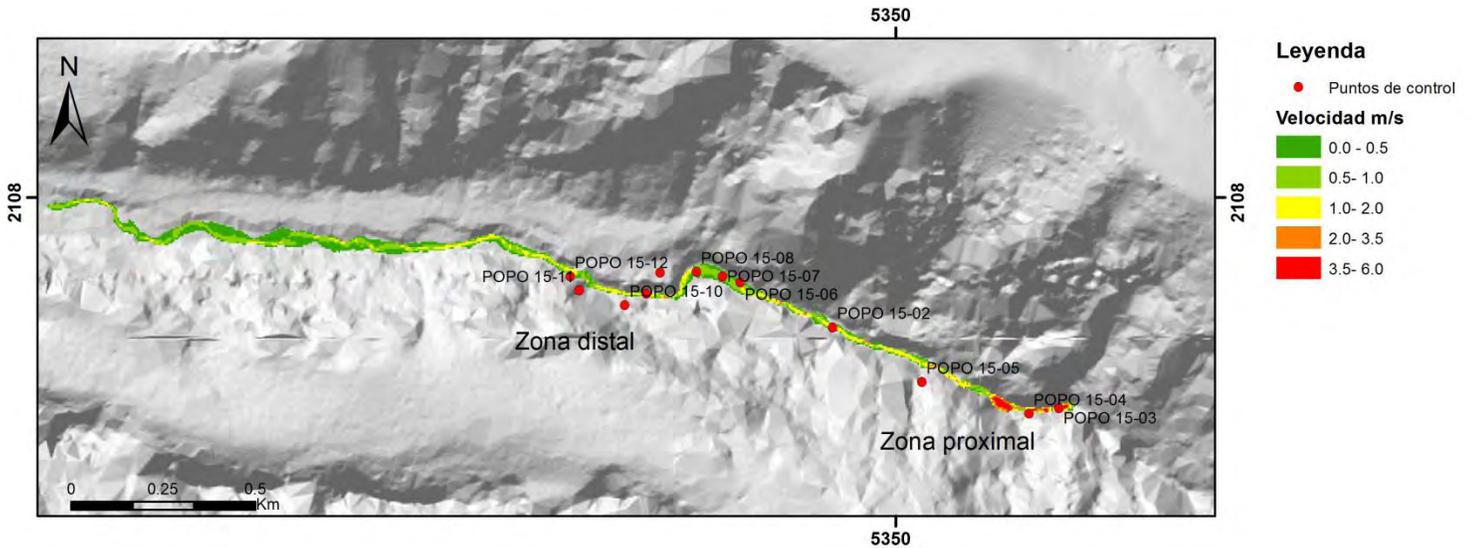


Figura 5.25. Distribución de la velocidad obtenida durante la simulación del flujo.

5.6.3.1. Validación de la simulación

Los resultados de la simulación del Lahar Nexpayantla fueron comparados con los datos obtenidos en campo y se validaron cuantitativamente, mediante dos parámetros: el porcentaje de la relación de longitud (PLR) y la función fitness (e_1).

Para evaluar la simulación mediante el parámetro PLR, se compara la longitud del flujo simulado y la longitud del flujo observado expresado de la siguiente manera (Proietti et al. 2009):

$$PLR = \frac{L_{sim}}{L_{obs}} \times 100$$

Donde L_{sim} es la longitud del flujo simulado y L_{obs} es la longitud del flujo observado.

El segundo método es una función llamada fitness (e_1) fue propuesta por Spataro et al. (2004) y compara la extensión lateral de los flujos. Se define como:

$$e_1 = \sqrt{\frac{m(R \cap S)}{m(R \cup S)}}$$

Donde $R \cap S$ es el área de traslape entre el flujo real y el flujo simulado y $R \cup S$ es la suma del área subestimada, el área de traslape y el área sobreestimada entre el flujo real y el flujo simulado. Un valor de $e_1=1$ equivale a una coincidencia perfecta entre el evento real y la simulación, mientras que un valor de $e_1=0$ representa una discrepancia completa entre ambos. Cabe mencionar que para el evento del 2010 se obtuvieron ambos parámetros tanto para la distribución del lahar obtenida a partir de las imágenes ASTER como para la obtenida a partir de los datos de campo. En el segundo caso, el análisis permite cuantificar el grado de subestimación de un evento que se puede obtener a partir únicamente de los depósitos.

El primer parámetro medido entre el flujo simulado y el flujo delimitado en imágenes ASTER, PLR dio 106%, lo que indica que el lahar simulado es 6% más largo que el observado. Mientras que PLR del flujo delimitado con ayuda de imágenes ASTER y el flujo observado en campo fue de 186% lo que nos indica que el flujo delimitado es 86% más largo, es decir casi el doble de lo observado en campo figura 5.26.

$$PLR = \frac{L_{sim}}{L_{ASTER}} = \frac{3.02}{2.84} \times 100 = 106$$

$$PLR = \frac{L_{ASTER}}{L_{Obs}} = \frac{2.84}{1.52} \times 100 = 186$$

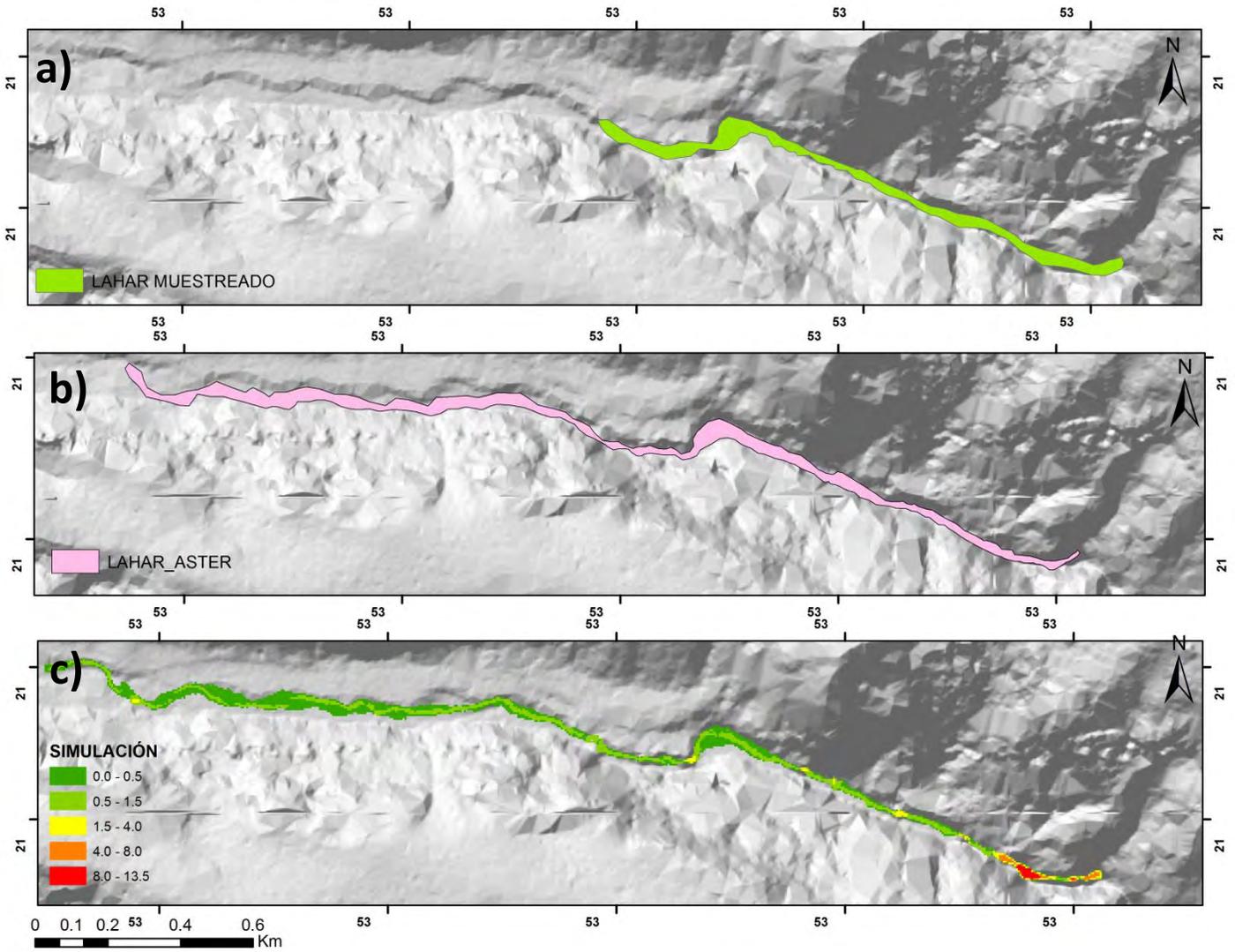


Figura 5.26. Diferencias en la distribución longitudinal del lahar: a) depósito de lahar observado en campo, b) muestra el alcance del lahar delimitado con ayuda de imágenes ASTER y c) se observa la distribución y profundidad del lahar calculados por FLO-2D,

Para el segundo parámetro, la función e_1 calculada entre la simulación y el lahar delimitado en ASTER fue de 0.86 lo que indica que existe una buena correlación entre la simulación hecha por FLO-2D y el lahar delimitado por imágenes ASTER (Figura 5.27a).

