



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA
Colegio de Geofísica

*Estudio vulcanológico y simulación numérica de lahares
ocurridos en el flanco oeste del volcán Popocatepetl después
del sismo del 19 de septiembre de 2017.*

TESIS

Para obtener el grado de
Licenciatura en Ingeniería Geofísica

Presenta

Lizeth Mariela Cortes López

Director de Tesis Interno:

M.C. Julio Cesar González Hernández

Director de Tesis Externo:

Dra. Lucia Capra Pedol

Puebla, Pue. Octubre 2019



Oficio No. D-SA 2278/2018

C. LIZETH MARIELA CORTES LÓPEZ
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
GEOFÍSICA
Presente.

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

"ESTUDIO VULCANOLÓGICO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAHARES OCURRIDOS EN EL FLANCO OESTE DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL DESPUÉS DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DEL 2017".

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como asesor al Mtro. Julio César González Hernández.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z. a 03 de octubre de 2018

M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

M^{FDLH}/M^{IAJT}/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

El que suscribe: Mtro. Julio César González Hernández, Asesor del tema de tesis:

"ESTUDIO VULCÁNOLÓGICO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAHARES OCURRIDOS EN EL FLANCO OESTE DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL DESPUÉS DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DEL 2017".

Presentada por la C. Lizbeth Mariela Cortes López, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. D- SA 2278/2019 con fecha de emisión 03 de octubre de 2018, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Z. a 22 de septiembre de 2019


M.C. Julio César González Hernández
Asesor

M'JCGH/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

Dedicatoria:

A mis padres y hermana por su amor incondicional.

El propósito de la educación es reemplazar una mente vacía con una abierta.

Malcolm Forbes

Agradecimientos

Todo idea y significado que concibo de amor, admiración, esfuerzo, trabajo es sin duda alguna, gracias a mis papás, por eso estas líneas son de agradecimiento eterno a mis padres y hermana por siempre creer en mí, por su apoyo en todas las decisiones que he realizado, malas o buenas, por sus enseñanzas de vida, consejos y por cada palabra que me expresaron para guiarme durante mi vida, muchas gracias papá, mamá. Quiero agradecer a mis abuelos, por darle un significado tan grande para mí a la palabra: familia.

Un agradecimiento muy especial es para mí asesora Doctora Lucia Capra quien me aceptó para realizar esta tesis en el Centro de Geociencias UNAM, por compartir sus conocimientos en campo, en laboratorio, en las clases, por dedicarle parte de su tiempo a la revisión de esta investigación, quien me proporcionó la asesoría académica para orientarme, por resolver dudas que surgían en la metodología. Por proporcionarme su confianza. Le agradezco sinceramente.

A CONACYT, ya que este trabajo de tesis fue financiado por el proyecto CONACYT-PN 360, *"Prevención de desastres naturales asociados a eventos hidrometeorológicos en volcanes activos mexicanos"*, cuyo responsable técnico es la Dra. Lucia Capra Pedol.

A mi universidad BUAP, a mis profesores del colegio de Geofísica, por compartirme sus conocimientos en el aula o fuera de esta, a mi asesor Maestro Julio, al jurado Mtro. José Castillo, Ing. Manuel Uribe por la revisión y sugerencias para la mejora de esta tesis. Muchas gracias.

A mis amigos y compañeros, con los que compartí momentos muy agradables, pero también momentos tristes, apoyándonos mutuamente. Siempre aprendiendo de cada uno. Gracias.

La forma de devolver el apoyo brindado es convertirme en una profesionista critica, honesta, humilde y trabajadora.

Índice

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos de la investigación	2
1.4 Alcances	3
1.5 Limitaciones	3
Capítulo 2: Marco Geológico	4
2.1 Zona de estudio	4
2.2 Geología local	5
2.3 Historia Eruptiva	6
2.4 Lahares en el Popocatepetl	7
Capítulo 3: Marco Teórico	10
3.1 Conceptos utilizados	10
3.2 Lahares	12
3.3 Tipos de lahares	13
3.3.1 Flujos hiperconcentrados	14
3.3.2 Flujos de escombros	14
3.4 Transición entre flujos	17
Capítulo 4: Metodología	19
4.1 Características granulométricas	19
4.2 Morfología del oeste del volcán Popocatepetl	20
4.3 Imágenes Spot	22
4.4 Simulación numérica	23
Capítulo 5: Resultados	26
5.1 Barranca San Juan Tehuixtitlan	26
5.1.1 Comparación de las características granulométricas de las muestras analizadas	41
5.2 Barranca Huitzilac	45
5.2.1 Comparación de las características granulométricas de las muestras analizadas	56

5.3 Datos de entrada para la simulación	58
5.4 Resultados de las simulaciones	60
Capítulo 6: Discusión.....	64
Capítulo 7: Conclusiones	67
7.1 Recomendaciones	68
Bibliografía	69

Capítulo 1: Introducción

Lahar, una definición propuesta en 1988 en la Conferencia de la Sociedad Geológica de América Penrose, es un término que describe a flujos rápidos de agua y sedimentos, que se desarrollan en las laderas de un volcán bajo la fuerza de gravedad (Smith y Fritz, 1989). El término es usado para referirse al proceso físico y no al depósito (Smith *et al*, 1989).

Muchos son los procesos que pueden desencadenar lahares incluidas las erupciones, sismos, fuertes lluvias, derretimiento de nieve o deslizamientos. El comportamiento de los lahares varía de acuerdo a la cantidad, tipo y distribución del sedimento incorporado en su recorrido descendente. Los lahares son uno de los eventos más destructivos, capaces de movilizar grandes volúmenes de sedimentos y producen efectos devastadores para la población y la infraestructura que se ubica en las faldas de los volcanes, por lo que su estudio es de gran importancia. Ejemplos de este fenómeno son los ocurridos en el Monte Santa Elena en 1980, que llegaron a recorrer más de 120 kilómetros de distancia (Janda *et al.*, 1981). El Nevado de Ruiz Colombia en 1985, con más de 20, 000 muertos, sepultando a la ciudad de Armero y los lahares ocurridos en el Volcán Pinatubo, Filipinas 1990, que sepultaron pueblos, ciudades y algunos campos de cultivo (Schmincke, 2004).

El volcán Popocatépetl (19° 03'N y 98° 35' O) es el volcán más activo de México y representa un riesgo para más de los 20 millones de habitantes que se encuentran a su alrededor. Las erupciones que han tenido un mayor impacto durante su historia eruptiva son de tipo pliniano, con la formación de columnas sostenidas de más de 20 kilómetros de altura. Sin embargo, los lahares representan los eventos que con mayor frecuencia se han originado durante y después de una erupción.

1.1 Planteamiento del problema

El volcán Popocatépetl presenta una compleja historia eruptiva, que en tiempos relativamente recientes ha sido principalmente de tipo explosivo, con la acumulación de abundante material piroclástico en sus laderas. Además, la dispersión del material durante la actividad puede ser fácilmente erosionado durante eventos de lluvia con la formación de lahares potencialmente peligrosos para las poblaciones aledañas al volcán.

1.2 Justificación

Los lahares que son mezcla de agua con sedimentos, representan gran amenaza a las poblaciones cercanas al volcán Popocatepetl, por lo que se vuelve necesario el estudio de estos eventos. En el presente trabajo, este estudio se realiza por medio de un análisis granulométrico y por modelaciones numéricas de fenómenos laháricos.

Este análisis es de gran importancia ya que es la primera vez que se observan dentro de las barrancas San Juan Tehuixtitlan y Huitzilac, además que llegaron a observarse en la población de San Juan.

1.3 Objetivos de la investigación

General

Caracterizar y simular eventos laháricos ocurridos después del sismo del 19 de septiembre de 2017 en el lado oeste del volcán, mediante observaciones en campo, caracterización de los depósitos y simulaciones numéricas para determinar el comportamiento de estos lahares.

Particulares

- Definir la extensión de los lahares ocurridos en las barrancas San Juan Tehuixtitlan y de la barranca Huitzilac después de sismo del 19 de septiembre de 2017, para conocer el alcance que presentan en estas barrancas, a través de una correlación con las observaciones en campo, las simulaciones realizadas, y por las imágenes spot.
- Identificar las características de los lahares ocurridos en las barrancas San Juan Tehuixtitlan y de la barranca Huitzilac, a través de datos de campo y de análisis granulométrico de las muestras recolectadas, para conocer su comportamiento dinámico.
- Llevar a cabo la simulación del lahar ocurrido en la barranca de San Juan Tehuixtitlan mediante el modelo matemático FLO-2D para reproducir el evento y definir las zonas de inundación.

1.4 Alcances

Con la realización de esta investigación, se pretende que proporcione información que ayude a un mejor entendimiento de las características que distinguen a estos eventos laháricos ocurridos en la parte oeste del volcán Popocatepetl. Los resultados de este trabajo pueden ser de utilidad para estudios posteriores relacionados a eventos con características similares a los aquí estudiados.

1.5 Limitaciones

Limitaciones: Este trabajo está delimitado a el estudio solo de dos barrancas (Barranca San Juan Tehuixtitlan y Barranca Huitzilac) en el oeste del volcán Popocatepetl, y la simulación del evento solo en la Barranca San Juan.

Capítulo 2: Marco Geológico

2.1 Zona de estudio

El volcán Popocatepetl debe su nombre a *popota*, que se traduce como “humar” y *tepet* “montaña o monte”, es decir, montaña que humea en el lenguaje náhuatl. Se localiza bajo las coordenadas 19° 03' N y 98° 35' O (Figura 1), tiene una altitud de 5450 metros y constituye la segunda cumbre más alta de México después del Pico de Orizaba (5675 m).

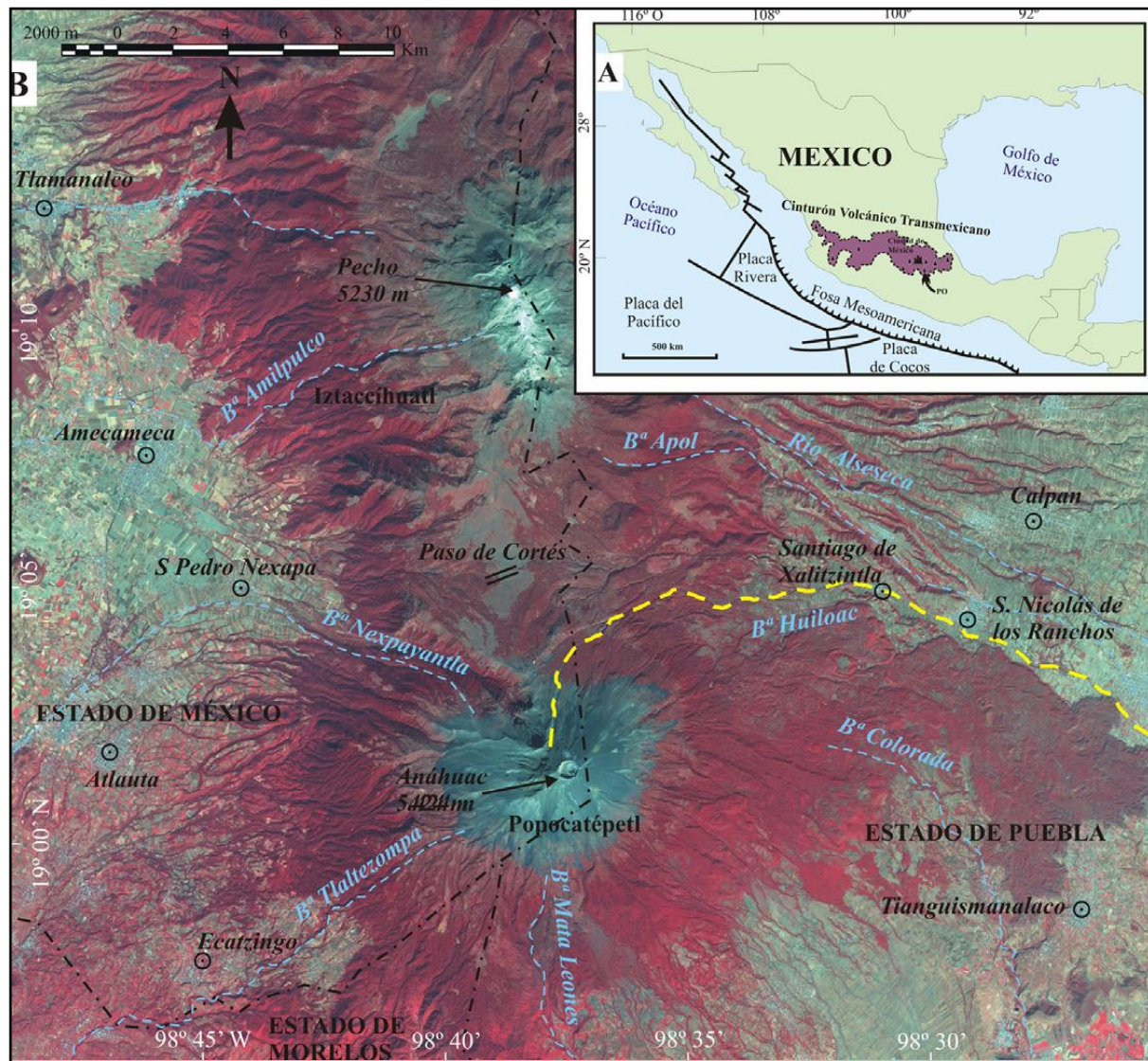


Figura 1: Localización geográfica del volcán Popocatepetl.

Se ubica entre los estados de Puebla, Morelos y México, a tan solo 65 km de la Ciudad de México y a 45 km de la ciudad de Puebla. El Popocatepetl junto con los volcanes Iztaccíhuatl, Tlaloc y Telapón, constituye la Sierra Nevada, la cual forma parte del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), formado por una serie de volcanes aislados, pequeños grupos de volcanes y grandes cadenas montañosas volcánicas que cruzan el altiplano central de México, desde la costa de Nayarit, en el pacífico, hasta las de Veracruz, en el Golfo de México. Al norte colinda con el complejo volcánico Iztaccíhuatl a través del paso de Cortés. En sus vertientes E y SE, rodeado por los valles de Puebla y Atlixco. Al W y SW las laderas del Popocatepetl descansan sobre una morfología de montículos producto de los derrumbes de avalanchas del volcán (Siebe et al., 1995).

El CVTM se desarrolló durante el Neógeno-Cuaternario, su longitud es de 1200 km y su anchura se encuentra entre los 50 y 250 km aproximadamente (Muñoz, E., 2007). Los volcanes que presentan mayor actividad dentro del CVTM son el Popocatepetl, el Pico de Orizaba y el volcán de Colima.

2.2 Geología local

El volcán Popocatepetl es un volcán de composición dacítico- andesítica de edad plio-cuaternaria que ha tenido actividad en los últimos 23,000 años (Robín Baudal, 1987), esta actividad ha variado desde erupciones efusivas como derrames de lava hasta erupciones de tipo explosivo que han ocasionado colapsos parciales del edificio volcánico.

El basamento en el sector del Popocatepetl comprende calizas cretácicas (Formaciones Cuautla y Morelos), arenitas y evaporitas del Terciario (Fries, 1960; 1996) y aflora al S del volcán en altitudes entre los 1,200 y 1,700 msnm. Estas formaciones fueron plegadas por la orogenia Laramide y cubiertas discordantemente por sedimentos terrígenos del Grupo Balsas en el Eoceno-Oligoceno. Estas formaciones fueron intruidas por pequeños sills subvolcánicos de granodiorita, hace ~20.7 Ma (fechamientos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Gómez-Tuena et al., 2008) que produjeron aureolas de metamorfismo de contacto, con mineralizaciones locales de tipo skarn metasomatizado (Aguilar- Murillo, 2012; Mares-Tepanohaya, 2014).

El vulcanismo en el área inició en el Mioceno, como lo evidencian las rocas calco-alcalinas de la Formación Tepexco (Fries, 1960). Afloramientos de lavas andesíticas del terciario y secuencias volcanoclasticas pueden encontrarse en la parte sur y este del volcán. Las cuales están sobrepuestas por sedimentos del lago hacia el sur y están compuestas de calizas y lutitas intercaladas con ceniza volcánica.

2.3 Historia Eruptiva

En el historial eruptivo del volcán Popocatepetl se han reconocido al menos 7 erupciones plinianas de gran magnitud durante los últimos 25,000 años del Pleistoceno tardío al Holoceno. También se tienen registradas numerosas erupciones de menor magnitud generalmente erupciones vulcanianas.

Durante el siglo XX el volcán presentó actividad explosiva en el periodo de 1919 a 1927, con erupciones de ceniza y la formación de un pequeño domo en el interior del cráter, seguido por un periodo de calma de varias décadas (Cenapred, 2011). El Popocatepetl reanudó su actividad eruptiva el 21 de diciembre de 1994, amenazando a las poblaciones cercanas y poniendo en alerta a las autoridades de Protección Civil. La nueva actividad todavía en curso, ha consistido en la emisión intermitente de cenizas y de gases (Love et al., 1997; Goff et al., 1998; Stremme et al., 2011), asociada a episodios de crecimiento y destrucción del domo emplazado en el interior del cráter (Macías y Siebe, 2005).

Erupciones del volcán Popocatepetl	
Año	Descripción
1579	Emisiones de ceniza y fumarolas.
1594	A partir de esta fecha y a inicios del siglo XVII el volcán entra en un periodo de calma.
1664	Caída de ceniza y pómez que se emplaza en Puebla al 50 km al este del volcán.
1697	Se reportan balísticos, emisiones de ceniza.
1717-1720	Erupciones con incandescencia
1804	Emisiones de ceniza.
1919-1921	Reactivación de un nuevo periodo eruptivo, erupción con basálticos, emisiones de ceniza y sismicidad volcánica.

1921-1930	Cese de la actividad volcánica
1947	Fuertes sismos en relación a la actividad volcánica, expulsión de ceniza y vapor de agua.
1994	El volcán entra en una nueva fase de actividad eruptiva caracterizada por la emisión de ceniza, flujos piroclásticos, expulsión de material incandescente.
1995	Ocurrencia de un lahar consecuencia de la emanación de Piroclastos.
1997	Explosión intensa del volcán, originando lahares los cuales llegaron a las poblaciones cercanas.
1996	Inicio de emplazamiento y destrucción de domos, dentro del cráter, erupción con balísticos, emisiones de ceniza, fumarolas.
1998	Fuertes explosiones, sismos de origen volcanotectónico, actividad exhalaciones de baja a moderada intensidad.
2000	Se realiza una evacuación preventiva debido a la intensidad de la actividad volcánica.
2001	Erupción importante que originó lahares y flujos piroclásticos que recorrieron hasta 6 km y afectaron la ladera N-NW.
2003	Exhalaciones de baja intensidad, producción de columnas de ceniza de 4 km, emisión de balísticos.
2006	Explosión de gran amplitud.
2010-2011	Explosiones de gran magnitud asociadas a la construcción y destrucción de domos.
2013-2017	Paulatinos incrementos de la actividad volcánica, exhalación de ceniza, vapor de agua, sismos de origen volcanotectónicos.

Tabla 1: Resumen de la dinámica eruptiva del volcán Popocatépetl a partir de 1579 (basado en Martin del Pozzo et al., 2016)

2.4 Lahares en el Popocatépetl

La actividad eruptiva que presenta el Popocatépetl es un factor importante para la formación de procesos laháricos, ya que aporta material no consolidado sobre las laderas del volcán, el cual puede ser transportado por un aporte de agua.

La actividad del Popocatépetl ha causado varios eventos laháricos, de los cuales los más destacados han sido asociados a una etapa eruptiva del volcán como en julio de 1997 y en enero de 2001. Estos lahares recorrieron una distancia aproximada de 12 km, llegando al poblado de Santiago Xalitzintla.

La erupción del 30 de julio de 1997 comenzó a las 23:11 hrs, y fue caracterizada por dos pulsos principales. El primero duró 135 minutos, mientras que el segundo comenzó a las 01:26 hrs del día 1 de julio el cual tuvo una duración alrededor de 90 minutos. Esta erupción generó una enorme pluma que alcanzó en unos minutos 8 kilómetros de altura. Debido a la explosión, una capa de ceniza cubrió gran parte del glaciar, lo que provocó su deshielo parcial (Palacios et al., 2001). La escorrentía resultante saturó los materiales de la cabecera de las barrancas Tenenepanco y la Espinera de la ladera norte del volcán, como resultado se formaron flujos laháricos el 1 de julio de 1997. Estos se movilizaron por la parte norte del volcán a lo largo de la barranca Huiloac propagándose hasta llegar al pueblo de Santiago Xalizintla donde finalizó el evento.

Este flujo inició como hiperconcentrado y al ir incorporando material, se transformó en un flujo de escombros para después progresivamente diluir a un flujo hiperconcentrado en la parte final (Capra et al., 2004). Este lahar transportó $1.85 \times 10^5 \text{ m}^3$ de material sólido y de agua con una velocidad entre de 1.4 a 7.7 m/s (Muñoz-Salinas et al., 2009), deteniéndose en el poblado de San Nicolás de los Ranchos, Puebla.

En los años 1998 y 1999 el volcán también registró una intensa actividad eruptiva. Durante los meses de marzo y mayo de 1999 se observaron pequeños lahares, relacionadas con el deshielo del glaciar que fue ocasionado por la caída de piroclastos sobre su superficie y que descendieron por la barranca de Tenenepanco.

El 22 de enero de 2001 el volcán inició una exhalación de vapor de agua, que alcanzó un kilómetro de altura. A las 16:15 hrs incrementó la actividad explosiva, y las 16:23 hrs originó una columna eruptiva de 8 kilómetros de altura, generando flujos piroclásticos que descendieron por las barrancas Tenenepanco, la Espinera y Tepeteloncocone (Sheridan et al., 2001). Los flujos piroclásticos erosionaron parte del glaciar y después de aproximadamente 5 horas el depósito de flujo piroclástico se removilizó originando un lahar en la barranca Tenenepanco, que continuó por la barranca de Huiloac y finalizó 2 km antes de alcanzar la población de Santiago Xalizintla. (Figura 2).

El lahar de 2001 mantuvo sus características de flujo de escombros a lo largo de su desarrollo, sin sufrir un proceso de dilución (Capra et al., 2004). El volumen transportado fue de $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ (Muñoz-Salinas et al., 2009) y desarrollo velocidades comprendidas entre 1.3 y 13.8 m/s (Muñoz-Salinas et al., 2007).

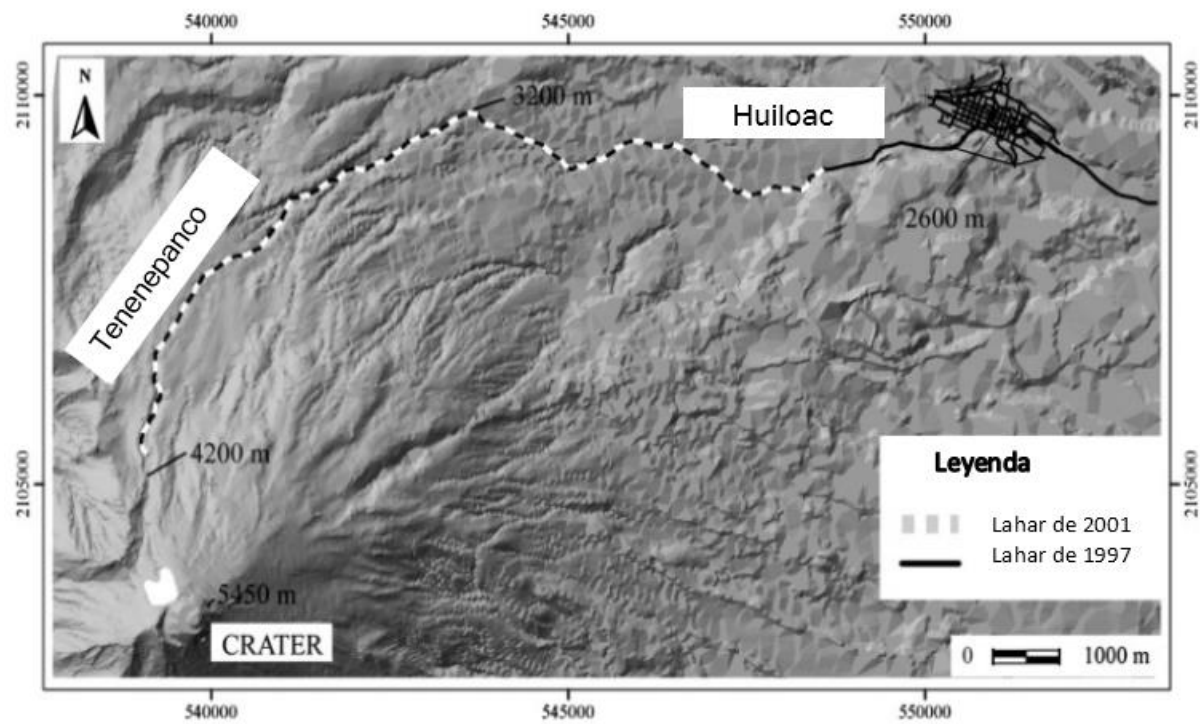


Figura 2: Lahares de 1997 y 2001 ocurridos en el Popocatépetl, en las barrancas Tenenepanco y Huiloac. Muñoz, 2004.

Capítulo 3: Marco Teórico

3.1 Conceptos utilizados

- Peligro: Es la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno que puede producir un daño sobre un sistema. (Chardon & González, 2002).
- Amenaza: Es un evento que se vuelve peligroso, pasando de lo posible a lo probable. (Servicio Geológico Mexicano).
- Exposición: Cantidad de personas, bienes, valores e infraestructura que son susceptibles de ser dañados (Servicio Geológico Mexicano).
- Vulnerabilidad: Propensión de los sistemas expuestos (asentamientos humanos, infraestructura) a ser dañados por el efecto de un fenómeno (Servicio Geológico Mexicano, www.gob.mx).
- Riesgo: Probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre un sistema. (CENAPRED, 2014). Está representada por: $\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{vulnerabilidad}$.
- Percepción Remota: Disciplina basada en la ciencia y tecnología que permite desarrollar, capturar, procesar y analizar imágenes, junto con otros datos físicos de la Tierra, obtenidos desde sensores que capturan datos de mediciones in situ. Los sensores remotos cumplen la misión de ofrecer información en diferentes regiones del espectro electromagnético. La capacidad de registrar información en las regiones del espectro electromagnético, permite caracterizar objetos en la superficie terrestre dependiendo de la región que se trabaja y es una fuente de información relevante. (CENTROGEO, 2016).
- Sistemas de Información Geográfica (SIG): Conjunto de herramientas unificadas por software y hardware que facilitan el uso, la visualización, la manipulación, el almacenamiento, recuperación y operaciones aritméticas de información geo-

espacial, así como el manejo de la base de datos relacionados con dicha información. (National Center for Geographic Information and Analysis of USA, 1990).

- **Imágenes Alos:** El ALOS PALSAR DEM es uno de los múltiples recursos cartográficos disponibles dentro de los productos del satélite ALOS de Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), que adquirió imágenes rádar entre 2006 y 2011. ALOS (Advanced Land Observation Satellite) también conocido como DAICHI, lleva a bordo tres sensores: el PRISM para imágenes pancromáticas, el rádar de apertura sintética PALSAR y el radiómetro AVNIR (GeoSpatial, 2013).
- **Imágenes Spot:** El satélite SPOT-7 es el último satélite de la serie SPOT que han estado realizando imágenes ópticas en Alta Resolución desde 1986. Lanzado el 30 de junio del 2014. La imagen satelital SPOT presenta una frecuencia de paso de 26 días, producen imágenes pancromáticas que solo tienen información de una banda del espectro electromagnético, por lo que se despliega en tonos de gris e imágenes multiespectrales que constan de 4 bandas del espectro electromagnético, por lo que se pueden desplegar en una combinación de dos o tres bandas en un falso color (GEOCENTO, Earth imaging, 2015).
- **Media (Mz):** Determina el diámetro promedio en cada muestra y su valor está en unidades de phi. Se obtiene mediante la fórmula: *(Tomado de Caballero L.,2012)*.

$$Mz = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad [1]$$

- **Desviación estándar (σ):** Mide el grado de dispersión de valores en relación a la media y determina el grado de selección de las mezclas, mientras más alto es su valor, peor es el grado de selección (Caballero L., 2012).

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \quad [2]$$

- Asimetría (Sk): Mide la simetría de la curva, valores positivos indican una “cola” en el lado derecho del histograma o un exceso de material fino, valores negativos se originan cuando existe una “cola” en el lado izquierdo del histograma e implican un exceso de material grueso en las mezclas (Caballero L., 2012).

$$Sk = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad [3]$$

- Curtosis (k): Mide la relación entre el grado de selección en los extremos y la parte central de la curva. Si la porción central está mejor seleccionada que los extremos, los valores son más altos y la curva es leptocúrtica o “picuda”, si los extremos están mejor seleccionados que la parte central, su valor es menor y la curva es platicúrtica o “plana”. La Curtosis al igual que la desviación estándar, es indicativa del grado de selección, ya que entre más pobre sea la selección, más plana es la curva (Caballero L., 2012).

$$Mz = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})} \quad [4]$$

3.2 Lahares

Lahar es una palabra de origen indonesio que se refiere a un flujo de agua mezclado con fragmentos de roca de origen volcánico de diferentes tamaños el cual fluye bajo la fuerza de gravedad en las laderas de un volcán. El término es utilizado para referirse al proceso físico y no al depósito (Smith *et al.*, 1989). Se le denomina lahar a la removilización de material de origen volcánico. Se forma cuando capas de sedimentos poco consolidados se saturan por una cantidad de agua importante propiciando su movilización pendiente abajo (Schmincke. 2004).

Los lahares pueden ser primarios o secundarios de acuerdo a su origen. Los lahares **primarios** (syn-eruptivos) se generan durante una erupción y pueden ser disparados por saturación de agua de lluvia, lagos cratéricos o derretimiento de un glaciar, mientras que los lahares **secundarios** (post-eruptivos) se generan de forma posterior a la actividad, lo que removiliza el material depositado en las laderas (Sarocchi, 2006; Vallance *et al.*, 1997;

Vallance, 2000). Los lahares se forman por un aporte repentino de agua la cual arrastra los sedimentos poco consolidados en las laderas de un volcán

El aporte de agua se puede deber a diferentes procesos como:

- Agua de un lago cratérico: por ejemplo, en el volcán Mt. Ruapehu, Nueva Zelanda; el 18 de marzo de 2007 el agua rebasó el límite inferior del cráter originando un lahar de gran volumen.
- Ruptura de un lago: ejemplo de este tipo ocurrió en 1980 en el Chichón; los flujos piroclásticos obstruyeron el río Magdalena; después de dos meses el agua rompió el dique natural y se originó un lahar caliente.
- Derretimiento de un glaciar: 1985, Nevado del Ruiz; la actividad explosiva erosiona y funde el glaciar, se originan varias corrientes de lodo, estas corrientes se mezclan originando un lahar.
- Lluvias abundantes y continuas: ejemplo el Pinatubo en 1991; cada temporada de lluvia remueve el material piroclástico lo que ocasiona la formación de lahares.

3.3 Tipos de lahares

Los lahares se caracterizan por ser una mezcla compleja entre una fase fluida y otra sólida, que pueden generarse a partir de uno o varios flujos y cuyo movimiento puede variar dependiendo de la proporción de sedimentos y agua que los caractericen, denominándose: flujos de escombros y flujos hiperconcentrados (Tabla 2).

100 % agua			100% sedimento
Flujo de agua	Flujo Hiperconcentrado	Flujo de escombros	Avalancha de escombros
	Lahar		
Agua transportando sedimentos	Sedimentos saturados con agua		No saturados

Tabla 2: Tipos de flujos gravitacionales basados en las proporciones de agua y sedimento (tomado de Pierson y Costa, 1987; Smith y Lowe, 1991).

3.3.1 Flujos hiperconcentrados

Está formado por un 20-60% de fragmentos líticos del volumen total. La fracción sólida se mantiene en movimiento gracias a la acción de las fuerzas dispersivas, la flotabilidad y la turbulencia (Smith y Lowe, 1991). Poseen una alta capacidad de incorporación o pérdida de material. Cuando se reduce su velocidad de emplazamiento predomina el proceso de deposición en función del tamaño y densidad de las partículas.

En los flujos hiperconcentrados podemos encontrar dos zonas principales (Sohn, 1997):

- a) Zona diluida: zona relativamente de baja concentración de sedimentos en suspensión, básicamente está constituida por arcilla, limo y arena fina, pero también podemos encontrar pómez.
- b) Carpeta de tracción: zona de mayor concentración de sedimentos de tamaño de la arena y grava, que se transporta hacia la base del flujo en contacto con el sustrato, en donde hay colisión entre las partículas, alta temperatura granular y generación de presión intergranular.

Depósito: Los espesores de los depósitos de un flujo hiperconcentrado pueden variar de decenas de centímetros a algunos metros (Vallance, 2000). Son depósitos masivos, en ocasiones con estratificación muy poco desarrollada. Los estratos son generalmente horizontales, se presentan fragmentos subredondeados, tamaño de clastos uniforme (generalmente grava-limo), forma estructuras sedimentarias por el escape del agua (superficies cóncavas). Comúnmente se encuentran como depósitos moderadamente clasificados (Pierson y Scott, 1998).

3.3.2 Flujos de escombros

Está formado por fragmentos líticos entre el 60% y 90% del volumen total. El movimiento del material dentro del flujo se debe fundamentalmente a la acción de la cohesión, quedando en segundo plano los efectos de flotabilidad y turbulencia. Con base en esto se consideran flujos laminares, lo que se traduce en una mayor velocidad respecto de los hiperconcentrados (Lavigne & Suwa, 2004). Con base en el contenido de arcilla en la matriz, pueden ser de dos tipos:

Cohesivos: poseen un contenido de arcilla entre el 3 y 5 % del volumen total, lo que les da una viscosidad muy alta, haciendo las partículas de la fase sólida floten (Cortes *et al.*, 2010). Son principalmente por el colapso de edificios volcánicos con elevado grado de alteración hidrotermal. Los depósitos son generalmente masivos y no cambia de textura a lo largo de varios kilómetros (Capra y Macías, 2002).

No cohesivos: se caracterizan por un contenido de arcilla mucho menor, por lo que la fase fluida no es suficientemente viscosa, promoviendo la dirección entre partículas y su gradual separación de la fase (Capra *et al.*, 2002). Los depósitos presentan comúnmente una gradación normal.

Depósito: los depósitos de flujo de escombros son muy o poco consolidados dependiendo de sus características (cohesivo, no cohesivo) (Pierson y Scott, 1985). Los depósitos son masivos o con gradación normal o inversa de los fragmentos de menor tamaño, los clastos pueden variar de angulosos a sub-redondeados, soportados por una matriz arenosa con proporción variables en contenido de limo y arcilla.

Los flujos de escombros se mueven en forma de uno o más pulsos sucesivos que pueden estar separados por flujos de menor concentración de sedimentos, (Iverson, 1997). Los pulsos que ocurren en los flujos de escombros constan, en sección longitudinal, de tres partes (Figura 3).

Cabeza: esta tiene una alta concentración de material grueso que se acumula al frente y en los márgenes del flujo, generando resistencia al movimiento y provocando su depósito. El mecanismo de transporte dominante es saltación, seguido por arrastre y rodamiento.

Cuerpo: en el cual el flujo de escombros se encuentra totalmente desarrollado y es muy móvil. Mezcla entre la fase fluida y los fragmentos sólidos, los bloques más grandes se desplazan hacia la superficie y después son desviados hacia los límites laterales del flujo.

Cola: en esta parte la concentración de sedimentos disminuye y puede dar lugar a un flujo hiperconcentrado, puede desarrollar turbulencia. (Pierson y Scott, 1985; Pierson y Costa, 1987).