Sin embargo esto no se observa en el cálculo de la imagen ASTER y lo observado en campo ya que el valor aquí es de 1.1×10^{-05} lo que nos indica que existe una discrepancia total entre el lahar delimitado en ASTER y lo que se observó en campo (Figura 5.27b).

$$e_{1Simu_Aster} = \sqrt{\frac{m(R \cap S)}{m(R \cup S)}} = \sqrt{\frac{42911.81}{57074.37}} = 0.86$$

$$e_{1Campo_Aster} = \sqrt{\frac{m(R \cap S)}{m(R \cup S)}} = \sqrt{\frac{0.000002}{15379.76}} = 1.1 \times 10^{-05}$$

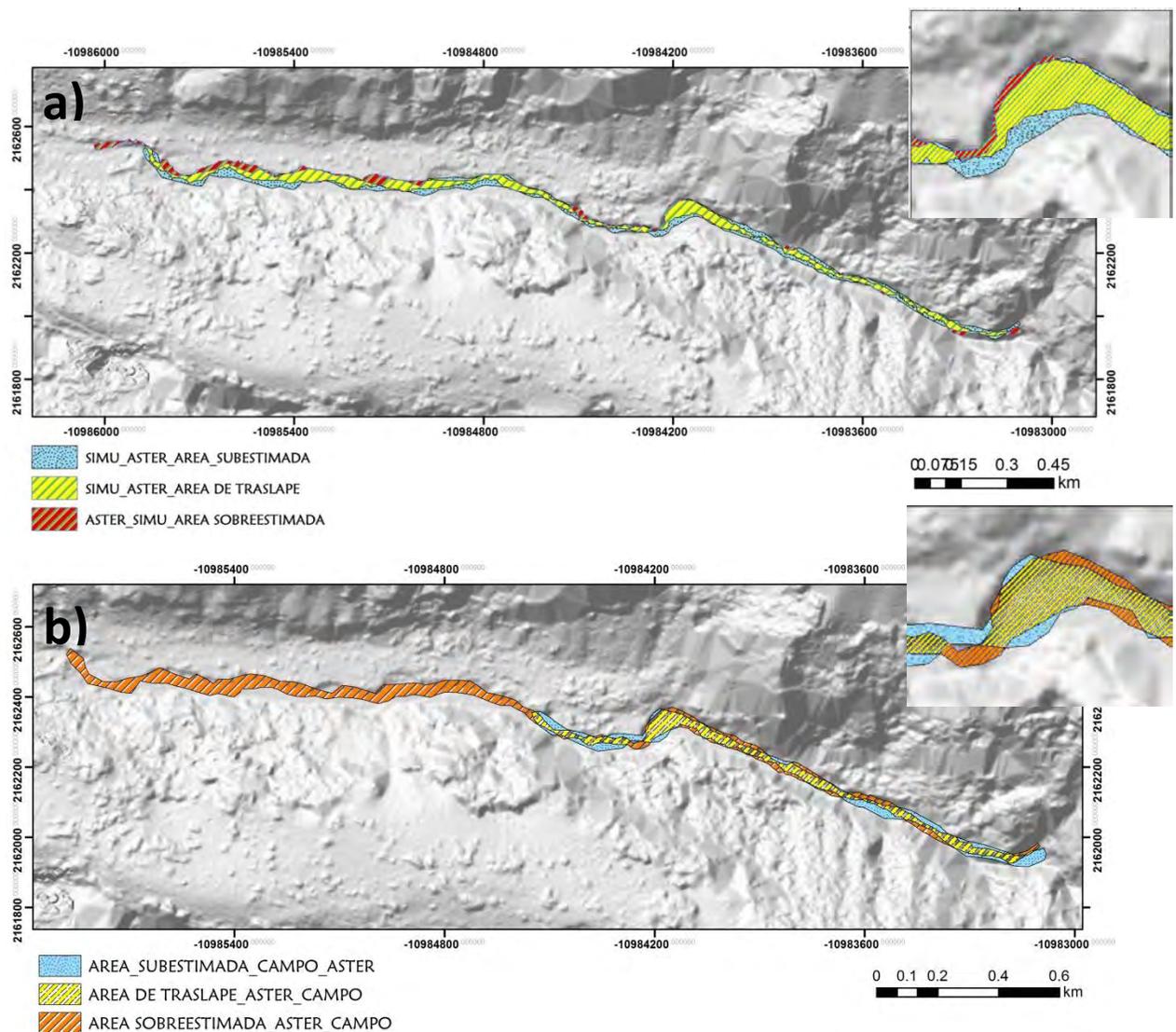


Figura 5. 27. Diferencias observadas mediante el cálculo del parámetro e_1 , en amarillo se muestra el área de traslape en azul el área subestimada y en anaranjado el área sobreestimada a) se observan las áreas para la simulación y el flujo delimitado en ASTER y b) se observan las áreas para el flujo delimitado en ASTER y el depósito observado en campo.

CAPITULO 6. DISCUSIÓN GENERAL

Los datos presentados acerca del depósito, la precipitación, las imágenes ASTER y finalmente, la simulación numérica arrojan información acerca del mecanismo disparador y evolución del lahar aquí estudiado.

El lahar Nexpayantla fue originado a partir de lluvias anómalas (100 mm/día), ocurridas el 4 de febrero del 2010, durante la temporada seca, como lo indica el análisis de precipitación (Figuras 5.13 y 5.14), las imágenes ASTER (Figura 5.16) y los datos de monitores de flujo acústicos. Estas lluvias anómalas saturaron porciones del terreno con pendientes abruptas, compuestas por depósitos fluviolacustres e indujeron un proceso de remoción en masa cuyo material fue remobilizado por el agua que fluía dentro de la barranca.

Con base en las características texturales del depósito del lahar Nexpayantla se evidencia que este evento se comportó en un inicio como un flujo hiperconcentrado y que rápidamente cambia su comportamiento a un flujo de escombros, por la incorporación de material proveniente de procesos de remoción en masa de pequeñas dimensiones, como se observa en la figura 5.17 y 5.18. Este rápido aumento de la fracción sólida se refleja en la migración de las curvas acumulativas hacia la fracción gruesa y en el aumento de la desviación estándar (Figura 5.4). Posteriormente, a los 1400 m de distancia, nuevamente tiene un comportamiento de flujo hiperconcentrado lo que se refleja en las características sedimentológicas. Los depósitos asociados a una concentración en el rango de flujo de escombros, (POPO 15-04, POPO 15-05, POPO 15-09 Y POPO 15-10) presentan una mala selección, son asimétricos hacia los tamaños gruesos y domina el tamaño de las gravas.

El contenido de material fino es muy bajo ($< 1.6\%$) y los histogramas granulométricos son bimodales. Los depósitos de flujos hiperconcentrados (POPO 15-03 Y POPO 15-11) están caracterizados por presentar mala selección y el componente principal es la arena, el contenido de material fino es menor a 0.5% y los histogramas granulométricos son unimodales.

En la figura 6.1 podemos observar los resultados de la aplicación del método desarrollado con valores del Monte Rainier y del Monte Santa Helena (Vallance y Scott, 1997; Scott, 1988) el cual consiste en graficar los valores de la clasificación o desviación estándar contra el tamaño medio de las partículas, con lo cual podemos reafirmar la idea antes mencionada de la concentración de sedimentos que tuvo el lahar a lo largo del cauce de la barranca. Dichas transformaciones fueron favorecidas por el bajo contenido de material fino, que favorece los procesos de sedimentación dentro del lahar y, por lo tanto, sus transformaciones con la distancia.

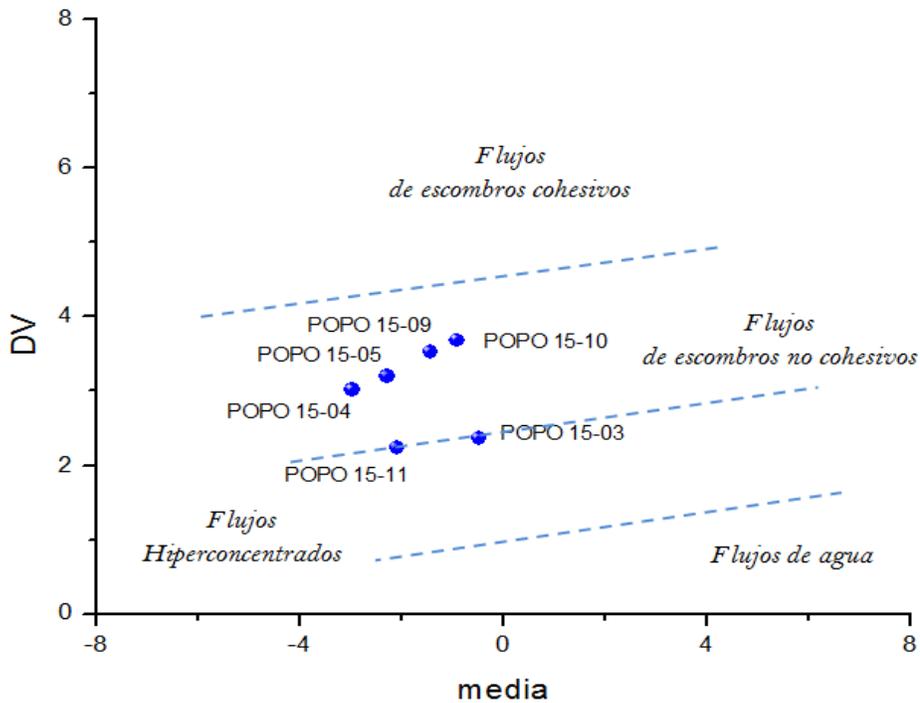
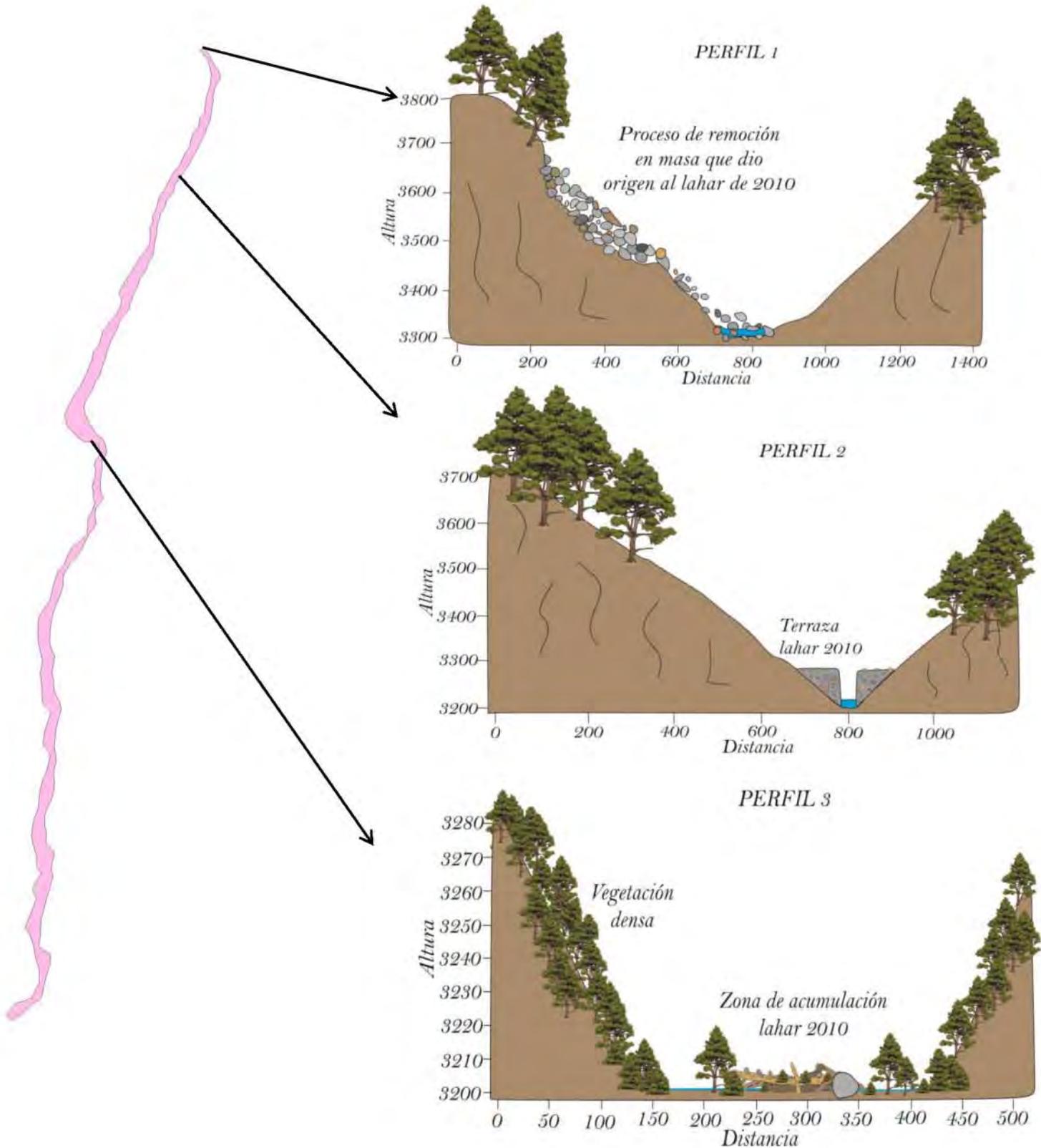