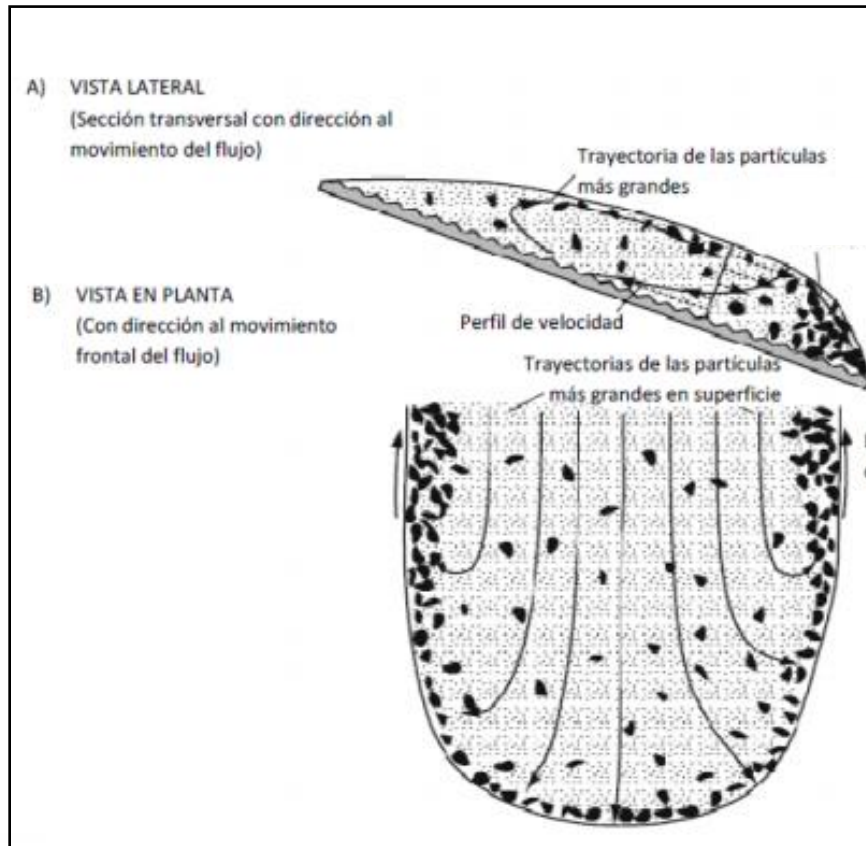


Figura 3: Diagrama que muestra las partes que conforman a un lahar. Recuperado de Vallance,2005.

Las características texturales de los depósitos indican que la sedimentación y depositación ocurre a lo largo de un proceso gradual. Los depósitos de flujos de escombros pueden presentar una gradación normal debido a la acción de la gravedad y a la sedimentación de partículas gruesas durante el transporte. También puede ser resultado de la depositación por partes, empezando por la cabeza (granos gruesos) y terminando con la cola del flujo (granos finos), (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 4).

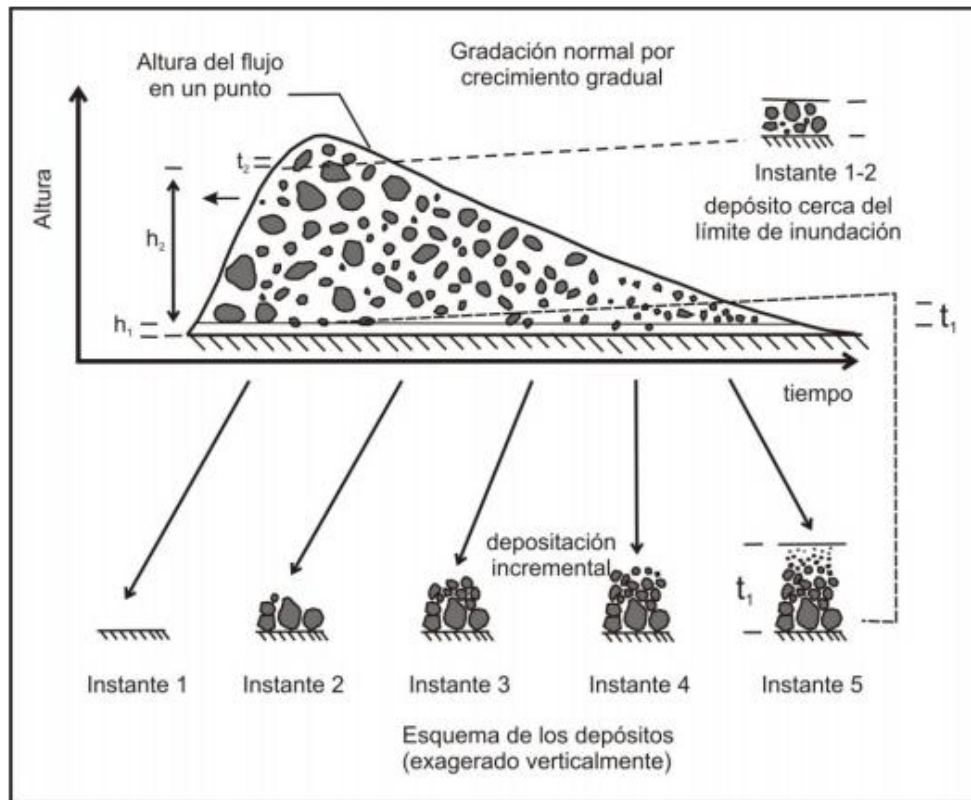


Figura 4: Esquema de gradación normal de un depósito de flujo de escombros por el mecanismo de crecimiento gradual (tomado de Vallance y Scott, 1997).

3.4 Transición entre flujos

A lo largo de la trayectoria de un lahar, es común que el comportamiento vaya cambiando desde flujo de escombros, flujo hiperconcentrado y hasta llegar a corriente fluvial y viceversa. Estos cambios en la concentración de sedimentos se definen como procesos de bulking o debulking. Estas transformaciones aparecen al frente del fluido y migra hacia la parte posterior, conforme se desplaza cuesta abajo (Fisher, 1983).

Bulking es un proceso de incorporación de material por erosión durante el transporte de un lahar. Lo cual provoca un aumento en el volumen del propio flujo (Scott, 1988).

Debulking es un proceso de dilución que ocurre mediante la incorporación gradual de agua en el frente del lahar conforme este fluye, lo que genera una pérdida progresiva de la carga, haciendo que cambie su comportamiento (Pierson y Scott, 1985).

Generalmente las transformaciones se dan en dos formas:

- a) Transición de un flujo de escombros a un flujo hiperconcentrado: si un flujo de escombros incorpora suficiente agua o deposita sedimentos a lo largo de su trayectoria río abajo puede transformarse en un flujo hiperconcentrado (Scott,1988). En el primer caso, existe incorporación de cuerpos de agua y conforme el flujo se emplaza y en el segundo los sedimentos más gruesos se depositan hacia la base por un incremento de concentración y disminución de la velocidad. En ambos casos el lahar se vuelve más diluido, decrece el tamaño medio de las partículas y mejora el grado de selección dentro del flujo.
- b) Transición de un flujo hiperconcentrado a un flujo de escombros: resulta de la alteración de la concentración de sedimentos, erosión e incorporación de sedimentos saturados. Este fenómeno incrementa la resistencia del fluido y la mezcla se vuelve capaz de mantener en suspensión sedimentos del tamaño de grava y bloques.

Capítulo 4: Metodología

4.1 Características granulométricas

Se realizaron dos salidas de campo al NW del volcán Popocatepetl. En noviembre del 2017 se visitó la barranca nombrada como San Juan Tehuixtitlan, donde se midió la profundidad del flujo con base en marca de lodo en árboles o terrazas laterales, se tomaron muestras a lo largo del depósito para realizar los análisis granulométricos (Figura 5). En marzo de 2018 se realizó una segunda salida de campo a la barranca Huitzilac de la misma manera se obtuvieron muestras a lo largo del canal, para su análisis granulométrico. Posteriormente se integró la información con asistencia de un sistema de información geográfica, por medio del software Qgis 2.18.11.

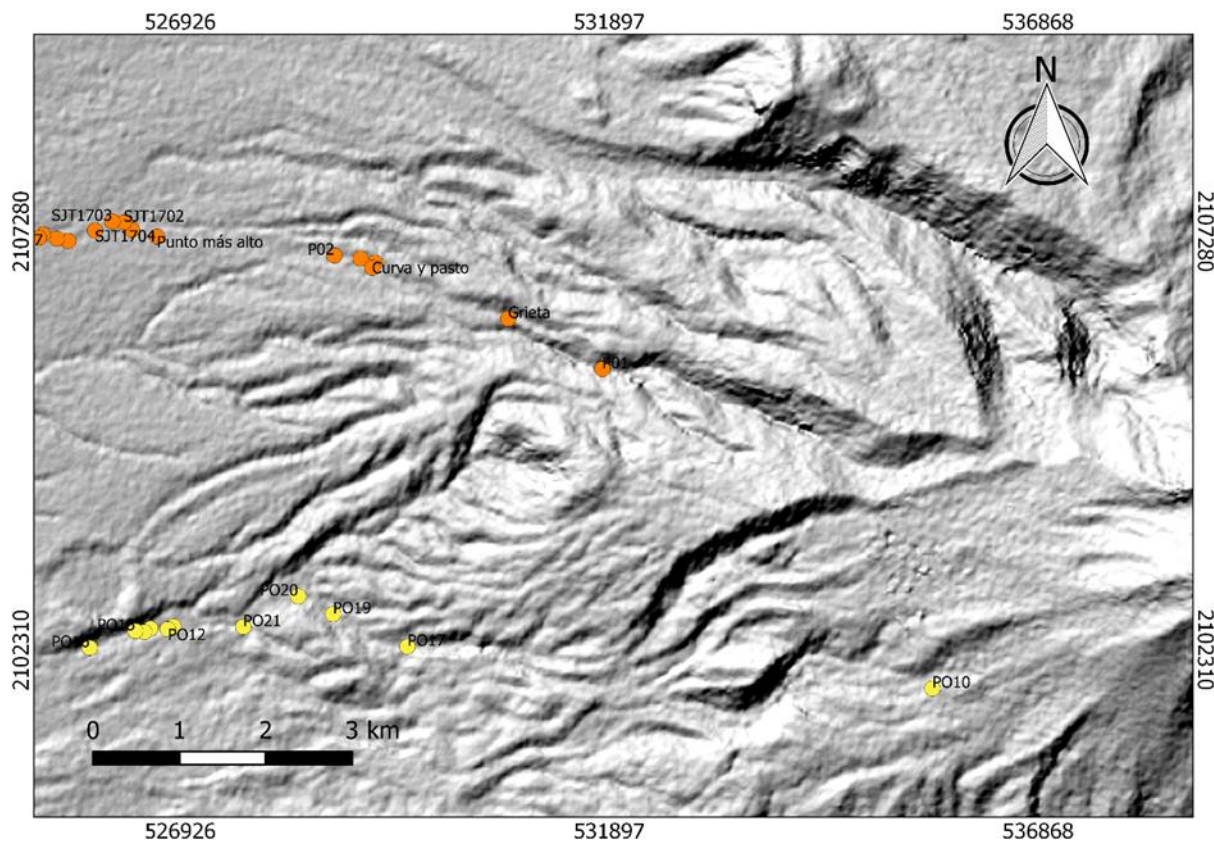


Figura. 5: Localización geográfica de los puntos muestreados para las dos barrancas, San Juan Tehuixtitlan y Huitzilac.

Todas las muestras fueron analizadas en el laboratorio de vulcanología en las instalaciones del Centro de Geociencias, UNAM. Primero las muestras que aún se encontraban húmedas fueron secadas en un horno a una temperatura de 100° C durante 24 horas aproximadamente. Posteriormente las muestras fueron tamizadas utilizando una serie de tamices con tamaños de malla de -4ϕ (16 mm) a 4ϕ (0.0625 mm) en intervalos de 1ϕ , se colocaron en el equipo tipo Ro-tap durante 5 minutos. Por cada tamiz se recogió la muestra y se colocó en una bolsa etiquetada para posteriormente pesarla en la balanza con precisión de 0.01 gr. Toda la información fue capturada en una hoja de cálculo en el programa Excel para generar una base de datos.

Las fracciones finas que quedaron en el recipiente de $> 4 \phi$ fueron analizados en el equipo de Fotosedimentógrafo de barrido marca Fritsch para llevar a cabo la determinación del contenido de partículas en las fracciones de limo y arcilla lo que nos arroja el peso de partículas más finas en el intervalo de 5ϕ a 10ϕ . Recopilando ambos datos de los procesamientos, se obtuvo el espectro granulométrico completo de ϕ de -4ϕ a 10ϕ con sus respectivos pesos en gramos. Con estos pesos se obtuvo el porcentaje en peso de cada fracción y el porcentaje en peso acumulado. Esta misma metodología se siguió para cada una de las muestras. Para representarlas se hizo a través de graficas de barra y de dispersión.

Los parámetros estadísticos de la distribución granulométrica se obtuvieron mediante el programa Decolog (Borscelli y Sarocchi 2004, 2012) (<http://decolog.org/>). Estos parámetros fueron la media, la desviación estándar, kurtosis y Skewness. Los parámetros estadísticos son los propuestos por Folk y Ward (1997).

4.2 Morfología del oeste del volcán Popocatepetl

Para el análisis de morfología se trabajó a partir de un modelo de elevación de 12.5 metros de resolución (Alos 2011). Para el análisis de cuencas hidrográficas se utilizó el programa Qgis 2.18.16 utilizando la herramienta r. watershed en la caja de herramientas de procesos. Posteriormente se delimitaron las cuencas como se observa en la figura 4 y se obtuvo el área en cada una de ellas.

La cuenca correspondiente a la barranca de San Juan Tehuixtitlan tiene un área de 6.5 km² y la cuenca que pertenece a la barranca Huitzilac posee un área de 1.2 km².

Para el mapa de pendientes se utilizó la herramienta r. slope. Este mapa (Figura 6) muestra que la porción superior del cono presenta pendientes mayores a los 30°. La parte más alta de la cuenca de San Juan también presenta pendientes superiores a los 30°, mientras que la cuenca perteneciente a la barranca Huitzilac muestra pendientes ligeramente menores con valores entre 27° a los 30°. En las partes distales a lo largo del río las pendientes disminuyen significativamente hacia valores cercanos a los 8° para la barranca de San Juan y mayor a 15° para las pendientes de la barranca Huitzilac.

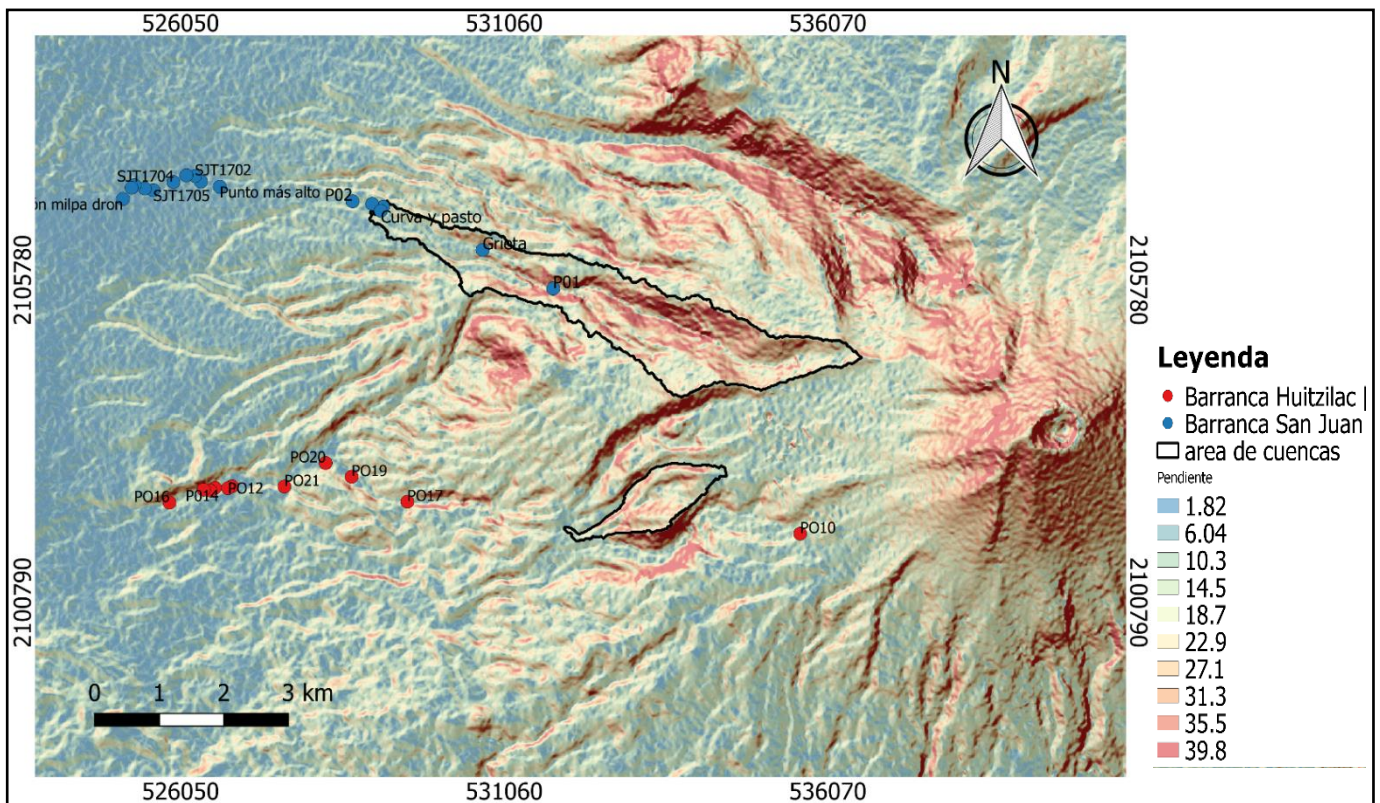


Figura 6: Mapa de pendientes y delimitación de las cuencas.

4.3 Imágenes Spot

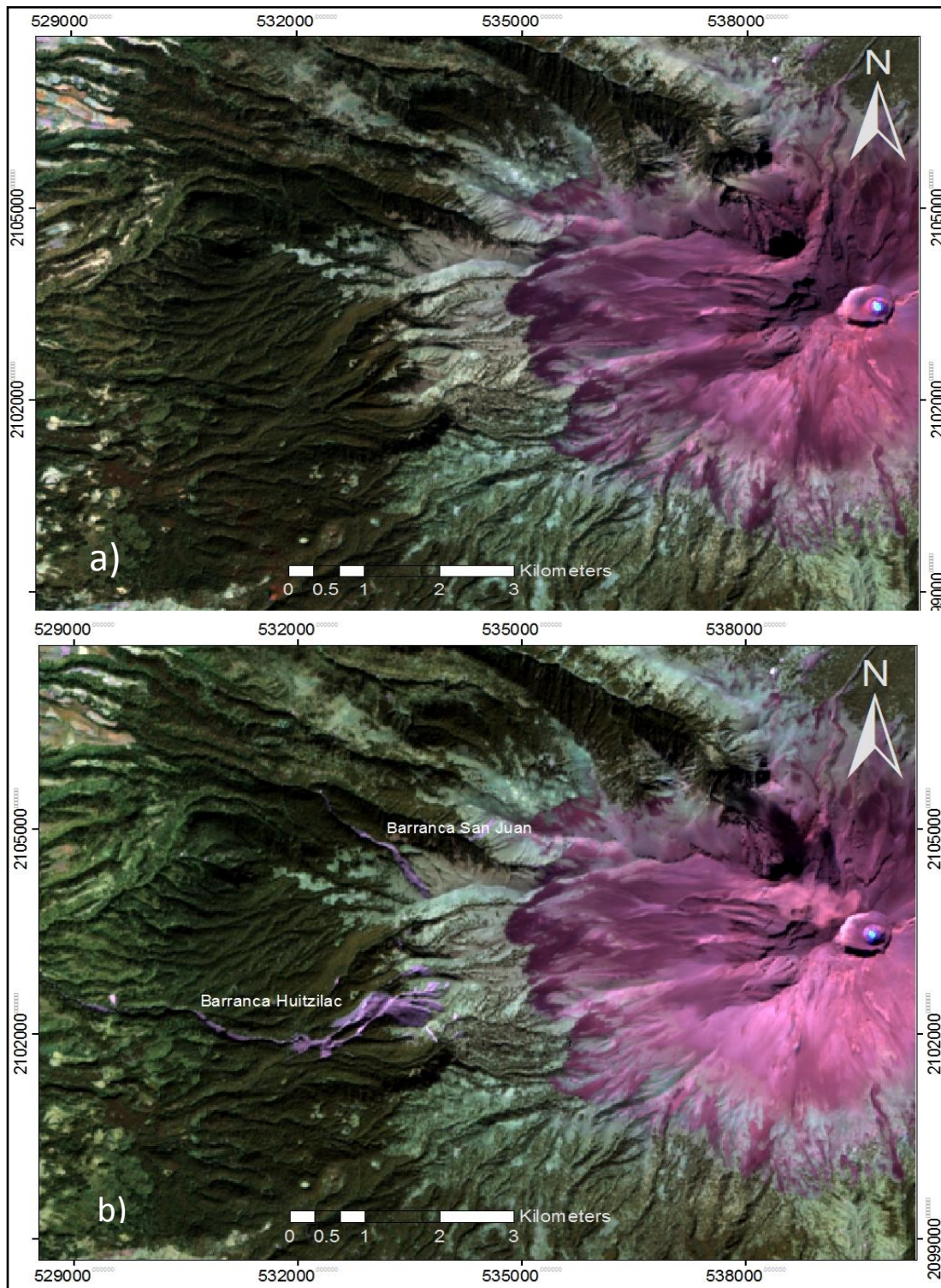


Figura 7: Imagen satelital a) antes y b) después del evento del 2017.

La correlación entre el trabajo de campo y el análisis de imágenes de satélite es adecuada e importante para el estudio de los lahares, ya que podemos distinguir los cambios en la topografía del terreno. La imagen satelital a) fue tomada el 17 de septiembre de 2017 antes del evento estudiado y la imagen b) fue tomada el 4 de noviembre del mismo año 2017 (Figura 7).

En estas imágenes se puede observar un cambio en la topografía después de los eventos del lahar (figura 7 b), también se puede observar el alcance que tuvieron tanto en la barranca San Juan Tehuixtitlan como en la barranca Huitzilac.

4.4 Simulación numérica

En la actualidad existen varios trabajos en donde a través del modelo numérico se han reproducido la trayectoria y la superficie de inundación de lahares. (Iverson et al.,1998; Davila et al., 2007; Muñoz-Salinas et al., 2009; Williams et al., 2008; Worni et al., 2012). La modelación de un lahar tiene como objetivo representar un fenómeno mediante ecuaciones matemáticas que simulan procesos físicos. En el caso particular de los lahares nos arroja información como la distancia alcanzada por el flujo, las velocidades que alcanzan estos eventos, el área de inundación.

Para los lahares existen varios programas que permiten simular el emplazamiento de flujos de agua y de sedimentos. Estos códigos numéricos han sido utilizados principalmente para entender mejor la dinámica interna de un flujo y su variación espacio-temporal en cuanto a sus parámetros físicos, para la determinación de las zonas de inundación y evolución del peligro asociado.

Los modelos numéricos bidimensionales son los más utilizados para simular los diferentes procesos. En el presente trabajo se utiliza el modelo matemático FLO-2D.

La modelación numérica se basa en la ecuación diferencial de continuidad (ecuación 5) y la ecuación de movimiento (ecuación 6), como se muestra:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = i \quad [5]$$

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 en la superficie del flujo y t es el tiempo.

La ecuación de movimiento en la dirección x es:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad [6]$$

Donde S es la pendiente, t es el tiempo y g es la gravedad.

FLO 2D (O'Brien, 1993) usa un modelo cuadrático de esfuerzo cortante, con una malla establecida sobre el área topográfica para el cálculo de la profundidad y velocidad del flujo entre los elementos de la malla. La velocidad en 8 direcciones es calculada independientemente, con un algoritmo que incluye la geometría del flujo, rugosidad (Manning n), la pendiente entre dos elementos en la malla y el área inundada. Los flujos son simulados con base en un modelo reológico cuadrático que involucra concentración de sedimentos, resistencia al corte, viscosidad. FLO 2D predice el movimiento de fluidos viscosos como una función de la concentración de sedimentos.

Los datos de entrada requeridos para la simulación de mud/Debris flow comprende inflow y outflow, valores de n Manning, coeficientes reológicos de la viscosidad y resistencia al corte (α y β), resistencia al flujo laminar (k) y un número de Froude. Los parámetros reológicos (ecuaciones 7 y 8) son parámetros empíricos que relacionan la resistencia al corte y la viscosidad a la concentración de sedimentos por relaciones empíricas (O'Brien y Julien, 1988).

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad [7]$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad [8]$$

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 arena fina. Por lo anterior el programa es idóneo para simular flujos de lodo (> 50% de arena) como los aquí descritos.

Además de los parámetros reológicos es necesario contar con los siguientes parámetros para realizar las simulaciones.

- Curva hidrográfica: es la representación gráfica que expresa la variación en el tiempo de la descarga máxima del flujo.
- Coeficiente de Manning (n): Es un factor importante ya que define la movilidad de un flujo, nos da información acerca de la rugosidad de la base sobre la cual se está desplazando el fluido. Existen diversos factores que pueden afectar a este coeficiente como son las irregularidades en el canal, las obstrucciones, los depósitos, la vegetación, el tamaño y forma del canal. Este valor ha sido definido de manera empírica por O'Brien y Julien (1988).
- Número de Froude: Representa la relación entre la fuerza de inercia y gravedad define el régimen del flujo, supercrítico, crítico o subcrítico.

Capítulo 5: Resultados

5.1 Barranca San Juan Tehuixtitlan

Sección: PO1C

El paso del lahar dejo marcas en la zona a 4 m de altura en las paredes del canal, como se puede apreciar en la figura 8. Consiste de un depósito homogéneo, de color gris café oscuro, compuesto en su mayor porcentaje por arena (69.19%) y solo posee un bajo porcentaje de arcilla (0.61%). (Tabla 4). El histograma granulométrico presenta una distribución bimodal con modas en -2ϕ y 3ϕ (figura 8.1)

La muestra está caracterizada por una media granulométrica de 1.58ϕ , que representa un diámetro promedio en el rango de fracción arenosa, la desviación estándar es de 2.59ϕ lo que corresponde a un depósito mal seleccionado. El grado de asimetría es de -0.213 que corresponde a una simetría negativa. El valor de la curtosis es de 1.431 que indica una curva leptocúrtica, es decir que la parte central está mejor seleccionada que en los extremos.

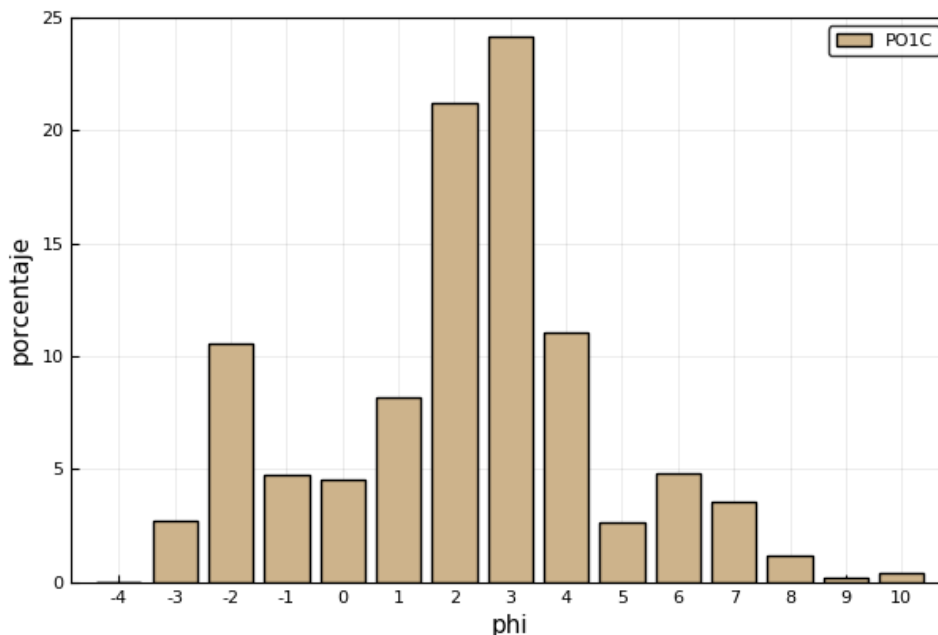


Figura 8.1: Histograma de la muestra granulométrica PO1C.

Composición total			
% grava	% arena	% limo	% arcilla
17.979161	69.1969283	12.2165968	0.61005639

Tabla 4: Porcentajes de la composición granulométrica de la muestra PO1C.



Figura 8: Canal donde se obtuvo la muestra PO1.

Sitio: PO2

En este sitio se observa un canal de baja profundidad y aproximadamente 6 metros de ancho. Se tomaron tres muestras perpendiculares a la dirección del flujo, desde el centro del canal hacia las porciones externas. (Figura 9). Al realizar el análisis granulométrico se puede observar que las tres muestras consisten principalmente de la fracción arenosa. (Tabla 5). Los clastos que se presentan son subredondeados.

Los histogramas granulométricos representan distribuciones unimodales para las tres muestras (PO2B arriba, PO2B abajo y PO2C), con moda en -3ϕ (figura 9.1). Estas presentan una media granulométrica que va de 2.2 a 2.36ϕ , la desviación estándar va de 1.38 a 1.65ϕ , lo que representa que los depósitos son pobremente seleccionados. Para los valores de asimetría, PO2B arriba (0.058) es simétrica al igual que PO2C (-0.057), mientras que PO2B abajo es asimétrica (-0.112). el valor de la curtosis es en un rango de 1.6 a 1.7 e indica una curva leptocúrtica, es decir que la parte central está mejor seleccionada que en los extremos.

Muestra	Composición total		% limo	% arcilla
	% grava	% arena		
PO2B arriba	4.70525092	82.3690894	12.4448649	0.47850165
PO2B abajo	5.65360745	86.4192793	7.77903159	0.14558162
PO2C	4.75572208	87.5240212	7.56493318	0.15757066

Tabla 5: Porcentajes de composición para las tres muestras del depósito PO2.

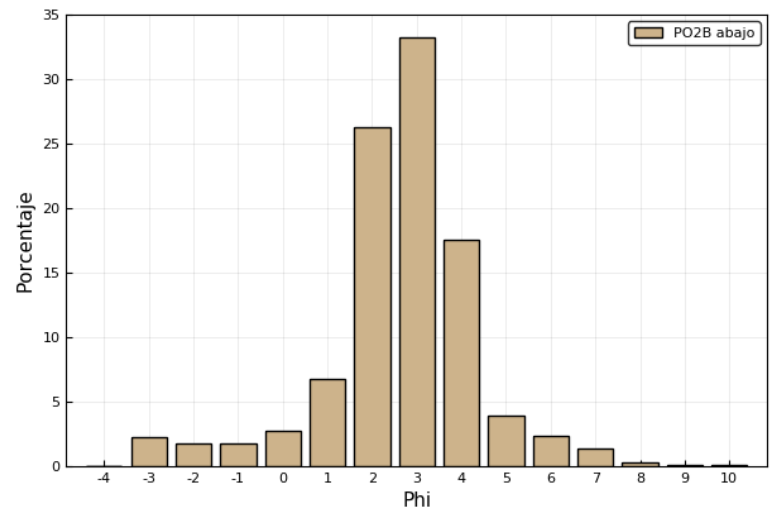
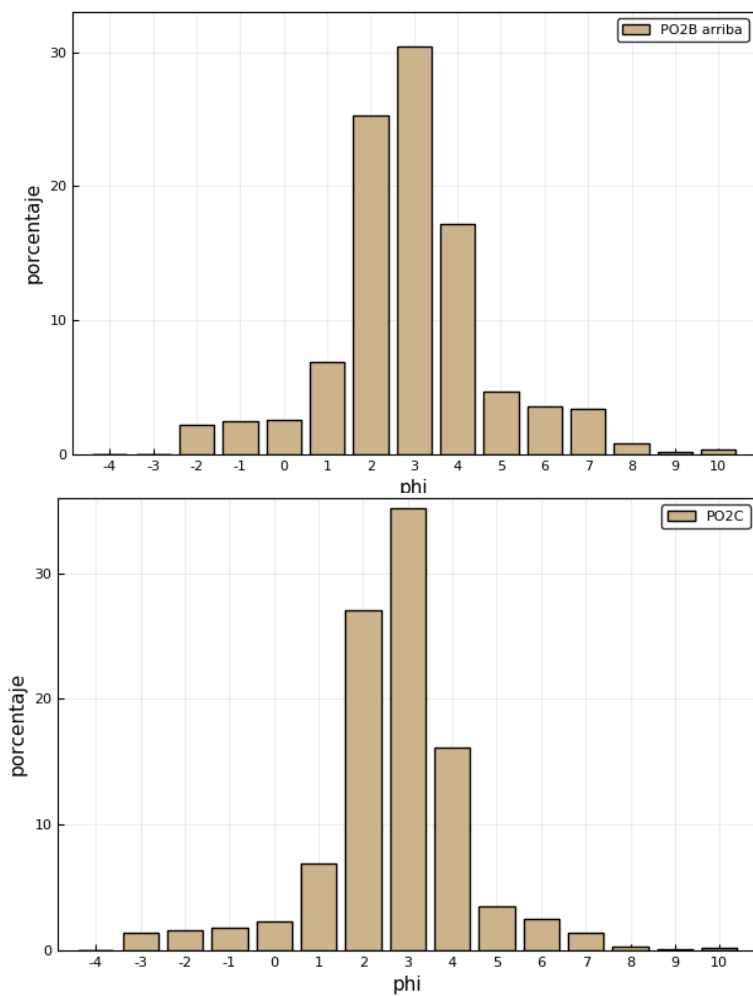


Figura 9.1: Histogramas de las muestras granulométricas a) deposito PO2B abajo, b) PO2B arriba y c) PO2C.



Figura 9: Fotografía del punto PO2.

Sitio: SJT1701

El canal activo tiene un ancho de 2 metros y una profundidad de 1.20 metros. El lahar dejó marcas a una altura de 2 metros en las paredes del canal y en la vegetación. (Figura 10). Se trata de un depósito limo-arenoso con un porcentaje en arena de 83.34% (Tabla 6).

El histograma presenta una distribución unimodal con moda muy pronunciada en 3ϕ (Figura 10.1). Esta muestra tiene una media granulométrica de 2.31ϕ , es pobremente seleccionada ya que su desviación estándar es de 1.6ϕ . El valor de la asimetría de 0.010 la hace una curva simétrica. Con un valor de la curtosis de 1.39 es leptocúrtica, donde la parte central está mejor seleccionada que en los extremos.

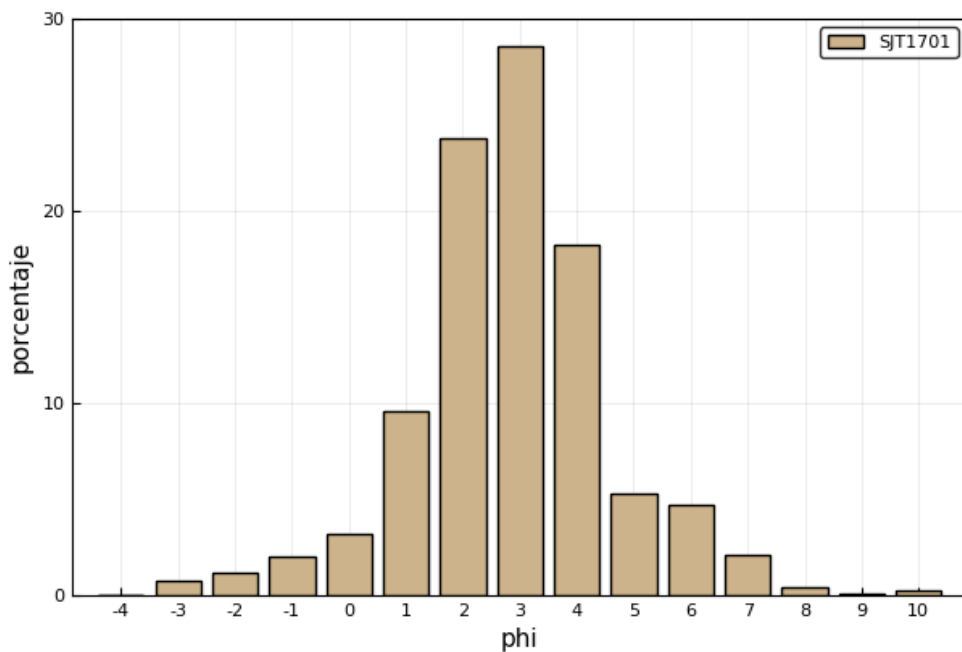


Figura 10.1: Histograma de la muestra SJT1701.

	Composición total		
% grava	% arena	% limo	% arcilla
3.90967082	83.3419649	12.4487476	0.30026767

Tabla 6: Composición granulométrica para el depósito SJT1701.



Figura 10: Fotografía del canal donde se obtuvo la muestra SJT1701.

Sitio: SJT1702

El canal activo tiene dimensiones de 1.5 metros de ancho y 0.8 metros de profundidad (Figura 11). Es un depósito homogéneo, con un tamaño de clastos de arena 78.60 % y de limo 13.26% (Tabla 7). El histograma granulométrico presenta una distribución unimodal, con una moda en 3ϕ (Figura 11.1).

El valor de la media para esta muestra es de 2.45ϕ , la desviación estándar calculada es de 1.82ϕ , mal seleccionado, el grado de asimetría -0.09 corresponde a una curva simétrica, como en las muestras anteriores también corresponde a una curva leptocúrtica.