Figura 6. 1. Gráfica del tamaño medio de grano contra la clasificación o desviación estándar (Vallance y Scott, 1997; Scott, 1988a).

Las imágenes ASTER, utilizadas para determinar la ocurrencia y génesis del evento, también permitieron delimitar el alcance, el cual no fue preservado en los depósitos. La distribución del evento observada en la imagen del 26 de marzo del 2010 (Figura 5.16) no corresponde con el depósito observado en campo debido a que pudo ser erosionado posteriormente o a la dilución del lahar con la distancia, por lo que los depósitos no son claramente distinguibles. Esto es de gran importancia, ya que podemos notar que no necesariamente el depósito en campo representa la magnitud y puede inducir errores en la estimación de la magnitud de un evento similar a partir del estudio únicamente de los depósitos asociados.

En los perfiles 1,2, 3 y 4 se muestra el lahar observado en campo y en los perfiles 5 y 6 el lahar observado solamente en las imágenes satelitales y ASTER.



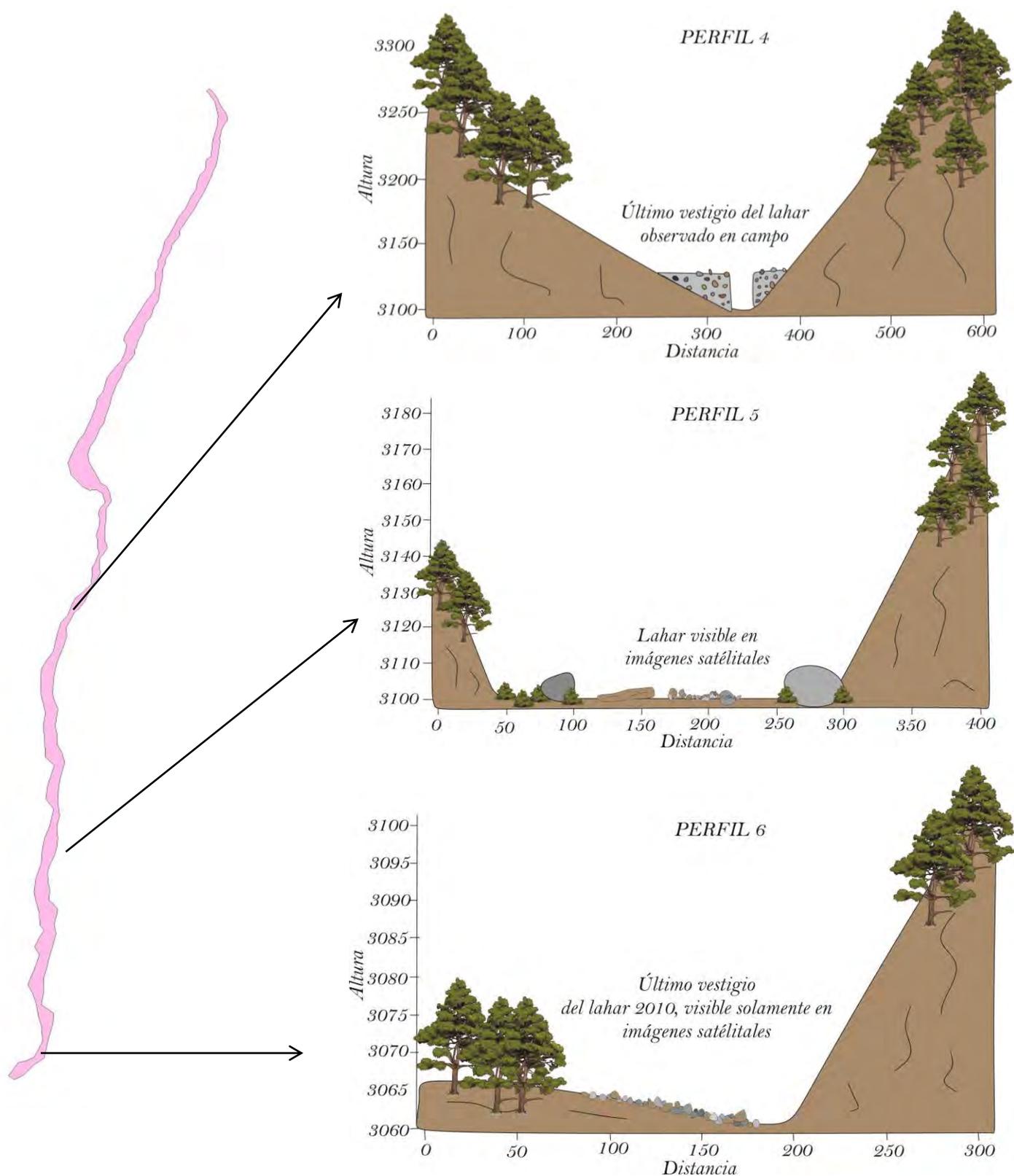


Figura 6. 2. Perfiles donde se observa el emplazamiento del evento, en los perfiles 1, 2,3 y 4 el evento es visible en campo en los perfiles 5 y 6 se representa el evento observado con ayuda de imágenes satelitales (Google Earth y ASTER).

Respecto a la simulación numérica realizada con el modelo FLO-2D podemos mencionar que esta va a depender de los datos de entrada, ya que un coeficiente de Manning, un hidrograma erróneos o un DEM con una resolución inadecuada van a afectar los resultados de FLO-2D. La simulación realizada en este trabajo fue comparada con los datos que se obtuvieron en campo, la distancia alcanzada y las profundidades principalmente. En lo relacionado con la distancia alcanzada se encontró una diferencia notable, ya que el flujo simulado por FLO-2D fue casi del doble de lo que se observó en campo, sin embargo, la simulación concuerda con el depósito observado en las imágenes ASTER, lo que indica que el depósito observado en campo no representaba la longitud total del evento. En cuanto a las profundidades del flujo FLO-2D hizo un cálculo adecuado ya que este concordaba con al menos cinco puntos tomados en campo y solo para dos hubo un cálculo erróneo de la profundidad, el cual era inferior al espesor del depósito. Esto se observó en dos puntos POPO 15-09 y POPO 15-10, que se encuentran justo después de una curvatura en la zona media de la barranca, lo que indica que las zonas con topografías complejas pueden tener mayor incertidumbre.

La simulación fue validada mediante dos parámetros el PLR y la función fitness (Proietti et al. 2009; Spataro et al. 2004). De acuerdo al parámetro PLR calculado entre la simulación y el flujo delimitado en ASTER, este indica que la simulación fue 6% más larga, nuevamente debido a la topografía y a los datos de entrada, sin embargo puede tomarse como una buena aproximación. El cálculo del PLR para ASTER y lo observado en campo indica que el flujo delimitado en ASTER es 86% más largo, es decir casi el doble del depósito visible en campo. Es importante resaltar este dato ya que en muchas ocasiones se suele hacer simulaciones para la elaboración de mapas de peligro basándose solamente en información de campo aunque esta no represente en su totalidad el evento y por lo tanto pueden ser subestimados.

La función fitness calculada para la simulación y el flujo delimitado en ASTER señala que existe una coincidencia del 86%. Mientras que el valor para el flujo delimitado en ASTER y lo observado en campo arrojó un valor interpretado como una discrepancia grande entre ambos flujos, dicho parámetro complementa la información antes mencionada en cuanto a la subestimación de los datos de campo.

Periodo de recurrencia de lahares secundarios de la misma magnitud en la Barranca Nexpayantla y análisis del peligro

Se tomaron en cuenta los datos de la estación San Pedro Nexapa situada a 2,620 msnm para calcular el periodo de retorno de lluvias similares, es decir, igual o mayores a los 100 mm registrados en esta estación para la generación de un lahar y los años en que se presentó una precipitación similar o mayor (figuras 5.13 y 5.14).