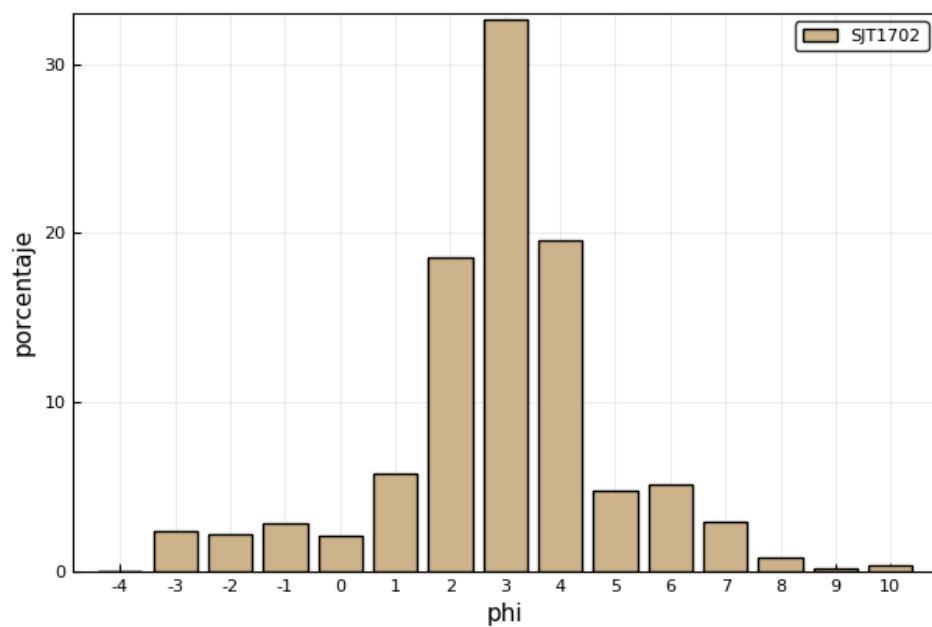


Figura 11.1: Histograma para la muestra granulométrica SJT1702.

	Composición total		
% grava	% arena	% limo	% arcilla
7.30618409	78.6050962	13.6262852	0.4619056

Tabla 7: Composición de la muestra SJT1702.



Figura 11: Fotografía del depósito del lahar en el sitio SJT170.

Sitio: SJT1703

El canal activo presenta un ancho de 4 metros y una profundidad de 2 metros, en el interior del canal se observan ramas y troncos orientados (Figura 12). El depósito es homogéneo con clastos redondeados, constituido en un mayor porcentaje por arena 73.43%, 13% de limo y en menor medida por arcilla 0.44%. (Tabla 8).

El histograma granulométrico presenta una moda muy pronunciada en 3ϕ (Figura 12.1). El valor de la media corresponde a 2.03ϕ con una desviación estándar de 2.19ϕ que corresponde a un depósito mal seleccionado, el grado de asimetría es de -0.22 lo que la hace una curva asimétrica. Con un valor de 1.88 para la curtosis, es una curva leptocúrtica.

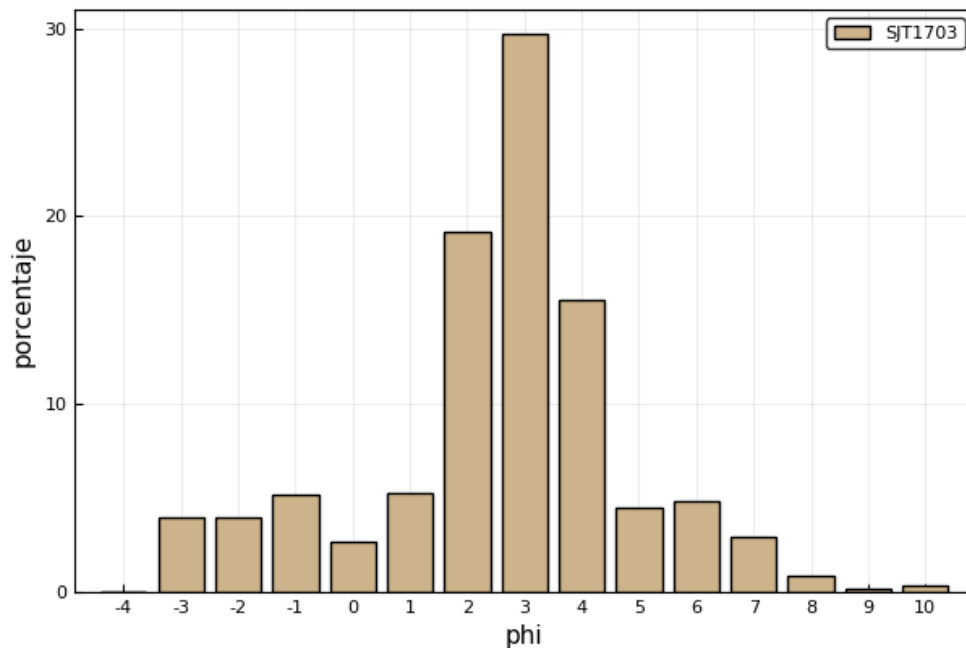


Figura 12.1: Histograma para la muestra granulométrica SJT1703.

	Composición total		
% grava	% arena	% limo	% arcilla
13.0725204	73.4326553	13.0592689	0.44144112

Tabla 8: Porcentaje de las clases granulométricas que corresponde a la muestra SJT1703.



Figura 12: Canal activo de donde se obtuvo la muestra SJT1703.

Sitio: SJT1705

El canal inundado presenta dimensiones de aproximadamente 5 metros de ancho y de profundidad una medida de 1.5 metros, es un depósito masivo, areno-limoso, se tomaron dos muestras SJT1705A y SJT1705B, (Figura 13). La muestra A se obtuvo en la parte externa de lado izquierdo y la muestra B en el interior del canal, ambas presentan un mayor porcentaje en arena, limo, un menor porcentaje en grava del 3 al 6% y un porcentaje mínimo de arcilla. (Tabla 9).

Los histogramas granulométricos presentan una moda en 3ϕ , (Figura 13.1). El valor de la media para estas muestras va de 2.4 a 2.6ϕ , la desviación estándar calculada se encuentra entre 1.6 y 1.9ϕ lo que corresponde a depósitos pobremente seleccionados. El grado de asimetría va de -0.01 a 0.1 por lo que son curvas simétricas, el valor de la curtosis está entre 1.5 a 1.7 que corresponde a curvas leptocúrticas, donde el centro se encuentra mejor seleccionado que en los extremos.

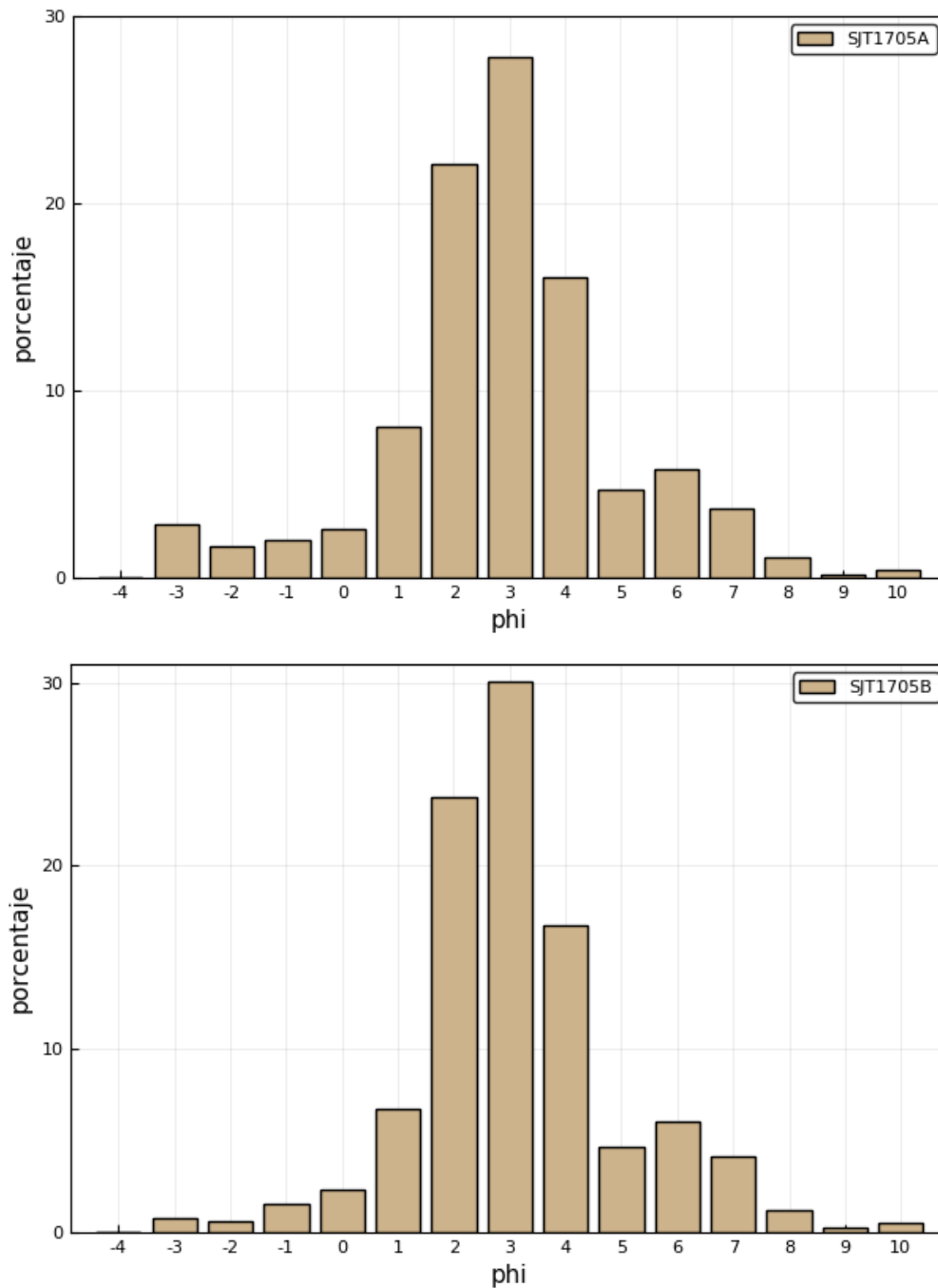


Figura 13.1: Histogramas de las muestras granulométricas a) SJT1705A y b) SJT1705B

Muestra	% grava	Composición total		
		% arena	% limo	% arcilla
SJT1705A	6.46166134	77.8051794	15.1901823	0.54483924
SJT1705B	2.90899967	80.4877074	15.9461438	0.65524862

Tabla 9: Porcentaje de las clases granulométricas para las muestras 5A y 5B.



Figura 13: Fotografía del canal donde se obtuvo dos muestras: SJT1705A y SJT1705B.

Sitio: SJT1706

El canal inundado tiene una profundidad de 1 metro, con un ancho de 1 metro. Las marcas que dejó el paso del lahar tienen aproximadamente 1.5 metros de altura. (Figura 14). En esta sección se tomaron 2 muestras SJT1706A y SJT1706B, su análisis granulométrico muestra un mayor porcentaje de arena 78.05% para 6A y 79% para 6B. (Tabla 10).

Ambos histogramas de las muestras presentan una moda en 3ϕ (Figura 14.1). El valor en la media granulométrica para las muestras se encuentra entre 2.5 y 2.6ϕ , la desviación estándar se encuentra entre 1.7 y 1.8ϕ lo que nos indica que es un depósito pobremente seleccionado, el grado de asimetría arrojó valores de 0.06 a 0.12 propios de curvas simétricas. Los valores de la curtosis indican que se trata de curvas leptocúrticas.

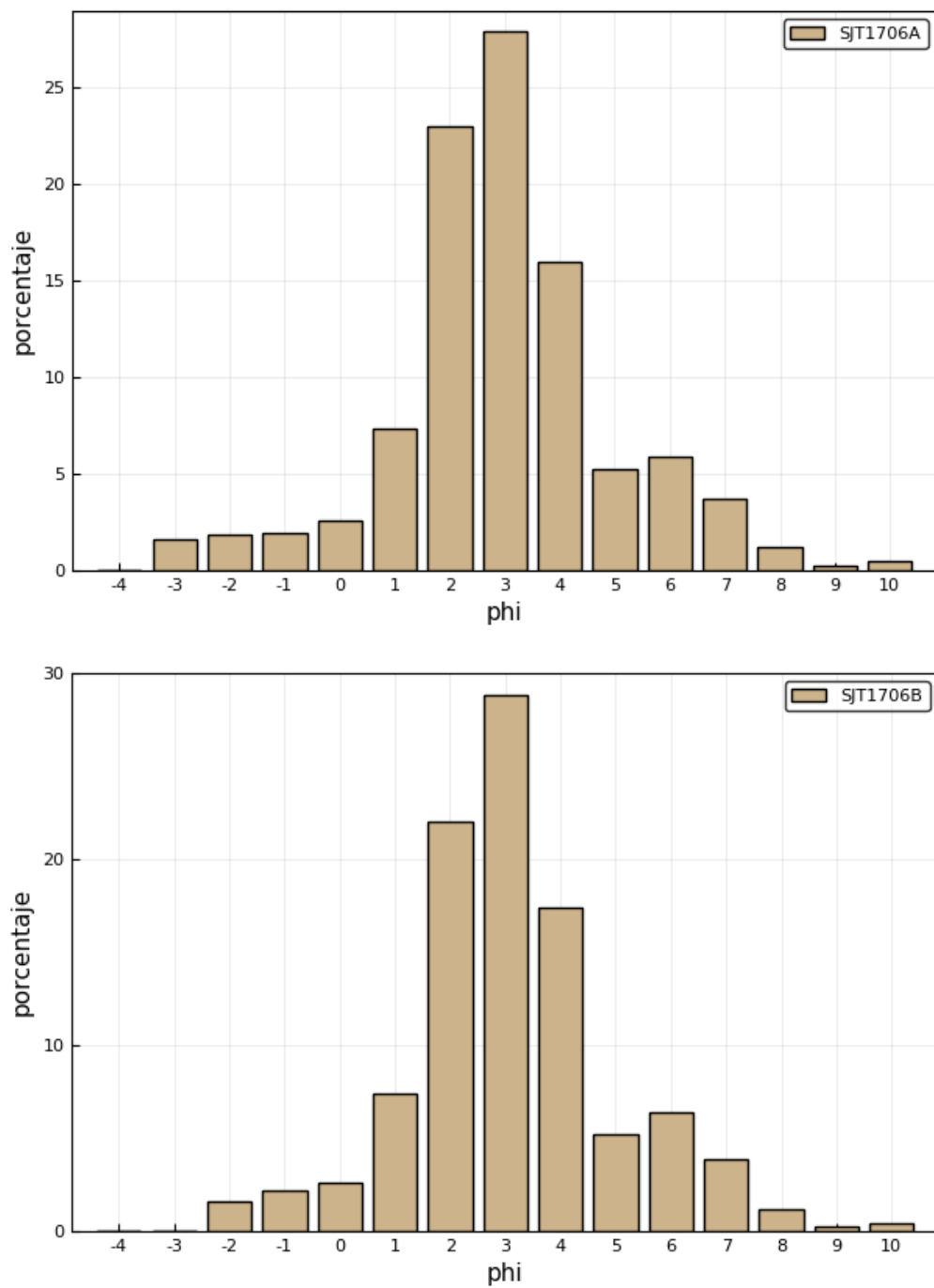


Figura 14.1: Histogramas para las muestras SJT1706A y SJT1706B.

	Composición total			
Muestra	% grava	% arena	% limo	% arcilla
SJT1706A	5.33221396	78.052731	15.9684222	0.64555576
SJT1706B	3.69242422	79.0449727	16.6530637	0.61100849

Tabla 10: Composición granulométrica para las muestras 6A y 6B.



Figura 14: Fotografía donde se muestra el depósito del lahar en el sitio SJT1706.

Sitio: SJT1707

El canal inundado es de 4 metros de ancho y 1.5 metros de profundidad. El depósito es homogéneo, se obtuvieron dos muestras SJT1707A y SJT1707B, la muestra A se tomó en la parte proximal del overbank y la muestra B en el interior del canal. (Figura 15). Ambas presentan un mayor porcentaje de la fracción de arena 79% y un porcentaje muy bajo de arcilla (Tabla 11).

Ambos histogramas granulométricos presentan una moda muy pronunciada en 3ϕ (Figura 15.1), los valores de la media van de 2.1 a 2.4ϕ que representa un diámetro promedio en el rango de arena fina, la desviación estándar calculada es de 1.8ϕ , es decir pobremente seleccionados, la asimetría va de -0.08 a 0.03 que corresponde a curvas simétricas, el valor de la curtosis se encuentra entre valores de 1.5 a 1.66 que indica curvas leptocúrticas.