De acuerdo a los datos del periodo 1961-2014 (smn.conagua.gob.mx) solo se registraron precipitaciones similares en dos ocasiones una en 1981 registrando 141.5 mm y los 100 mm del año 2010 aplicando la fórmula propuesta por Selby (1985) se encontró que el periodo de recurrencia es de 27 años para un evento de este tipo .

$$PR = \frac{n^{\circ} \text{ de años en el registro} + 1}{n^{\circ} \text{ de mediciones individuales}} = \frac{54}{2} = 27$$

En resumen, la importancia del estudio de lahares secundarios en el Popocatépetl y, en particular, el lahar del 2010 en la barranca Nexpayantla, radica en los siguientes aspectos:

- 1) Su origen está asociado a la saturación de material, por lluvias intensas, que se produjeron en temporada seca, periodo en el que es menos probable que ocurra un lahar.
- 2) Gran parte de los sedimentos proviene de procesos de inestabilidad de ladera, muchos de los cuales se encuentran distribuidos a lo largo de la barranca, lo que se traduce en que en cualquier momento podría generarse otro lahar debido a la gran cantidad de material disponible.
- 3) Aun cuando el lahar se considera de pequeña magnitud, llegó a 4 km de la población de San Pedro Nexapa, con 4633 habitantes, y un evento ligeramente más grande podría llegar a causarle daños. Además, la barranca no se encuentra monitoreada y esto aumenta el riesgo ya que dentro de ella diariamente hay personas que trabajan en la explotación de madera, que pueden ser afectadas por un evento similar. Finalmente, el depósito subestima el alcance casi en un 50%, lo cual no se hubiera podido identificar en el caso de eventos antiguos y es de gran importancia al momento de generar escenarios de peligro.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES

Con base en el análisis de los datos presentados en esta tesis acerca del lahar Nexpayantla, se puede concluir lo siguiente:

- El lahar Nexpayantla se produjo por una precipitación de 100 mm/día generada el 4 de febrero de 2010.
- El evento se comportó en un inicio como un flujo hiperconcentrado y posteriormente sufrió una transformación a un flujo de escombros para finalmente diluirse.
- El origen del lahar se debió a un proceso de remoción en masa que tuvo lugar en la parte alta de la barranca a 8.5 km de San Pedro Nexapa y que fue alimentado por procesos más pequeños a lo largo de la barranca. En su mayoría está compuesto por fragmentos de rocas andesíticas y dacíticas.
- El evento tuvo un alcance de 3 km y se detuvo a 4.4 km antes del poblado de San Pedro Nexapa.
- La reproducción del lahar mediante la herramienta de simulación FLO-2D tuvo una buena aproximación con respecto al alcance y las velocidades de flujo. Sin embargo, al tratarse de un evento pequeño la resolución y calidad del modelo digital de elevación a la hora de realizar simulaciones juega un papel importante ya que a mayor resolución se obtendrá un mayor detalle.
- Deben emplearse todas las herramientas disponibles (imágenes satelitales, datos de campo, simulaciones) para caracterizar con mayor precisión los eventos y realizar una mejor evaluación del peligro, ya que como se observó, estos eventos pueden ser subestimados si se estudian únicamente con base en sus depósitos.
- Otra característica importante del lahar Nexpayantla, desde el punto de vista del análisis del peligro, es que este evento ocurrió en temporada seca, periodo con menor probabilidad de ocurrencia de lahares por lo que se debe de contemplar este tipo de escenarios en la evaluación del peligro por este tipo de fenómenos.
- Finalmente aunque se trata de un evento pequeño estos deben considerarse para la realización de mapas de peligro ya que por tratarse de eventos pequeños muchas veces no queda registro de los depósitos ni de su ocurrencia. Y debe considerarse la presencia de gente trabajando en las barrancas que se dedica a la explotación de la madera.

APÉNDICES

A. Descripción del depósito

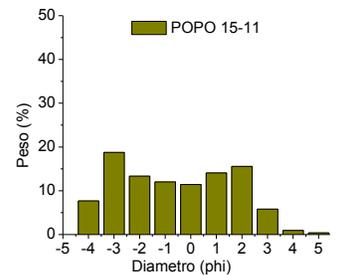
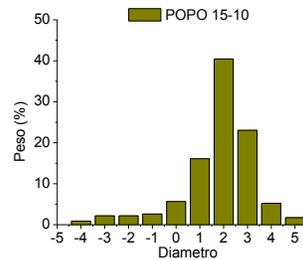
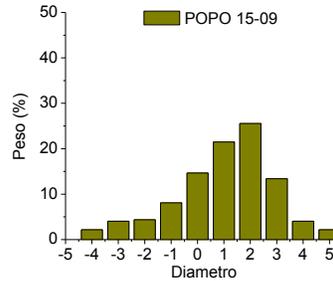
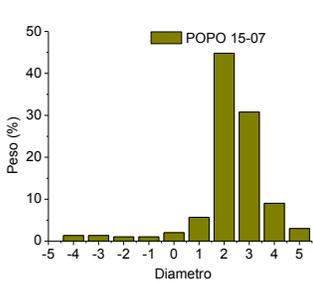
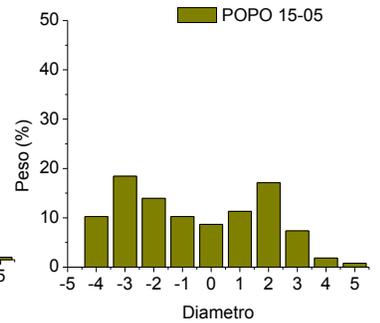
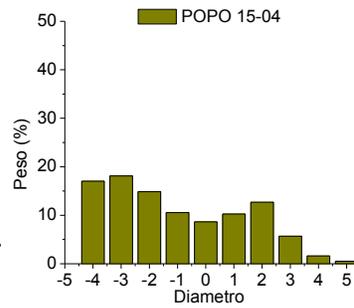
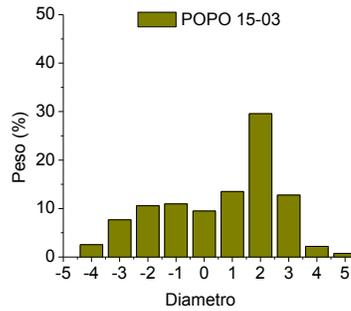
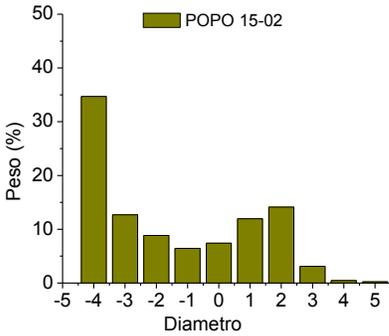
| PUNTO | DESCRIPCIÓN |
|-------------------|---|
| POPO 15-01 | El depósito es masivo, soporte matriz, heterolitológico. |
| POPO 15-02 | <p>Depósito con tendencia a la gradación normal con 70 cm de espesor. Área con clastos de mayor tamaño concentrados en los bordes, lado izquierdo. Diámetro de los clastos más grandes 94, 82,68 y 103 cm.</p> <p>De lado derecho de la barranca (río arriba) se observan pequeños procesos de remoción en masa y acumulación de troncos.</p> |
| POPO 15-03 | Depósito color café, matriz soportado matriz de arena gruesa, 60% matriz 40% líticos, distintos clastos subangulosos a angulosos, heterolitológico. Se observan líticos más gruesos en la cima, tiene un espesor de 45 cm. Diámetros máximos de líticos 33, 31, 30, 34,32, y 35. Se encuentran troncos de hasta 50 cm de diámetro. |
| POPO 15-04 | Depósito color café oscuro, 60% líticos, 40% matriz, líticos subangulosos, masivo con 92 cm de espesor. Diámetros máximos 24,35, 44, 39, 20 y 41. Se ve definida la terraza. |
| POPO 15-05 | Depósito color café oscuro, masivo, matriz soportado, 70% matriz 30% líticos. Se observa un cambio en la matriz con respecto al punto anterior, matriz de arena gruesa, 62 cm de espesor, diámetros máximos de los líticos 21, 18, 17, 21, 24 y 10 cm, subangulosos. |
| POPO 15-06 | Depósito heterolitológico, diámetros máximos 19, 16, 15, 21 y 40 cm. Espesor de 2 m y acumulación de troncos. |
| POPO 15-07 | Depósito matriz soportado, matriz de arena gruesa 95% matriz, enriquecido en material fino, acumulación de clastos grandes, los bordes de la terraza están enriquecidos en material grueso levees, heterolitológico, con líticos poco abundantes y subangulosos, diámetro máximo de líticos 13, 12 10,14,7 cm y 42 cm de espesor. |
| POPO 15-08 | Sitio donde se abre en dos lenguas como a 50 m del punto anterior, acumulación de troncos. |

| | |
|-------------------|--|
| POPO 15-09 | Depósito color café oscuro, masivo, matriz soportado con matriz de arena gruesa, heterolitológico, 50% matriz 50% ,líticos subangulosos con diámetros de 17,14,18,20,21 y 15 cm, el espesor es de 86 cm. |
| POPO 15-10 | Depósito color café oscuro heterolitológico, matriz soportado 40% matriz 60% líticos con clastos subangulosos. En la superficie se observan líticos más pequeños respecto a los puntos anteriores y dentro líticos más grandes, diámetros máximos 38, 22, 20, 18,21 cm y 128 cm de espesor. |
| POPO 15-11 | Se observa la terraza, los clastos disminuyen considerablemente de tamaño, los diámetros más grandes se encuentran en la parte central del depósito. Se observa cierta orientación de los clastos, diámetros 10,9.5, 8, 8, 14, 8,5 cm. No hay clastos grandes en la superficie 47 cm de espesor. |
| POPO 15-12 | Acumulación de troncos, con mucha vegetación bloques grandes, no se observa un corte del depósito. |

B. Granulometría

B.1. Tamizado seco

| | POPO 15-11 | POPO 15-10 | POPO 15-09 | POPO 15-07 | POPO 15-05 | POPO 15-04 | POPO 15-03 | POPO 15-02 |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PHI | Wt(%) |
| -4 | 7.69 | 0.86 | 2.18 | 1.33 | 10.26 | 17.02 | 2.55 | 34.68 |
| -3 | 18.76 | 2.17 | 4.04 | 1.33 | 18.42 | 18.10 | 7.66 | 12.67 |
| -2 | 13.32 | 2.17 | 4.36 | 1.00 | 13.94 | 14.86 | 10.58 | 8.85 |
| -1 | 12.00 | 2.60 | 8.09 | 1.00 | 10.26 | 10.54 | 10.94 | 6.45 |
| 0 | 11.44 | 5.65 | 14.64 | 2.00 | 8.68 | 8.64 | 9.48 | 7.41 |
| 1 | 14.07 | 16.08 | 21.49 | 5.68 | 11.31 | 10.27 | 13.50 | 11.96 |
| 2 | 15.57 | 40.43 | 25.54 | 44.81 | 17.10 | 12.70 | 29.56 | 14.11 |
| 3 | 5.81 | 23.04 | 13.39 | 30.76 | 7.36 | 5.67 | 12.77 | 3.11 |
| 4 | 0.93 | 5.21 | 4.04 | 9.03 | 1.84 | 1.62 | 2.18 | 0.47 |
| >4 | 0.37 | 1.73 | 2.18 | 3.01 | 0.78 | 0.54 | 0.72 | 0.23 |

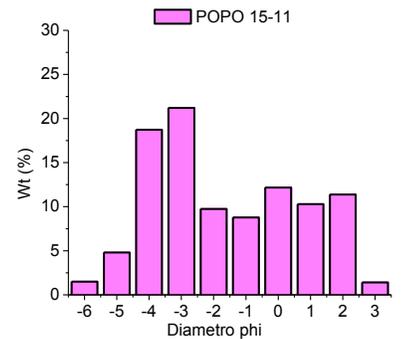
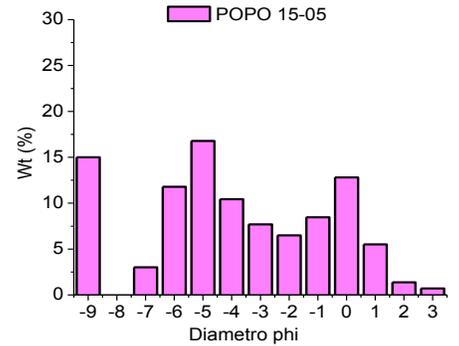
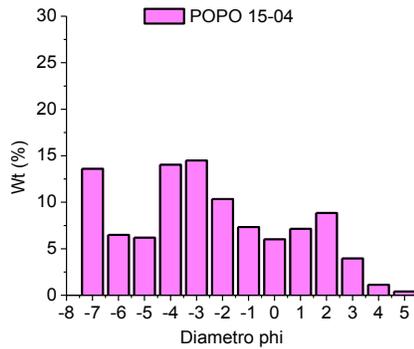
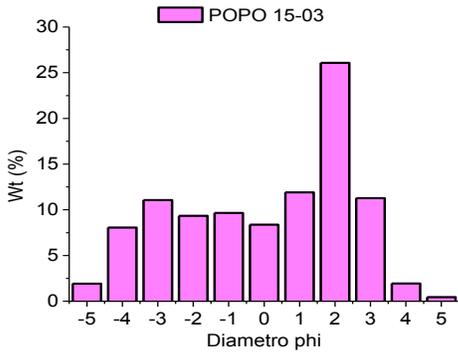


B.2. Intersecciones de Rosiwal

| Distribución total (ϕ) | POPO 15-03 | POPO 15-04 | POPO 15-05 | POPO 15-06 | POPO 15-09 | POPO 15-10 | POPO 15-11 | POPO 15-12 |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| M | 40.5% | 69.6% | 74.8% | 59.5% | 73.8% | 73.8% | 73.1% | 30.9% |
| -3 | 4.1% | 1.9% | 3.0% | 0.0% | 0.1% | 0.1% | 7.5% | 0.7% |
| -4 | 14.5% | 2.2% | 4.1% | 0.0% | 2.0% | 2.0% | 13.1% | 7.8% |
| -5 | 17.9% | 6.2% | 3.0% | 0.3% | 7.2% | 7.2% | 4.8% | 28.2% |
| -6 | 20.1% | 6.5% | 0.0% | 4.3% | 6.9% | 8.9% | 1.5% | 30.3% |
| -7 | 2.9% | 13.6% | 15.0% | 15.0% | 10.0% | 8.0% | 0.0% | 2.1% |
| -8 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 20.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| -9 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 1.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| -10 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| -11 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| -12 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| -13 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| TOTAL | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% |
| MEDIA | -6.4 | -6.9 | -7.4 | -7.6 | -6.8 | -6.7 | -6.3 | -6.4 |
| P25 | -6.6 | -7.3 | -7.5 | -8.1 | -7.3 | -7.3 | -6.4 | -6.6 |
| P50 | -6.5 | -7.0 | -7.4 | -7.6 | -6.6 | -6.5 | -6.3 | -6.3 |
| P75 | -6.2 | -6.6 | -7.2 | -7.0 | -6.4 | -6.4 | -6.2 | -6.1 |
| P95 | -6.7 | -7.6 | -7.6 | -8.7 | -7.4 | -7.4 | -6.5 | -6.9 |
| DES.ESTAN | 0.2 | 0.5 | 0.1 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.3 |
| MAX. | -6.7 | -7.6 | -7.6 | -9.1 | -7.6 | -7.6 | -6.6 | -7.4 |

B.3. Granulometría total

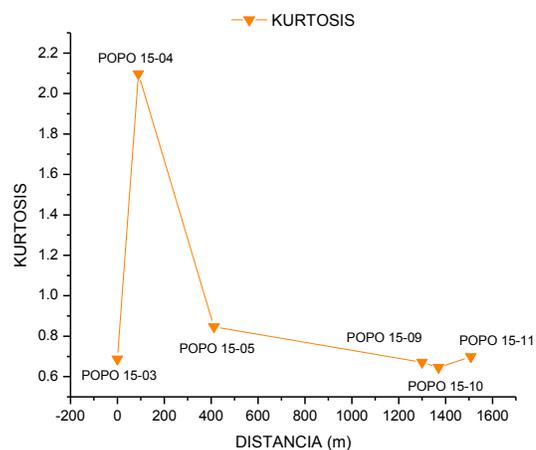
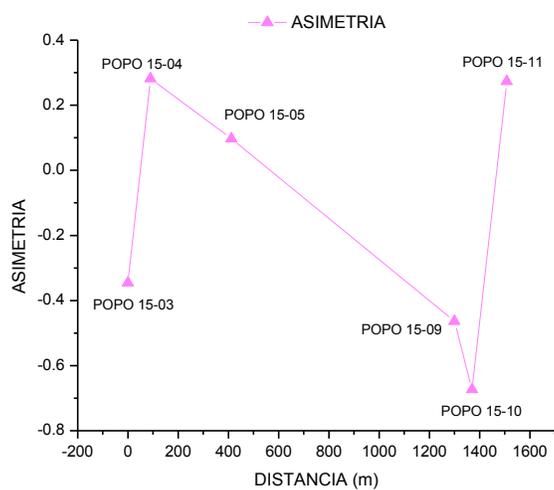
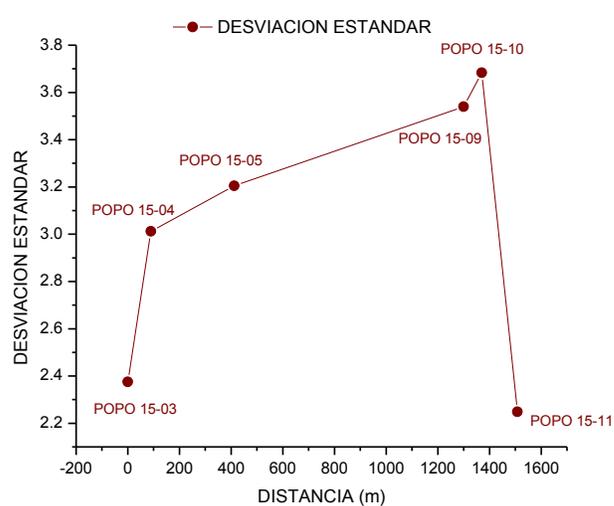
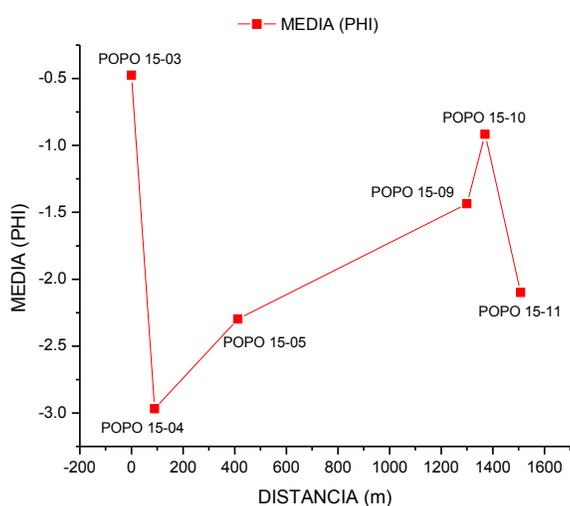
| Phi | mm | POPO 15-03 | POPO 15-04 | POPO 15-05 | POPO 15-09 | POPO 15-10 | POPO 15-11 |
|-----|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| -9 | | 0 | 0 | 14.99 | 0 | 0 | 0 |
| -8 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -7 | 128 | 0 | 13.59 | 2.99 | 10 | 10 | 0 |
| -6 | 64 | 0 | 6.49 | 11.77 | 6.9 | 6.9 | 1.5 |
| -5 | 32 | 1.92 | 6.19 | 16.77 | 7.2 | 7.2 | 4.8 |
| -4 | 16 | 8.04 | 14.03 | 10.43 | 3.60 | 2.64 | 18.72 |
| -3 | 8 | 11.05 | 14.49 | 7.67 | 3.08 | 1.70 | 21.21 |
| -2 | 4 | 9.33 | 10.34 | 6.49 | 3.21 | 1.60 | 9.73 |
| -1 | 2 | 9.65 | 7.33 | 8.46 | 5.97 | 1.92 | 8.77 |
| 0 | 1 | 8.36 | 6.01 | 12.79 | 10.80 | 4.17 | 12.17 |
| 1 | 0.5 | 11.91 | 7.14 | 5.51 | 15.86 | 11.87 | 10.28 |
| 2 | 0.25 | 26.07 | 8.84 | 1.37 | 18.85 | 29.84 | 11.38 |
| 3 | 0.125 | 11.26 | 3.95 | 0.69 | 9.88 | 17.00 | 1.40 |
| 4 | 0.0625 | 1.93 | 1.12 | 0 | 2.98 | 3.85 | 0 |
| 5 | 0.031 | 0.43 | 0.40 | 0 | 1.60 | 1.28 | 0 |



B.4. Parámetros estadísticos

Estadística de Folk & Ward (1957) de la distribución granulométrica.

| MUESTRA | Media (ϕ) | Desviación estándar | Asimetría | Kurtosis |
|------------|------------------|---------------------|-----------|----------|
| POPO 15-03 | -0.47 | 2.37 | -0.34 | 0.68 |
| POPO 15-04 | -2.96 | 3.01 | 0.28 | 2.09 |
| POPO 15-05 | -2.29 | 3.20 | 0.09 | 0.84 |
| POPO 15-09 | -1.43 | 3.53 | -0.46 | 0.67 |
| POPO 15-10 | -0.91 | 3.68 | -0.67 | 0.64 |
| POPO 15-11 | -2.09 | 2.24 | 0.27 | 0.69 |



C. Reporte de actividad volcán Popocatépetl (CENAPRED)

Febrero 05 11:00 h. (17:00 GMT)

<http://www.gob.mx/cenapred>

En las últimas 24 horas el sistema de monitoreo del Popocatépetl registró 9 exhalaciones de baja intensidad acompañadas por emisiones de vapor de agua y gas.