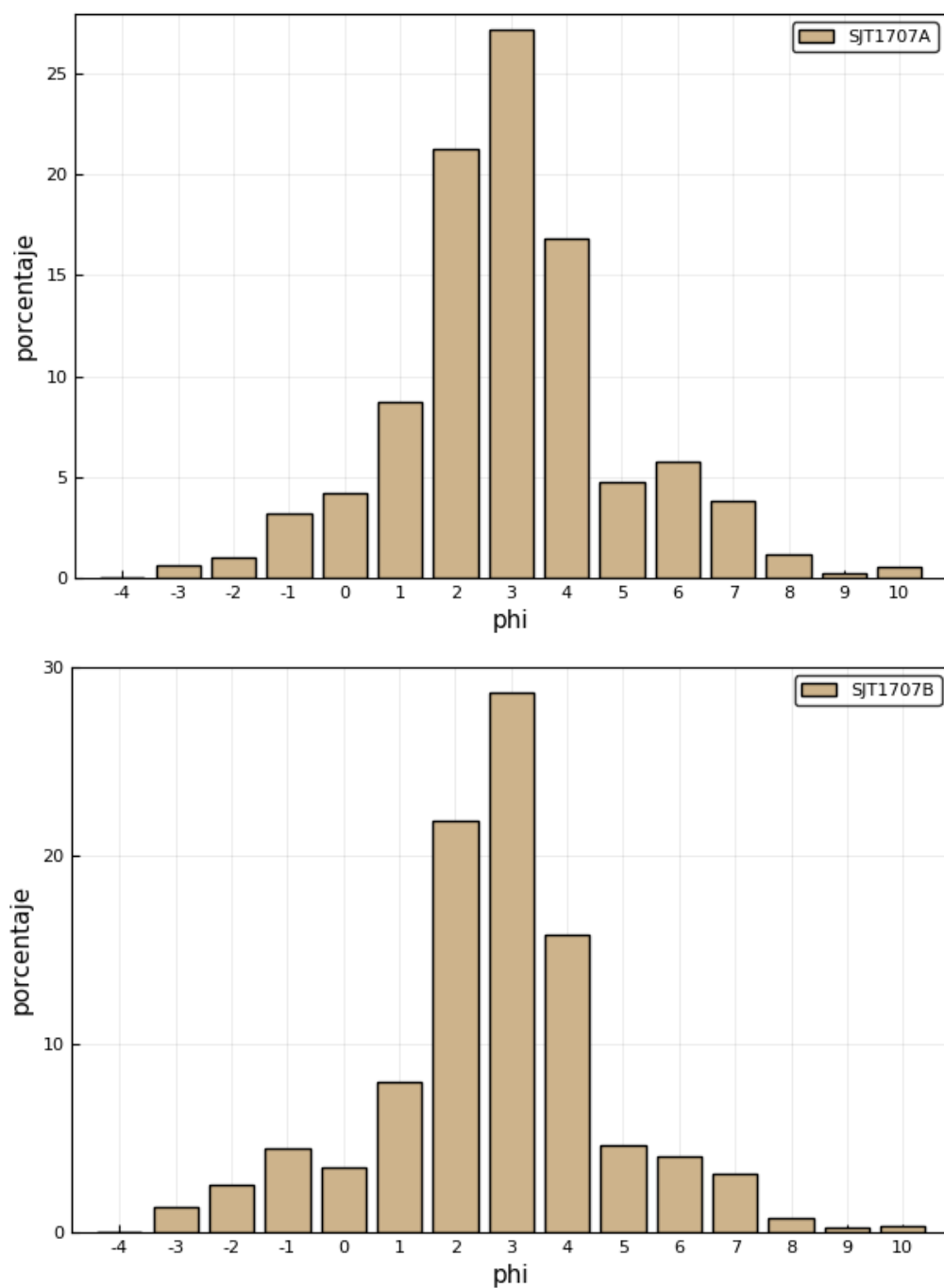


Figura 15.1: Histograma que representa a las muestras SJT1707A y SJT1707B.

	Composición total			
Muestra	% grava	% arena	% limo	% arcilla
SJT1707A	4.75108266	79.1334586	15.3812906	0.73315704
STT1707B	8.16847834	79.028746	12.3201505	0.48345335

Tabla 11: Porcentajes de las clases granulométricas para las muestras 7A Y 7B.



Figura 15: Canal inundado en donde se obtuvieron las muestras SJT1707A y SJT1707B.

Sitio: SJT1708

El canal inundado tiene aproximadamente 10 metros de ancho, se recolectaron dos muestras. Muestra A en la parte exterior del canal y la muestra B en el interior del canal, (Figura 16). La arena es el principal componente de ambos depósitos que van de 77.1 al 85.40% (Tabla 12).

El histograma granulométrico para la muestra 8A presenta una moda en 2ϕ , mientras que la muestra 8B presenta una moda en 4ϕ , (Figura 16.1). Los valores de la media se encuentran entre 1.9ϕ (A) a 3.3ϕ (B), lo que nos indica que abundan arena media a arena muy fina y que la muestra tomada en la porción central del canal es más fina. La desviación estándar es de 1.6ϕ lo que nos indica que es un depósito pobremente seleccionado, el grado de asimetría arrojó valores de 0.01 una curva simétrica para 8A y 0.19 una curva asimétrica fina para 8B. Los valores de la curtosis nos indica que se trata de curvas leptocúrtica (1.6).

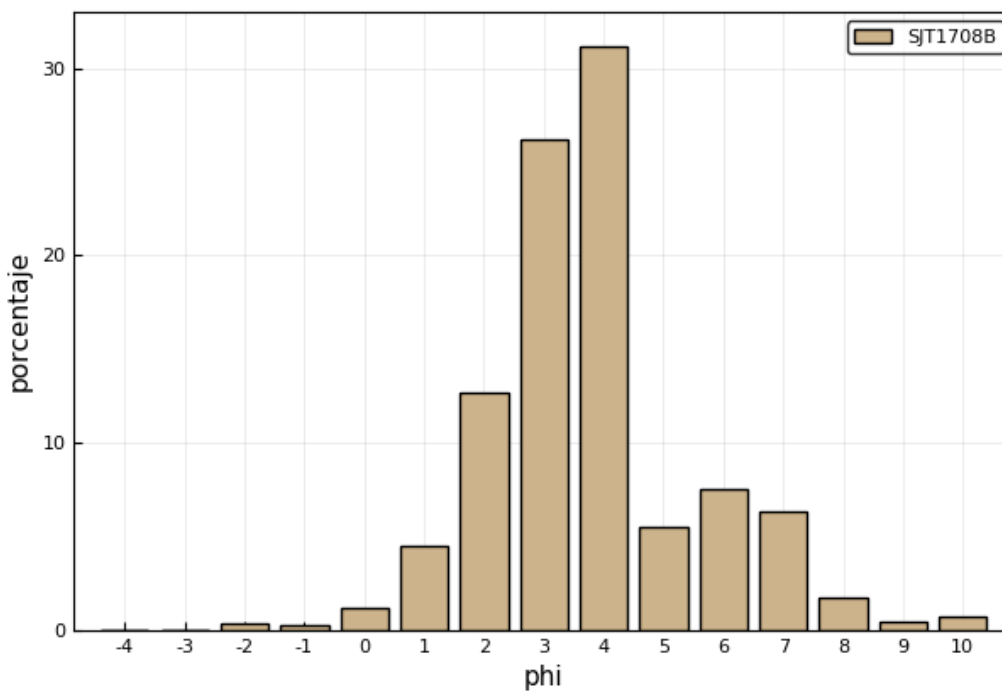
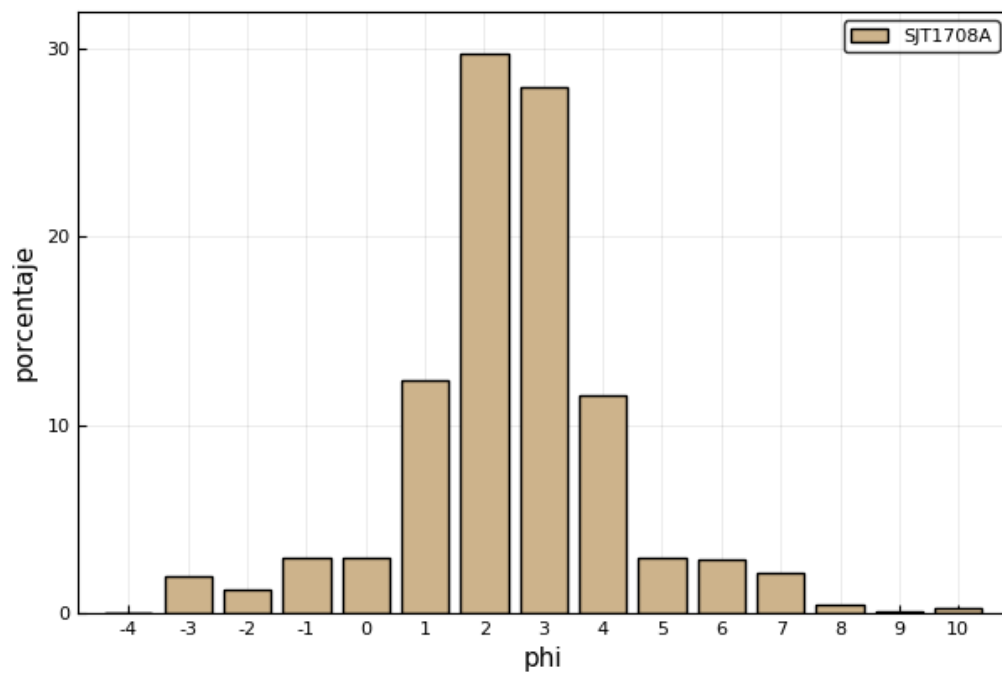


Figura 16.1: Histogramas granulométricos para las muestras SJT1708A y SJT1708B.

	Composición total			
Muestra	% grava	% arena	% limo	% arcilla
SJT1708A	6.00546927	85.4027241	8.27672609	0.31434392
SJT1708B	0.64140155	77.1485489	21.0974385	1.1114604

Tabla 12: Porcentajes de las composiciones granulométricas en las muestras 8A y 8B.



Figura 16: Fotografía del sitio SJT1708.

5.1.1 Comparación de las características granulométricas de las muestras analizadas

Las curvas de los pesos acumulativos (Figura 17) muestran una mayor pendiente entre el rango de 0 a 3ϕ que representa el tamaño de la fracción arenosa dominante en todas las muestras, a excepción de la muestra PO1C que representa el depósito en una zona medio-proximal con una mayor pendiente en el rango de -3 a -2ϕ que corresponde al tamaño de grava. También se observa una migración de la curva hacia las fracciones más finas. En cuanto al contenido de arcilla, este es constante en casi todas las muestras y es menor al 1%.

En la curva de los pesos acumulativos entre el rango de -3 a 0ϕ tienen una menor pendiente, lo que indica una disminución en la granulometría, es decir que en su camino descendente conforme se aleja de la fuente, el flujo va depositando material grueso (gravas) ya que la capacidad de carga va disminuyendo y el flujo no es capaz de llevar el material pesado y solo va transportando material fino.

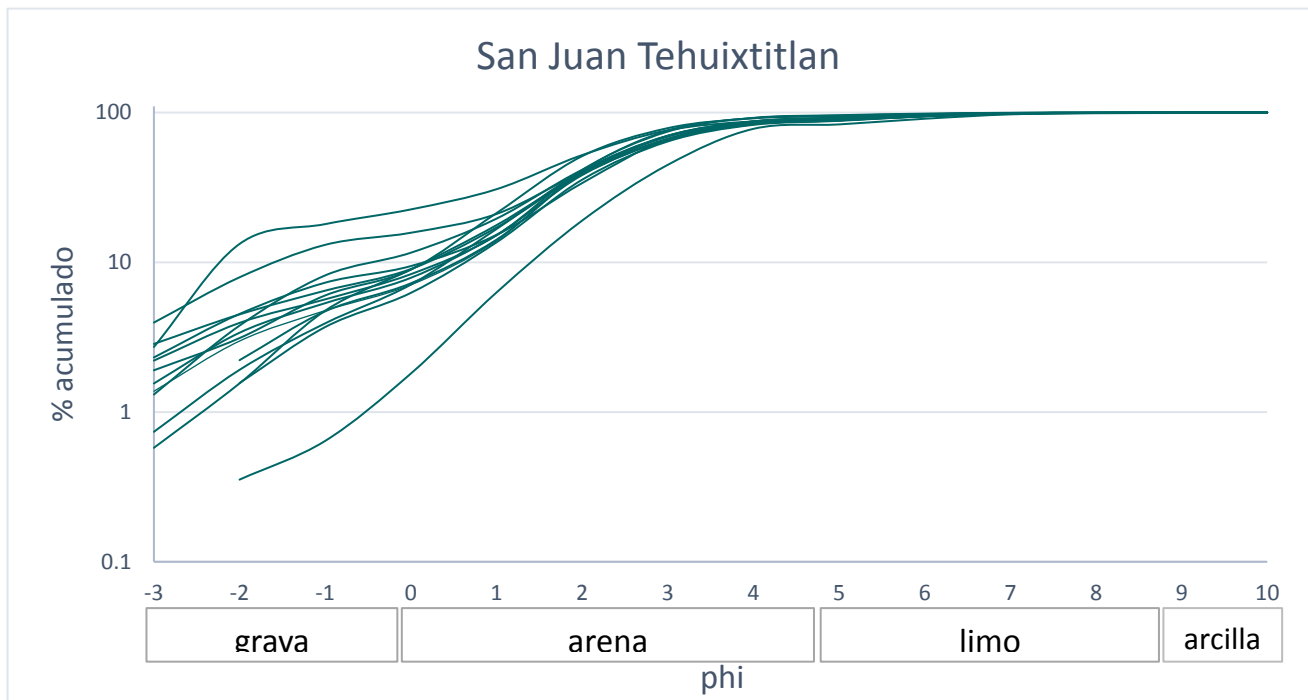
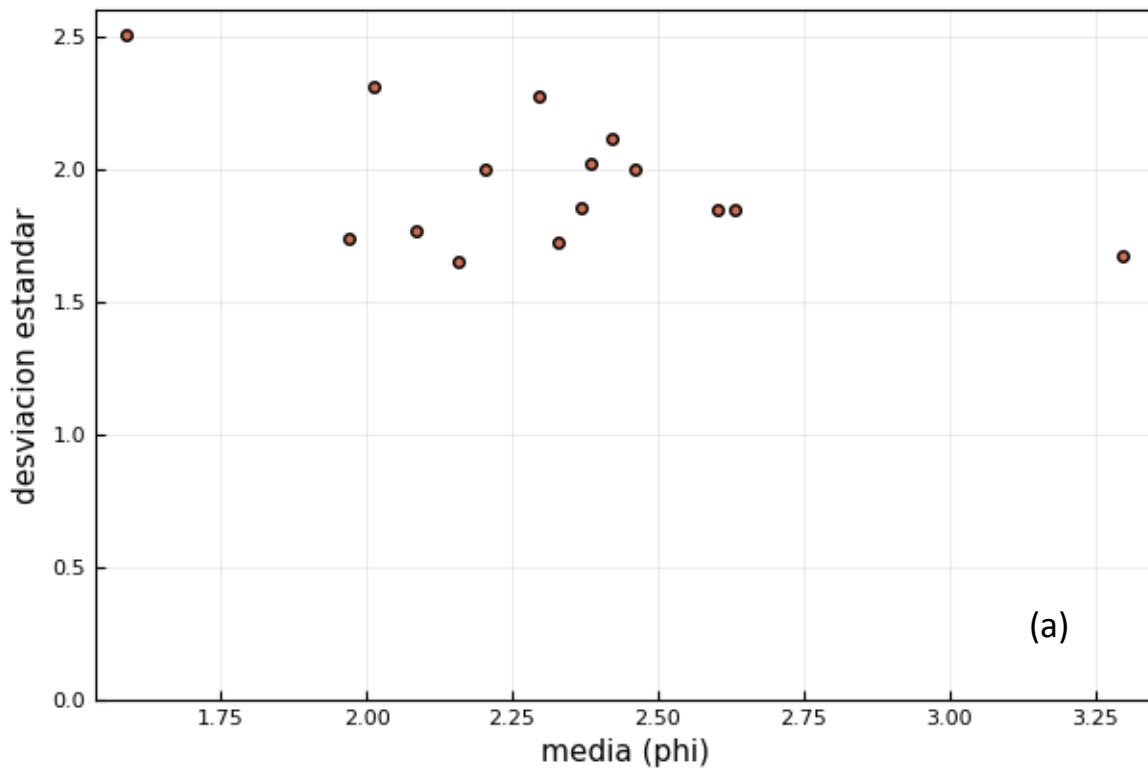


Figura 17: Grafica del porcentaje acumulado vs el diámetro (phi) de las muestras granulométricas correspondientes a la barranca San Juan Tehuixtitlan.

Deposito San Juan Tehuixtitlan				
Muestras	Media	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
PO1C	1.328	2.592	-0.213	1.431
PO2B arriba	2.3882	1.6506	0.0587	1.7095
PO2B abajo	2.2299	1.4828	-0.1127	1.6951
PO2C	2.2453	1.3823	-0.0573	1.6898
SJT1701	2.3169	1.6005	0.0105	1.3914
SJT1702	2.4546	1.8223	-0.0947	1.898
SJT1703	2.0394	2.1981	-0.2205	1.8888
SJT1705A	2.4152	1.9435	-0.0112	1.7251
SJT1705B	2.6309	1.6418	0.1854	1.508
SJT1706A	2.5292	1.8571	0.0666	1.6302
SJT1706B	2.6374	1.7497	0.1236	1.4994
SJT1707A	2.4242	1.8634	0.0352	1.5135
SJT1707B	2.1978	1.8833	-0.0851	1.6656
SJT1708A	1.9853	1.6246	0.0128	1.6534
SJT1708B	3.3504	1.6799	0.1963	1.6317

Tabla 13: Parámetros estadísticos de la distribución granulométrica para las muestras de San Juan Tehuixtitlan.

El valor de la media para las muestras de este depósito se encuentran entre 1.5 a 3.5ϕ que representa un diámetro promedio en el rango de arena mediana a arena muy fina, mientras que la desviación estándar está entre un rango de 1.5 a 2.5ϕ lo que indica que los depósitos están pobremente seleccionados. (Figura 17.1 a). Todas las muestras muestran una buena simetría con valores de asimetría en un rango de -0.6 a 0.3 . Graficándolos contra desviación estándar (Figura 17.1 b) se puede observar una correlación con una mejor selección de muestras más finas. Al graficar los parámetros estadísticos no se observan tendencias significativas.