Se reitera la recomendación de no permanecer dentro del radio de seguridad establecido de 12 km y sobre todo, evitar la permanencia en barrancas cercanas al volcán. Lo anterior en virtud de que lluvias intensas de las últimas horas pudieran generar avenidas de agua con arrastre de materiales sólidos.

Al momento de este reporte se observa al volcán con una pequeña emisión de vapor de agua y gas.



En orden de mayor a menor probabilidad los escenarios esperados en las próximas horas, días o semanas son los siguientes: exhalaciones moderadas, algunas con emisiones de ceniza; ocasionalmente leve incandescencia en el cráter del volcán observable durante la noche, esporádicas explosiones de nivel bajo a moderado con probabilidad de emisión de fragmentos incandescentes a corta distancia del cráter y dadas las condiciones de lluvia, avenidas de agua con arrastre de materiales sólidos.

Se mantiene el monitoreo continuo de la actividad del volcán para detectar cualquier cambio en su comportamiento. **El semáforo de alerta volcánica se mantiene en AMARILLO Fase 2.**

Recomendaciones:

- 1. Continuar con el radio de seguridad de 12 km, por lo que la permanencia en esa área no está permitida.**
2. Mantener el tránsito controlado entre Santiago Xalitzintla y San Pedro Nexapa, vía Paso de Cortés.
3. A las autoridades de Protección Civil, mantener sus procedimientos preventivos, de acuerdo con sus planes operativos.
4. A la población, estar atenta a la información oficial que se difunda.

D. Datos de los geófonos (AFM)

| Fecha | Hora | Banda completa | Banda baja | Banda alta | Voltaje | Pluviómetro |
|-----------|-------|----------------|------------|------------|---------|-------------|
| 04-feb-10 | 00:02 | 0 | 8 | 7 | 3124 | -998 |
| 04-feb-10 | 00:22 | 13 | 139 | 35 | 3112 | -998 |
| 04-feb-10 | 00:32 | 6 | 65 | 26 | 3105 | -998 |
| 04-feb-10 | 00:42 | 18 | 166 | 42 | 3101 | -998 |
| 04-feb-10 | 00:52 | 0 | 21 | 4 | 3099 | -998 |
| 04-feb-10 | 01:12 | 1 | 11 | 38 | 3093 | -998 |
| 04-feb-10 | 01:22 | 0 | 22 | 4 | 3094 | -998 |
| 04-feb-10 | 01:32 | 3 | 62 | 18 | 3089 | -998 |
| 04-feb-10 | 01:42 | 4 | 60 | 12 | 3087 | -998 |
| 04-feb-10 | 01:52 | 0 | 21 | 4 | 3086 | -998 |
| 04-feb-10 | 02:02 | 13 | 128 | 40 | 3084 | -998 |
| 04-feb-10 | 02:12 | 12 | 97 | 45 | 3083 | -998 |
| 04-feb-10 | 02:22 | 1 | 27 | 7 | 3081 | -998 |
| 04-feb-10 | 02:32 | 7 | 87 | 20 | 3084 | -998 |
| 04-feb-10 | 02:33 | 154 | 1121 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 02:52 | 0 | 25 | 5 | 3078 | -998 |
| 04-feb-10 | 02:53 | 164 | 908 | 515 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 03:02 | 1 | 29 | 5 | 3081 | -998 |
| 04-feb-10 | 03:05 | 70 | 559 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 03:12 | 9 | 96 | 29 | 3077 | -998 |
| 04-feb-10 | 03:32 | 2 | 45 | 12 | 3076 | -998 |
| 04-feb-10 | 03:52 | 0 | 22 | 9 | 3074 | -998 |
| 04-feb-10 | 04:02 | 5 | 56 | 16 | 3073 | -998 |
| 04-feb-10 | 04:12 | 19 | 171 | 68 | 3073 | -998 |
| 04-feb-10 | 04:22 | 0 | 15 | 3 | 3072 | -998 |
| 04-feb-10 | 04:32 | 1 | 36 | 13 | 3070 | -998 |
| 04-feb-10 | 04:42 | 0 | 17 | 6 | 3071 | -998 |
| 04-feb-10 | 04:52 | 0 | 14 | 10 | 3068 | -998 |
| 04-feb-10 | 05:02 | 1 | 34 | 11 | 3069 | -998 |
| 04-feb-10 | 05:12 | 0 | 11 | 9 | 3070 | -998 |
| 04-feb-10 | 05:13 | 66 | 526 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 05:22 | 1 | 31 | 12 | 3067 | -998 |
| 04-feb-10 | 05:32 | 0 | 12 | 3 | 3065 | -998 |
| 04-feb-10 | 05:42 | 1 | 41 | 11 | 3071 | -998 |
| 04-feb-10 | 05:52 | 27 | 242 | 59 | 3069 | -998 |
| 04-feb-10 | 06:02 | 1 | 28 | 15 | 3068 | -998 |
| 04-feb-10 | 06:12 | 6 | 79 | 10 | 3063 | -998 |
| 04-feb-10 | 06:19 | 183 | 1493 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 06:22 | 4 | 59 | 27 | 3061 | -998 |

| | | | | | | |
|-----------|-------|----|-----|-----|------|------|
| 04-feb-10 | 06:32 | 14 | 151 | 35 | 3061 | -998 |
| 04-feb-10 | 06:42 | 0 | 20 | 4 | 3061 | -998 |
| 04-feb-10 | 06:52 | 1 | 44 | 19 | 3059 | -998 |
| 04-feb-10 | 07:02 | 10 | 103 | 35 | 3060 | -998 |
| 04-feb-10 | 07:12 | 0 | 13 | 14 | 3056 | -998 |
| 04-feb-10 | 07:22 | 0 | 8 | 13 | 3057 | -998 |
| 04-feb-10 | 07:32 | 20 | 204 | 60 | 3059 | -998 |
| 04-feb-10 | 07:42 | 0 | 14 | 6 | 3056 | -998 |
| 04-feb-10 | 07:52 | 5 | 67 | 25 | 3058 | -998 |
| 04-feb-10 | 08:02 | 0 | 16 | 12 | 3056 | -998 |
| 04-feb-10 | 08:12 | 8 | 88 | 39 | 3055 | -998 |
| 04-feb-10 | 08:22 | 0 | 24 | 20 | 3057 | -998 |
| 04-feb-10 | 08:32 | 0 | 17 | 19 | 3052 | -998 |
| 04-feb-10 | 08:42 | 10 | 115 | 24 | 3053 | -998 |
| 04-feb-10 | 08:52 | 0 | 14 | 23 | 3056 | -998 |
| 04-feb-10 | 09:02 | 0 | 20 | 24 | 3051 | -998 |
| 04-feb-10 | 09:12 | 1 | 29 | 16 | 3050 | -998 |
| 04-feb-10 | 09:22 | 1 | 44 | 14 | 3051 | -998 |
| 04-feb-10 | 09:32 | 7 | 96 | 36 | 3048 | -998 |
| 04-feb-10 | 09:42 | 0 | 29 | 21 | 3048 | -998 |
| 04-feb-10 | 09:52 | 0 | 16 | 18 | 3048 | -998 |
| 04-feb-10 | 10:02 | 2 | 47 | 23 | 3044 | -998 |
| 04-feb-10 | 10:12 | 0 | 25 | 30 | 3043 | -998 |
| 04-feb-10 | 10:14 | 78 | 636 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 10:22 | 0 | 10 | 20 | 3043 | -998 |
| 04-feb-10 | 10:32 | 0 | 5 | 20 | 3041 | -998 |
| 04-feb-10 | 10:42 | 0 | 21 | 17 | 3045 | -998 |
| 04-feb-10 | 10:52 | 0 | 12 | 9 | 3042 | -998 |
| 04-feb-10 | 11:02 | 5 | 59 | 35 | 3038 | -998 |
| 04-feb-10 | 11:12 | 0 | 12 | 20 | 3037 | -998 |
| 04-feb-10 | 11:22 | 0 | 21 | 28 | 3031 | -998 |
| 04-feb-10 | 11:32 | 14 | 149 | 36 | 3032 | -998 |
| 04-feb-10 | 11:42 | 0 | 10 | 43 | 3029 | -998 |
| 04-feb-10 | 11:52 | 0 | 16 | 32 | 3027 | -998 |
| 04-feb-10 | 12:02 | 0 | 8 | 38 | 3026 | -998 |
| 04-feb-10 | 12:12 | 10 | 104 | 58 | 3025 | -998 |
| 04-feb-10 | 12:22 | 19 | 190 | 57 | 3027 | -998 |
| 04-feb-10 | 12:32 | 2 | 45 | 23 | 3032 | -998 |
| 04-feb-10 | 12:42 | 4 | 52 | 28 | 3033 | -998 |
| 04-feb-10 | 12:52 | 1 | 29 | 32 | 3030 | -998 |
| 04-feb-10 | 13:12 | 0 | 6 | 33 | 3028 | -998 |

| | | | | | | |
|-----------|-------|-----|-----|-----|------|------|
| 04-feb-10 | 13:22 | 2 | 43 | 35 | 3026 | -998 |
| 04-feb-10 | 13:32 | 10 | 103 | 48 | 3027 | -998 |
| 04-feb-10 | 13:42 | 0 | 12 | 25 | 3024 | -998 |
| 04-feb-10 | 13:52 | 0 | 24 | 25 | 3022 | -998 |
| 04-feb-10 | 14:22 | 0 | 5 | 21 | 3025 | -998 |
| 04-feb-10 | 14:32 | 40 | 299 | 120 | 3041 | -998 |
| 04-feb-10 | 14:42 | 0 | 3 | 8 | 3054 | -998 |
| 04-feb-10 | 15:02 | 0 | 12 | 16 | 3099 | -998 |
| 04-feb-10 | 15:12 | 1 | 34 | 11 | 3108 | -998 |
| 04-feb-10 | 15:32 | 0 | 11 | 3 | 3149 | -998 |
| 04-feb-10 | 15:42 | 0 | 33 | 15 | 3164 | -998 |
| 04-feb-10 | 15:52 | 0 | 4 | 6 | 3168 | -998 |
| 04-feb-10 | 16:02 | 12 | 129 | 40 | 3144 | -998 |
| 04-feb-10 | 16:12 | 0 | 15 | 5 | 3133 | -998 |
| 04-feb-10 | 16:27 | 80 | 651 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 16:32 | 0 | 6 | 5 | 3159 | -998 |
| 04-feb-10 | 16:42 | 1 | 37 | 6 | 3174 | -998 |
| 04-feb-10 | 16:52 | 1 | 27 | 12 | 3214 | -998 |
| 04-feb-10 | 17:02 | 3 | 55 | 13 | 3227 | -998 |
| 04-feb-10 | 17:22 | 2 | 44 | 14 | 3223 | -998 |
| 04-feb-10 | 17:32 | 0 | 15 | 5 | 3236 | -998 |
| 04-feb-10 | 17:42 | 0 | 6 | 4 | 3216 | -998 |
| 04-feb-10 | 17:43 | 111 | 919 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 18:02 | 0 | 8 | 6 | 3236 | -998 |
| 04-feb-10 | 18:12 | 1 | 47 | 23 | 3238 | -998 |
| 04-feb-10 | 18:22 | 0 | 9 | 2 | 3240 | -998 |
| 04-feb-10 | 18:32 | 0 | 23 | 13 | 3245 | -998 |
| 04-feb-10 | 18:42 | 1 | 35 | 10 | 3255 | -998 |
| 04-feb-10 | 18:52 | 0 | 11 | 9 | 3225 | -998 |
| 04-feb-10 | 19:02 | 4 | 51 | 16 | 3212 | -998 |
| 04-feb-10 | 19:22 | 26 | 222 | 96 | 3179 | -998 |
| 04-feb-10 | 19:32 | 2 | 38 | 21 | 3185 | -998 |
| 04-feb-10 | 19:52 | 12 | 116 | 38 | 3149 | -998 |
| 04-feb-10 | 20:02 | 1 | 28 | 10 | 3145 | -998 |
| 04-feb-10 | 20:12 | 4 | 54 | 25 | 3140 | -998 |
| 04-feb-10 | 20:22 | 13 | 126 | 40 | 3141 | -998 |
| 04-feb-10 | 20:42 | 0 | 18 | 5 | 3187 | -998 |
| 04-feb-10 | 20:52 | 0 | 14 | 5 | 3201 | -998 |
| 04-feb-10 | 21:02 | 73 | 651 | 217 | 3256 | -998 |
| 04-feb-10 | 21:12 | 0 | 23 | 6 | 3287 | -998 |
| 04-feb-10 | 21:22 | 6 | 71 | 27 | 3262 | -998 |

| | | | | | | |
|-----------|-------|-----|------|-----|------|------|
| 04-feb-10 | 21:32 | 7 | 79 | 34 | 3238 | -998 |
| 04-feb-10 | 21:42 | 0 | 22 | 5 | 3231 | -998 |
| 04-feb-10 | 21:52 | 65 | 539 | 218 | 3217 | -998 |
| 04-feb-10 | 21:56 | 74 | 600 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:02 | 15 | 147 | 60 | 3215 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:09 | 102 | 781 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:12 | 72 | 558 | 512 | 3186 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:13 | 152 | 1109 | 514 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:17 | 206 | 1440 | 515 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:22 | 0 | 36 | 8 | 3205 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:26 | 83 | 776 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:27 | 161 | 1540 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:28 | 93 | 933 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:32 | 21 | 196 | 71 | 3208 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:42 | 15 | 143 | 83 | 3223 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:47 | 133 | 1003 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:51 | 229 | 1908 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:52 | 80 | 596 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:54 | 114 | 951 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:56 | 72 | 560 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 22:59 | 91 | 783 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:12 | 37 | 344 | 146 | 3183 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:14 | 65 | 540 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:22 | 4 | 54 | 19 | 3171 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:32 | 1 | 35 | 15 | 3158 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:34 | 74 | 557 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:42 | 69 | 549 | 512 | 3136 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:43 | 111 | 864 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:45 | 105 | 863 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:48 | 60 | 534 | 512 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:52 | 10 | 108 | 41 | 3117 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:56 | 80 | 679 | 513 | -998 | -998 |
| 04-feb-10 | 23:57 | 81 | 684 | 513 | -998 | -998 |

E. Coeficiente de Manning

Parámetros considerados para calcular el coeficiente de Manning (Jeff V. P., et al 2007)

| Condiciones del canal | Valor n Manning | Características |
|-----------------------|-----------------|--|
| | | Grado de irregularidad |
| Suave | 0.000 | Para la mejor superficie que se puede alcanzar con un material dado |
| Menor | 0.001-0.005 | Para canales bien dragados , ligeramente erosionados |
| Moderado | 0.006-.010 | Para canales con pendientes laterales moderadamente erosionadas |
| Severo | 0.011-0.020 | Canales con superficies sin forma, dentados e irregulares, rocas en el canal. |
| | | Variación en la sección transversal del canal |
| Gradual | 0.000 | El tamaño y la forma de las secciones transversales del canal cambian gradualmente. |
| Alternancia ocasional | 0.001-0.005 | Grandes y pequeños cambios en las secciones transversales se alternan de vez en cuando o el flujo principal de desplaza de un lado a otro debido a los cambios en la sección transversal. |
| Alternancia frecuente | 0.010-0.015 | Grandes y pequeños cambios en las secciones transversales se alternan con frecuencia. |
| | | Efectos de las obstrucciones |
| Despreciable | 0.000-0.004 | Pocas obstrucciones dispersas que incluyen depósitos de escombros, troncos, raíces, troncos expuestos o rocas que ocupan menos del 5%del canal. |
| Menor | 0.005-0.015 | Obstrucciones ocupan el 5%-15 % del área de la sección transversal. |
| Apreciable | 0.020-0.030 | Obstrucciones ocupan del 15% al 50% del área de la sección transversal, bloqueando de este modo una parte equivalente de la sección. |
| Severo | 0.040-0.060 | Obstrucciones ocupan más del 50% del área de la sección transversal. |
| | | Cantidad de vegetación |
| Despreciable | 0.000-0.002 | Hierbas y arbustos se establecieron de forma permanente durante el trayecto del flujo. |
| Pequeña | 0.002-0.010 | Crecimiento denso de maleza donde la profundidad del flujo es dos veces la altura de la vegetación presencia de árboles como el sauce, álamo, pino, o crecimiento donde la profundidad media de flujo es al menos tres veces la altura de la vegetación. |
| Media | 0.010-0.025 | Hierba y árboles que crecen moderadamente donde la profundidad promedio del flujo es dos o tres veces la altura de la vegetación; la maleza, es moderadamente densa. |
| Larga | 0.025-0.050 | Sauces de 8 a 10 años de edad intercalados con hierbas y arbustos. |
| Muy larga | 0.050-0.100 | Arboles intercalados con hierbas y arbustos crecen a lo largo del fondo del canal. La profundidad del flujo se aproxima a la altura de la vegetación. |
| Extremadamente larga | 0.100-0.200 | Sauces intercrecidos con hierbas y arbustos el bloqueo de flujo en más de un 70 por ciento del área del canal. La profundidad de flujo es menor que la altura media de la vegetación. |
| | | Grado de meandros |
| Menor | 1.00 | Relación de la longitud del canal a la longitud valle es de 1,0 a 1,2. |
| Apreciable | 1.15 | Relación de la longitud del canal a la longitud valle es de 1,2 a 1,5. |
| Severo | 1.30 | Relación de la longitud del canal a la longitud valle es mayor que 1,5. |

F. Resultados FLO-2D

NEGATIVE VOLUME CONSERVATION (CUBIC METERS)
INDICATES EXCESS VOLUME (OUTFLOW + STORAGE > INFLOW)

| SIMULATION TIME (HOURS) | AVERAGE TIMESTEP (SECONDS) | VOLUME CONSERVATION (CU METERS) | PERCENT OF INFLOW |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------|
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------|

SUMMARY.OUT FILE
Pro Model - Build No. 14.03.07

| | | | |
|-------|-------|-----------|----------|
| 0.100 | 1.071 | 0.000023 | 0.000004 |
| 0.200 | 1.160 | -0.000026 | 0.000001 |
| 0.300 | 0.818 | 0.000101 | 0.000002 |
| 0.400 | 0.779 | 0.000190 | 0.000002 |
| 0.500 | 0.754 | -0.000123 | 0.000001 |
| 0.600 | 0.716 | -0.000354 | 0.000002 |
| 0.700 | 0.554 | -0.000237 | 0.000001 |
| 0.800 | 0.474 | -0.000286 | 0.000001 |
| 0.900 | 0.510 | 0.000986 | 0.000004 |
| 1.000 | 0.619 | 0.000856 | 0.000003 |
| 1.100 | 0.531 | 0.000323 | 0.000001 |
| 1.200 | 0.554 | 0.000942 | 0.000003 |
| 1.300 | 0.551 | 0.000811 | 0.000003 |
| 1.400 | 0.565 | 0.000690 | 0.000003 |
| 1.500 | 0.537 | 0.000815 | 0.000003 |
| 1.600 | 0.659 | 0.000949 | 0.000004 |
| 1.700 | 0.591 | 0.001434 | 0.000005 |
| 1.800 | 0.572 | 0.001184 | 0.000004 |
| 1.900 | 0.708 | 0.001434 | 0.000005 |
| 2.000 | 0.572 | 0.001697 | 0.000006 |

=====

MASS BALANCE INFLOW - OUTFLOW VOLUME

=====

*** INFLOW (CU METERS) ***

| | WATER | BULKED W/SEDIMENT |
|-------------------|----------|-------------------|
| INFLOW HYDROGRAPH | 13503.02 | 26943.00 |

=====

*** OUTFLOW (CU METERS) ***

| OVERLAND FLOW | WATER | BULKED W/SEDIMENT |
|--------------------------------|----------|-------------------|
| FLOODPLAIN STORAGE | 13968.55 | 26943.03 |
| FLOODPLAIN OUTFLOW HYDROGRAPH | 0.00 | 0.00 |
| FLOODPLAIN OUTFLOW AND STORAGE | 13968.55 | 26943.03 |

=====

*** TOTALS ***

| | | |
|-------------------------------------|----------|----------|
| TOTAL OUTFLOW FROM GRID SYSTEM | 0.00 | 0.00 |
| TOTAL VOLUME OF OUTFLOW AND STORAGE | 13968.55 | 26943.03 |

SURFACE AREA OF INUNDATION REGARDLESS OF THE TIME OF OCCURRENCE:
(FOR FLOW DEPTHS GREATER THAN THE "TOL" VALUE TYPICALLY 0.1 FT OR 0.03 M)