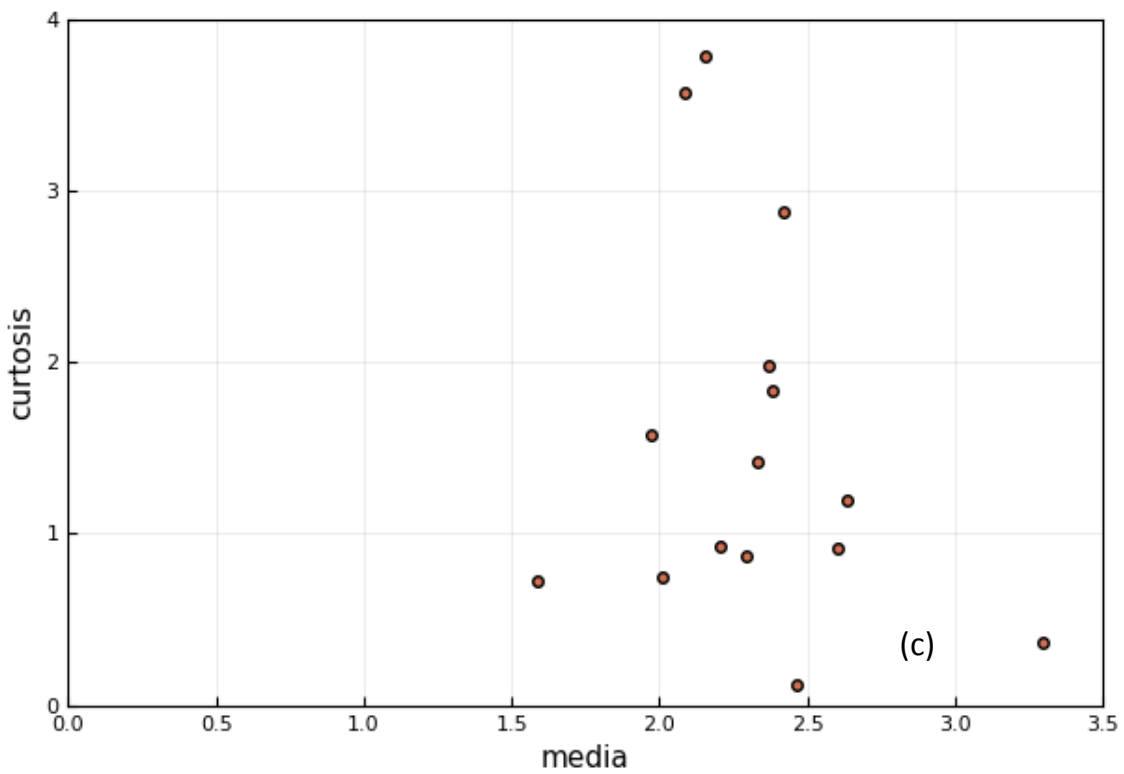
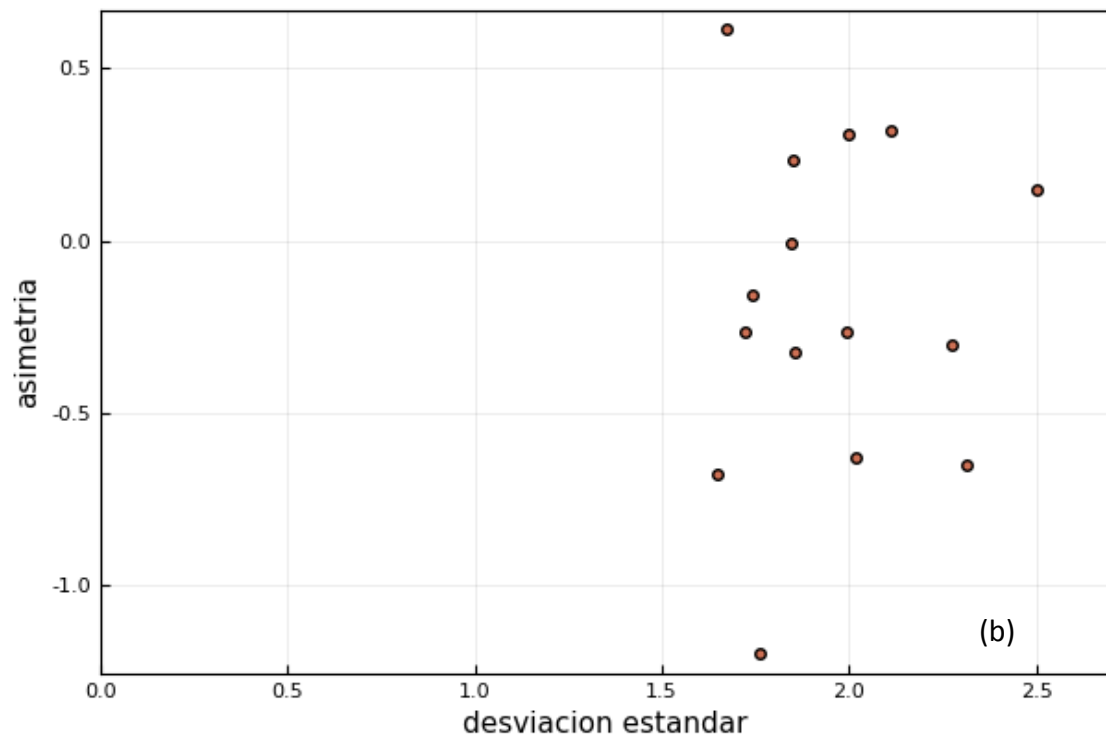


Figura 17.1: Graficas de los parámetros estadísticos a) desviación estándar vs media, b) asimetría vs desviación estándar, c) curtosis vs media.

5.2 Barranca Huitzilac

Sitio:PO10

En este sitio se tomó una muestra de los depósitos de ceniza que caracterizan la parte alta del cono, denominados como los arenales, afectados por los procesos de remoción en masa durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 y que muy probablemente conforman el mayor volumen de los depósitos de lahares aquí estudiados. El depósito es masivo, de color gris claro. (Figura 18). La muestra recolectada consiste en un 97% de arena (Tabla 14). El histograma granulométrico presenta una moda muy pronunciada en 3ϕ (Figura 18.1).

El valor de la media en esta muestra se encuentra en 1.85ϕ , la desviación estándar calculada es de 0.92ϕ que corresponde a depósitos moderadamente seleccionados, el grado de asimetría de -0.26 corresponde a curvas asimétricas, el valor de la curtosis corresponde a una curva leptocúrtica (1.26).

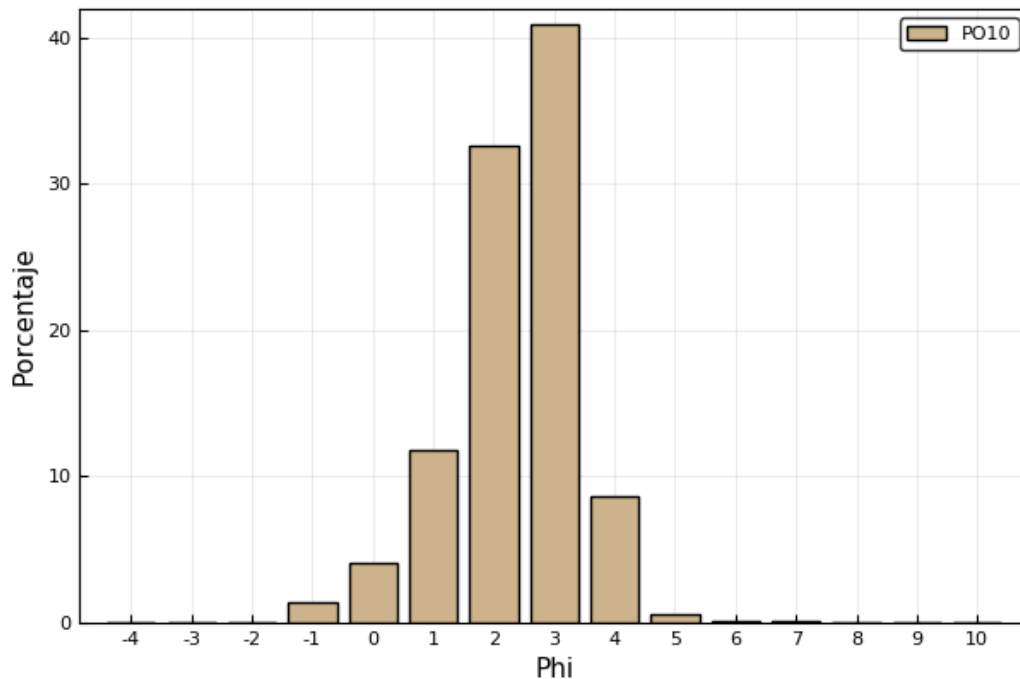


Figura 18.1: Histograma para la muestra granulométrica PO10.

	Composición total		
% grava	% arena	% limo	% arcilla
1.39814689	97.9456518	0.64607954	0.01085096

Tabla 14: porcentaje de las clases granulométricas de la muestra PO10.



Figura 18: Depósito de ceniza, donde se obtuvo la muestra PO10.

Sitio: PO11

Se presenta un sumidero de 12 metros de alto de forma circular aproximadamente de 10 metros de ancho. La marca del paso del lahar es de 1.5 metros de profundidad. Se obtuvo una muestra en la base del canal (Figura 19). El material consiste en un elevado porcentaje de arena (86.21%) y un porcentaje menor de limo 9.19% (Tabla 15).

El histograma granulométrico (Figura 19.1) presenta una moda en 2ϕ . El valor que presenta esta muestra para la media es de 1.93ϕ , que representa un diámetro promedio en el rango de arena mediana, la desviación estándar de 1.56ϕ lo que corresponde a un depósito pobremente seleccionado, el grado de asimetría es de 0.18 es decir una curva asimétrica hacia el lado de los tamaños finos. La curtosis de 1.42 es una curva leptocúrtica donde la parte central está mejor seleccionada que en los extremos.

	Composición total		
% grava	% arena	% limo	% arcilla
4.25247005	86.2154252	9.19187644	0.34250149

Tabla 15: Porcentaje de grava, arena, y material fino de la muestra PO11.

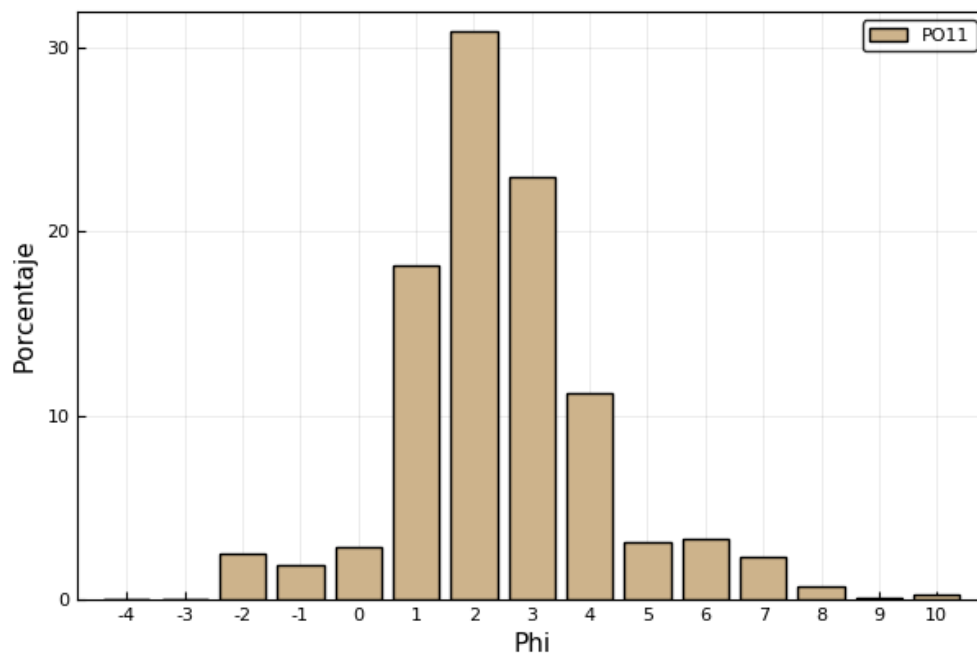


Figura 19.1: Histograma de la muestra granulométrica PO11.



Figura 19: Fotografía del depósito donde se obtuvo la muestra PO11.

Sitio: PO14

El canal inundado tiene una profundidad de 0.5 metros con un ancho de 1 metro, dejando marcas en los arboles de 1.4 metros de profundidad. El depósito es masivo, muestra una granulometría fina y homogénea. Con una composición en mayor porcentaje de arena, seguido de la fracción de grava. (Tabla 16).

El histograma granulométrico presenta una moda en las fracciones 3ϕ y 2ϕ (Figura 20). El valor de la media es de 1.97ϕ , la desviación estándar presenta un valor de 1.72ϕ lo que describe a un depósito pobremente seleccionado, una asimetría de 0.10 hacia al lado de la fracción fina, la curtosis representa una curva leptocúrtica con 1.20.

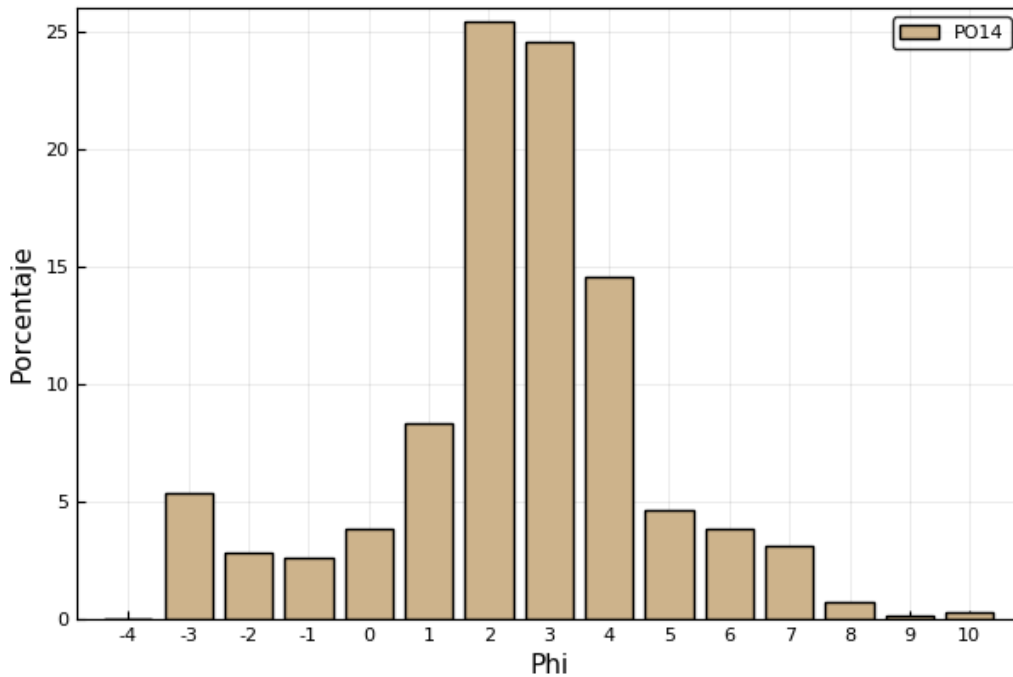


Figura 20: Histograma granulométrico para la muestra PO14.

	Composición total		
% grava	% arena	% limo	% arcilla
10.794355	76.6128153	12.2131276	0.37773918

Tabla 16: Porcentaje de grava, arena, y material fino de la muestra PO14.

Sitio: PO15

Amplia llanura con lodo estancado. Se tomó una muestra junto al canal, este canal presenta medidas de 0.7 metros de ancho y 0.5 metros de profundidad. Marcas del paso del lahar en los árboles cercanos a los márgenes (Figura 21). Es material más fino y homogéneo, principalmente arenoso (83%), (Tabla 17).

En el histograma granulométrico que representa a la muestra (Figura 21.1) tiene una moda granulométrica en 3ϕ . La media granulométrica tiene un valor de 2.78ϕ lo que nos indica que abundan las arenas finas, la desviación estándar se encuentra en el valor de 1.24ϕ , es un depósito pobremente seleccionado. El grado de asimetría arrojó un valor de 0.44, asimétrico hacia la fracción fina, el valor de la curtosis de 1.22 lo hace una curva leptocúrtica.

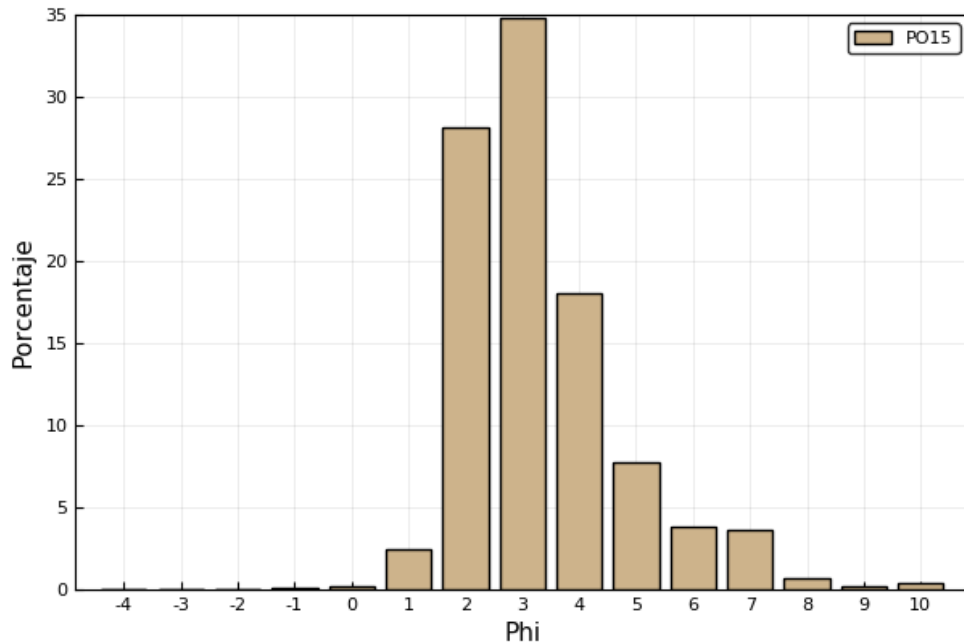


Figura 21.1: Histograma granulométrico para la muestra PO15.

Composición total			
% grava	% arena	% limo	% arcilla
0.09702458	83.5499421	15.8243397	0.52797468

Tabla 17: Porcentaje de clases granulométricas para la muestra PO15.



Figura 21: Fotografía del depósito para la muestra PO15.

Sitio: PO17

Su granulometría es ligeramente más gruesa respecto a las muestras descritas hasta este momento (Figura 22), con un 15.35 % de grava y un porcentaje de arena de 77.02%. (Tabla 18). Destaca la presencia de pómez en la muestra.

Para el histograma (Figura 22.1) presenta una moda en 2ϕ y en 3ϕ . La muestra de este depósito posee una media granulométrica de 1.33ϕ que representa un diámetro promedio en el rango de arena mediana, la desviación estándar calculada de 1.74ϕ corresponde a un depósito pobremente seleccionado, la asimetría representa una curva simétrica, el valor de la curtosis es de 1.04, que describe una curva mesocúrtica.

	Composición total		
% grava	% arena	% limo	% arcilla
15.3594325	77.0224303	7.41711431	0.2004781

Tabla 18: Porcentaje de grava, arena, y material fino de la muestra PO17.