THE MAXIMUM INUNDATED AREA IS: 67225.00 SQ. METERS

REFERENCIAS

- Aster Volcano Archive (AVA). 2016. Imágenes satelitales tipo ASTER. Recuperado de <http://ava.jpl.nasa.gov/index.php>
- Barclay, J.; Alexander, J.; y Susnik, J, 2007. Rainfall-induced lahars in the Belham Valley Montserrat, West Indies, *Journal of the Geological Society, London*, 164: 815–827.
- Beverage, J.P., Culberson, J.K., 1964. Hyperconcentrations of suspended sediment: *Journal of the Hydraulics Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers*, v. 90, p.117-128.
- Borcelli, L. y Sarocchi, D., 2004, 2012. DECOLOG www.DECOLOG.org
- Boudal, C., Robin, C., 1987. Relations entre dynamismes eruptifs et réalimentations magmatiques d'origine profonde au Popocatepetl: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 25, 955-971.
- Caballero, G, A. M., 2012. Dinámica de flujos de escombros: Nuevas evidencias a partir de datos experimentales, Tesis que para obtener el grado de Doctora en Ciencias. Instituto de Geología, UNAM.
- Capra, L., Poblete, M.A., Alvarado, R., 2004. The 1997 and 2001 lahars of Popocatepetl volcano (Central México): textural and sedimentological constraints on their origin and hazards: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131, 351-369.
- CENAPRED, 2007. Reporte de la actividad del volcán Popocatepetl. Recuperado de <http://www.gob.mx/cenapred>
- CNA-SMN. 2015. Archivos de datos de Normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado de <http://smn.conagua.gob.mx>
- Costa, J. E., 1984. Physical geomorphology of debris flow. In: J.E. Costa and Fleischer, P.J. *Developments and applications of Geomorphology*. Springer-Verlag, Berlin, p 268-317.
- Costa, J.E., 1988. Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flow and debris flow, in Baker , V.R., Kochel, R.C., and Patton, P. C., eds., *Flood geomorphology*: John Wiley and Sons, New York, p. 113-122.
- Folk, R.L., and Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters: *Journal of Sedimentary Petrology*, v.27,p 3-26.

- Franco, R. O., 2005. Geomorfología del volcán Popocatepetl. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Tesis de licenciatura.
- Franco, R. O., Castillo, M. y Muñoz-Salinas, E. 2016. Using tree-ring analysis to evaluate the intra-eruptive lahar activity in the Nexpayantla Gorge, Popocatepetl Volcano (Central Mexico). *Catena* 147, 205-215.
- Jeff V. P., Saeid T., 2007. Selection of Manning's Roughness Coefficient for Natural and Constructed Vegetated and Non-Vegetated Channels, and Vegetation Maintenance Plan Guidelines for Vegetated Channels in Central Arizona. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- González, A.E., Delgado, H., Urrutia, J., 1997. The San Nicolás Lahar at Popocatepetl Volcano (México): a case study of a glacier-ice-melt-related debris flow, triggered by a blast at the onset of a plinian eruption en *Abstracts of International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, General Assembly, Puerto Vallarta, Jalisco, México, Gobierno de Jalisco, Secretaría General, Unidad Editorial, 94.*
- González, A.E., 2000. Estudios de detalle estratigráfico y sedimentológico del Lahar de San Nicolás en el flanco noreste del volcán Popocatepetl. Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 109 p.
- Iverson, R. M., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, v. 35, p.245-296.
- Iwamoto, M. 1996. Prevention of disasters caused by debris flows at Unzen volcano, Japan, En; Slaymayer, O. (ed.), *geomorphic hazards*. John Wiley and Sons, 95-110.
- Lavigne, F., 1998. Les lahars du volcan Merapi, Java central, Indonésie: déclenchement, Budget sédimentaire, dynamique et zonage des risques associés. Tesis Doctoral, Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand, 539 p.
- Macías J.L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, tomo LVII, núm. 3, p 379-424.
- Mooser, F., 1967. Tefrocronología de la Cuenca de México para los últimos treinta mil años: México, *Boletín del Instituto Nacional de Antropología e Historia*, 30, 12-15.
- Muñoz, E., 2007. Los lahares del Popocatepetl: obtención y tratamiento de la información para la prevención de riesgos, Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 229 p.

- Muñoz-Salinas, E.; Manea, V.C.; Palacios, D.; y Castillo-Rodríguez, M., 2007. Estimation of lahar flow velocity on Popocatépetl volcano (Mexico), *Geomorphology*, 92: 91-99.
- Muñoz-Salinas, E., Castillo-Rodríguez, M., Manea, V., Manea, M., Palacios, D., 2009. Lahar flow simulations using LAHARZ program: Application for the Popocatépetl volcano, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182(1-2), 13–22.
- O'Brien J.S. and Julien, P., 1985. "Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows". *Proc. of the ASCE Specialty Conf. on the Delineation of Landslides, Floods, and Debris Flow Hazards in Utah*, Utah Water Research Laboratory, Series UWRL/g-85/03, 260-279.
- O'Brien, J. Julien, P. 1988. "Laboratory Analysis of Mudflow properties". *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE 114, 8, 877-887.
- O'Brien, J., 2009. Reference Manual. FLO-2D. Nutrioso, AZ - USA.
- Palacios, D., 1995. Rockslide processes at the North Slope of Popocatepetl Volcano: *Permafrost and Periglacial Processes*, 6(4), 345–359.
- Palacios, D., 1996. Recent Geomorphologic evolution of a glaciovolcanic active stratovolcano: Popocatepetl (Mexico): *Geomorphology*.
- Pierson, T.C., Scott, K. M., 1985. Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resources Research* v.21, p 1511-1524.
- Pierson, T.C., 1986. Flow behavior of channelized debris flow, Mount St. Helens, Washington, in Abrahams, A.D., ed., *Hillslope processes: Allen and Unwin*, Boston, p. 269-296.
- Pierson, T.C., Costa, J.C., 1987. A rheologic classification of subaerial sediment water flows: *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, v. 7, p. 1-12.
- Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.C. y Borrero, C.A., 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia and consequent mobilization, flow, and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v.41, p. 17-66.
- Pierson, T.C., 1995. Flow characteristics of large eruption-triggered debris flow at snow-clad volcanoes: constraints for debris-flow models: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 66, p. 283-294.

- Pierson, T.C., 1998. An empirical method for estimating travel times for wet volcanic mass flows. *Bulletin of Volcanology* v.60, p. 98-109.
- Proietti, C., M. Coltelli, M. Marsella, and E. Fujita., 2009. A quantitative approach for evaluating lava flow simulation reliability: LavaSIM code applied to the 2001 Etna eruption, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10(9).
- Rickenmann, D.1999. Empirical relationships for Debris Flows. *Natural Hazards* 19:47-77.
- Robin, C., 1984, Volcan Popocatepetl (Mexico): Structure, petrology and risks: *Bulletin of Volcanology*, 47, 1–23.
- Robin, C., Boudal, C., 1987. A gigantic bezymianny-type event at the beginning of modern volcan Popocatepetl: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31, 115–130.
- Sarocchi D., Borselli L., Macías J.L., 2005. Construcción de perfiles granulométricos de depósitos piroclásticos por métodos ópticos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 22, núm. 3, 2005, p. 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. Tesis Doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Scott, K.M., 1988a. Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River system: U.S. Geological Survey Professional Paper 1447-A, 74 p.
- Scott, K.M., Vallance, J.W y Pringle, P.P., 1995, Sedimentology, behavior and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1547, 56 p.
- Selby, M., 1985. *Earth's Changing Surface: An Introduction to Geomorphology*. Clarendon Press, Oxford.
- Sheridan, M.F., Hubbard, B., Bursik, M.I., Abrams, M., Siebe, C., Macías, J.L., Delgado, H., 2001. Gauging short-term volcanic hazards at Popocatépetl: *EOS, Transactions American Geophysical Union*.
- Siebe, C., Macías, J.L., Abrams, M., Obenholzner, J., 1996a. La destrucción de Cacaxtla y Cholula: un suceso en la historia eruptiva del Popocatépetl: *Ciencias*, 41, 36-45.

- Siebe, C., Abrams, M., Macías, J.L., Obenholzner, J., 1996b. Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, Central México: Past key to the future? *Geology*, 24, 399-402
- Siebe, C., Macías, J.L., Abrams, M., Rodríguez, S., Castro, R., 1997. Catastrophic Prehistoric eruptions at Popocatepetl and Quaternary explosive volcanism in the Serdán-Oriental Basin, East-Central México, IAVCEI, General Assembly, 88 p.
- Siebe, C., Macías, J.L., 2004. 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 de Chichinautzin Volcanic Field: Geological Society of America, Fieldtrip Books 1, 77 p.
- Smith, G. A. & Fritz, W.J., 1989. Volcanic influences on terrestrial sedimentation: *Geology*, v. 17, p. 375-376.
- Smith, G.A., Lowe, D.R., 1991. Lahars: volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow hiperconcentrated flow continuum. *Sedimentation in Volcanic Settings*, SEPM Special Publication 45, 59-70.
- Sohn, Y.K., 1997. On traction-carpet sedimentation: *Journal of Sedimentary Research*, v.67, p. 502-509.
- Sosa-Ceballos, G., Gardner, J.E., Siebe, C., Macías, J.L., 2012. A caldera-forming eruption ~14100 14C yr BP at Popocatepetl volcano, México: Insights from eruption dynamics and magma mixing: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 213-214, 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, 2-20.
- Spataro, W., D'Ambrosio, R. Rongo, and G. A. Trunfio 2004. An evolutionary approach for modelling lava flows through cellular automata, *Cellular Automata*, 725-734, Springer; doi: 10.1007/978-3-540-30479-1_75.
- 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*, v. 109, p. 143-163.
- Vallance, J. W., 2000. Lahars. *Encyclopedia of volcanoes*. Academic press.

Vallance, J. W., Iverson, R.M., 2015. Lahars and Their Deposits. The Encyclopedia of volcanoes, Second Edition, 649-664.

Van Bemmelen, R.W., 1949. The geology of Indonesia, vol. 1A: government Printing Office. The Hague.

Vázquez, R., Capra, L., L, Caballero., Arámbula-Mendoza, R., Reyes-Dávila, G., 2014. The anatomy of a lahar: Deciphering the 15th September 2012 lahar at Volcan de Colima, Mexico. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 272, 126-136.