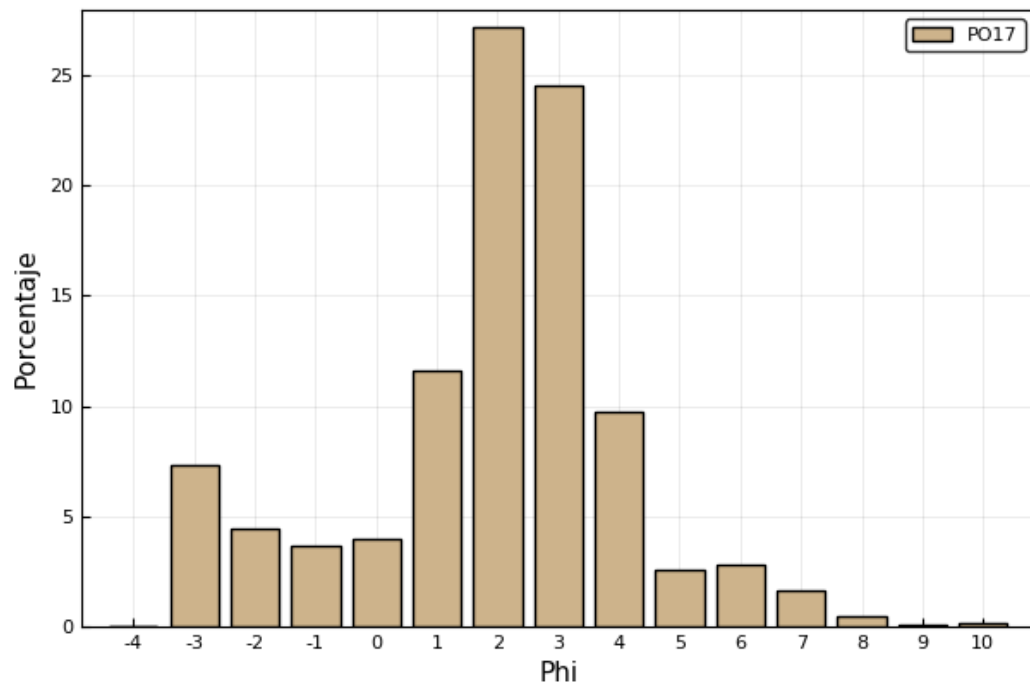


Figura 22.1: Histograma granulométrico para la muestra PO17.



Figura 22: Fotografía del depósito de donde se obtuvo la muestra PO17.

Sitio: PO19

El canal en el depósito es de 1.5 metros de ancho y 1.8 metros de profundidad. Con marcas de flujo en el tronco de los árboles de aproximadamente 20 metros (Figura 23). El depósito es homogéneo, el cual está conformado por un porcentaje mayor de arena 77.96% y un porcentaje menor de arcilla 0.38%. (Tabla 19).

El histograma granulométrico presenta una moda muy pronunciada en 3ϕ , (Figura 23.1). Presenta una media granulométrica de 2.20ϕ que representa un diámetro promedio en el rango de arena fina, por su desviación estándar se trata de un depósito muy pobremente seleccionado (2.02ϕ).

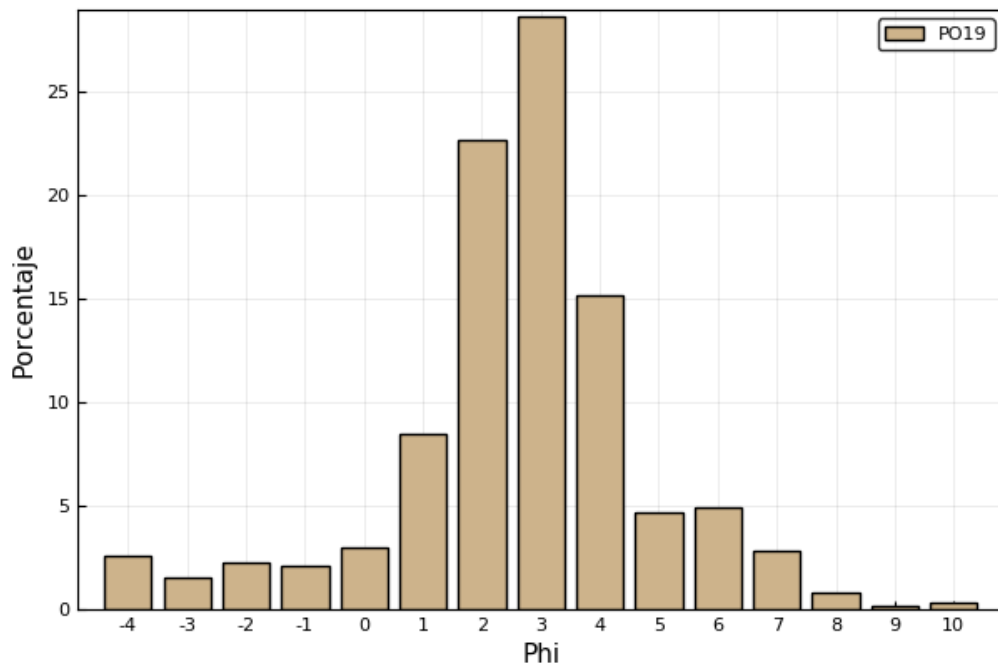


Figura 23.1: Histograma de la muestra granulométrica PO19.

Composición total			
% grava	% arena	% limo	% arcilla
8.49283232	77.9676093	13.153122	0.38626982

Tabla 19: Porcentajes de las clases granulométricas para la muestra PO19.



Figura 23: Fotografía de la marca del flujo en el tronco del árbol.

Sitio: PO21

El canal erosionado en el depósito es de 0.5 metros en ancho y con una profundidad de 0.5 metros (Figura 24). La muestra que se recolectó de este depósito está conformada en su mayor parte de arena con 74.52%, la grava está presente en un 10.60%. (Tabla 20).

El histograma granulométrico presenta una moda en 3ϕ . (Figura 24.1). La media granulométrica es de 2.18ϕ que corresponde a un diámetro promedio en el rango de arena fina, la desviación estándar calculada se encuentra en el valor de 1.75ϕ lo que se refiere a un depósito pobremente seleccionado, el grado de asimetría es de 0.06, se trata de una curva simétrica y para el valor de la curtosis que es de 1.21 representa una curva leptocúrtica.

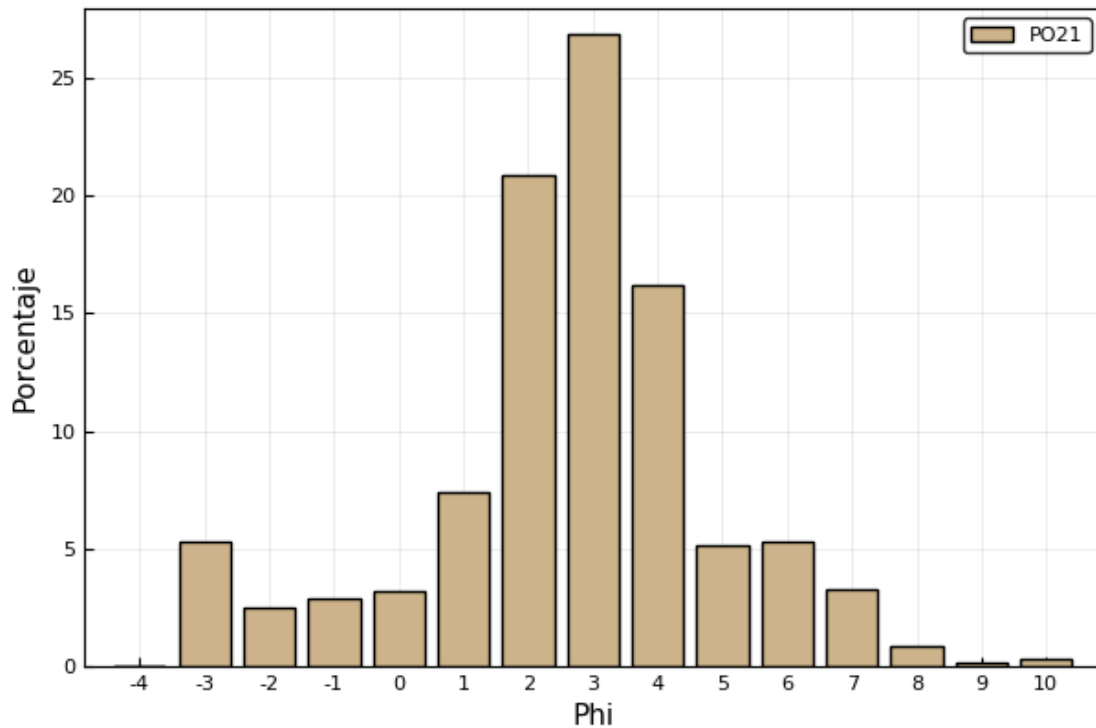


Figura 24.1: Histograma granulométrico para la muestra PO21.

	Composición total		
% grava	% arena	% limo	% arcilla
10.6054955	74.52175	14.4526332	0.4180932

Tabla 20: Porcentaje de grava, arena y material fino de la muestra PO21.



Figura 24: Depósito del lahar para la muestra PO21.

	Deposito Huitzilac			
Muestras	Media	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
PO10	1.8577	0.9282	-0.264	1.2688
PO11	1.9366	1.5698	0.1816	1.4258
PO14	1.9747	1.721	0.1014	1.2096
PO15	2.7847	1.2428	0.4447	1.2225
PO17	1.3334	1.7413	0.0019	1.0401
PO19	2.2035	2.0276	-0.1051	1.8497
PO21	2.1861	1.7534	0.0614	1.2176

Tabla 21: Parámetros estadísticos de las muestras en la barranca Huitzilac.

5.2.1 Comparación de las características granulométricas de las muestras analizadas

Las curvas de los pesos acumulativos (Figura 25) de las muestras recolectadas del depósito en la barranca Huitzilac muestran que las fracciones granulométricas más abundantes se encuentran en un rango de -1 a 2ϕ ya que ahí es donde se presenta una mayor pendiente de las curvas de las muestras, lo que corresponde al tamaño de gravas y arenas. En este rango se observa una migración de las curvas hacia las fracciones más finas lo que indica una disminución de la granulometría.

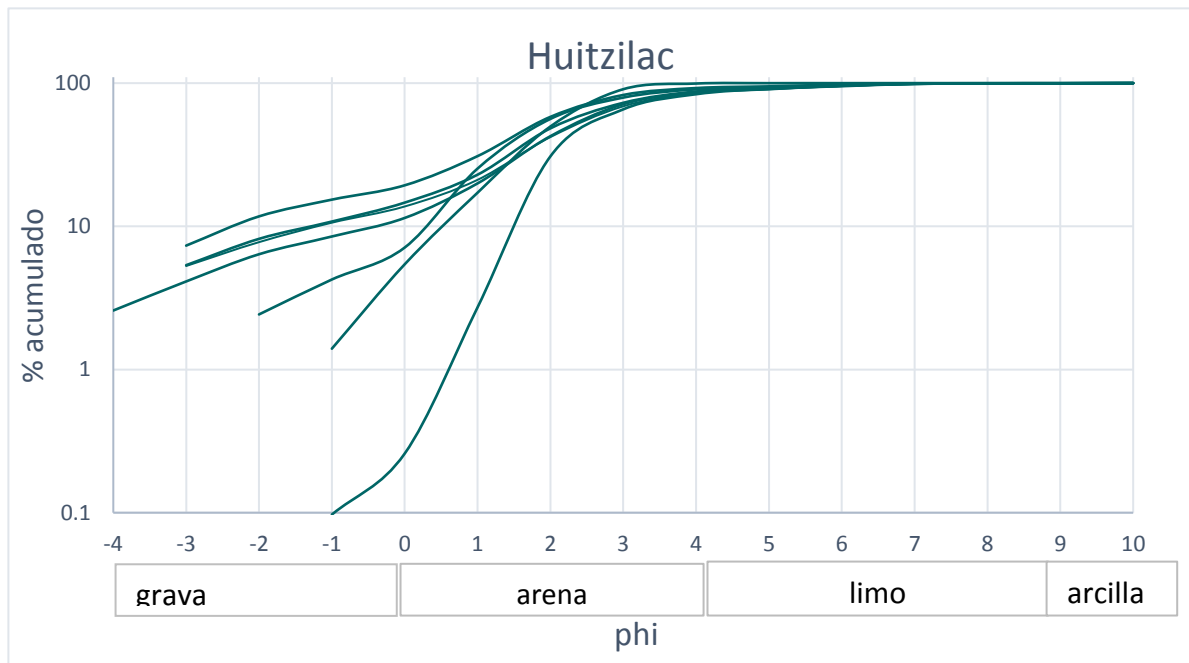
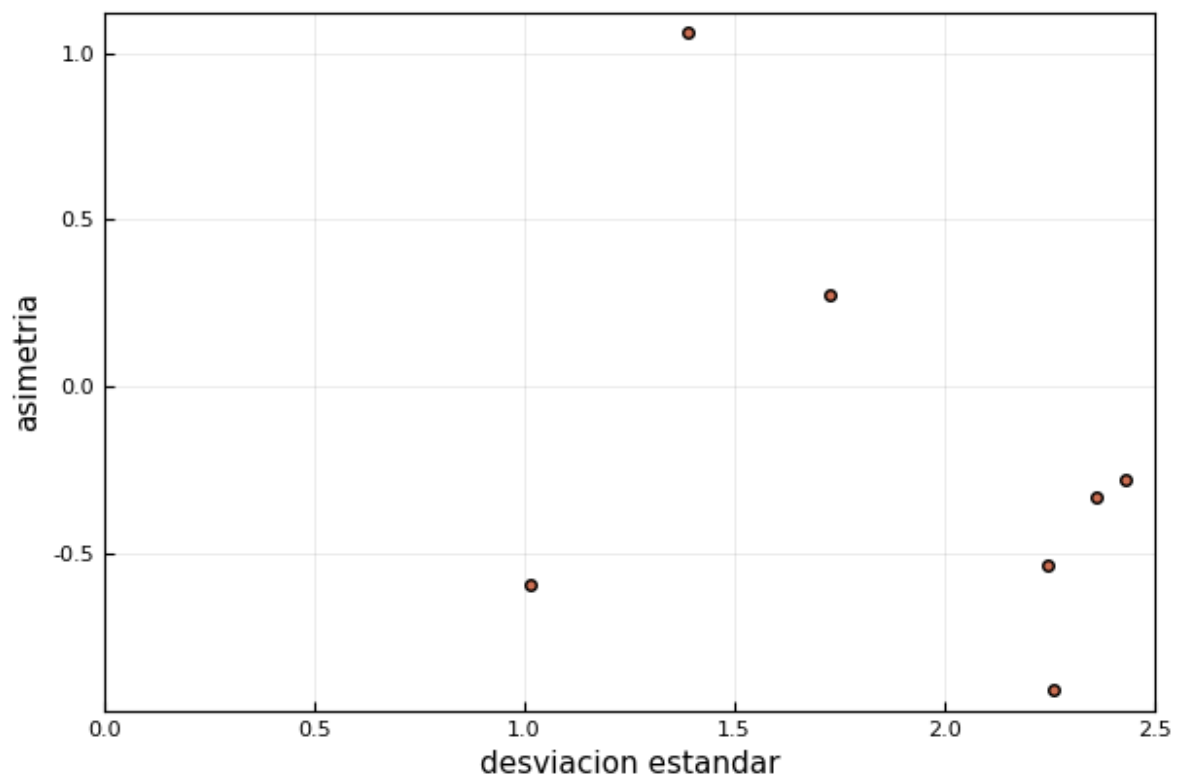
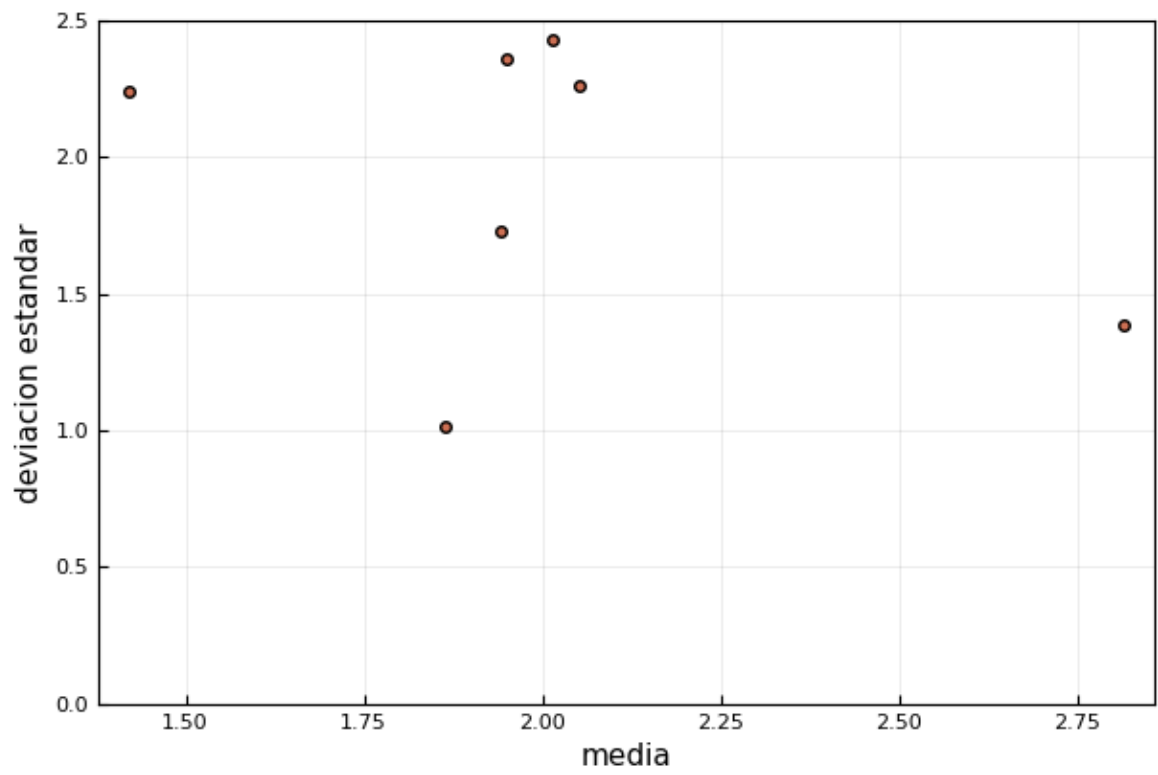


Figura 25: Curvas de frecuencia acumulativa del porcentaje en peso para las muestras correspondientes a la barranca Huitzilac.

El valor de la media para las muestras del depósito Huitzilac se encuentran principalmente entre 1.75 a 2.25ϕ que representa un diámetro promedio en el rango de arena mediana a arena fina, mientras que la desviación estándar esta entre un rango de 1.0 a 2.5ϕ lo que indica que los depósitos están pobremente seleccionados. (Figura 25.1). Para la gráfica de asimetría contra desviación estándar la mayoría de los datos se concentran entre un rango de -1 a -0.2 representan curvas altamente asimétrica gruesa a asimétrica gruesa. En la gráfica de curtosis los datos se orientan a una curva leptocúrtica, donde la porción central está mejor seleccionada que en los extremos de esta curva.



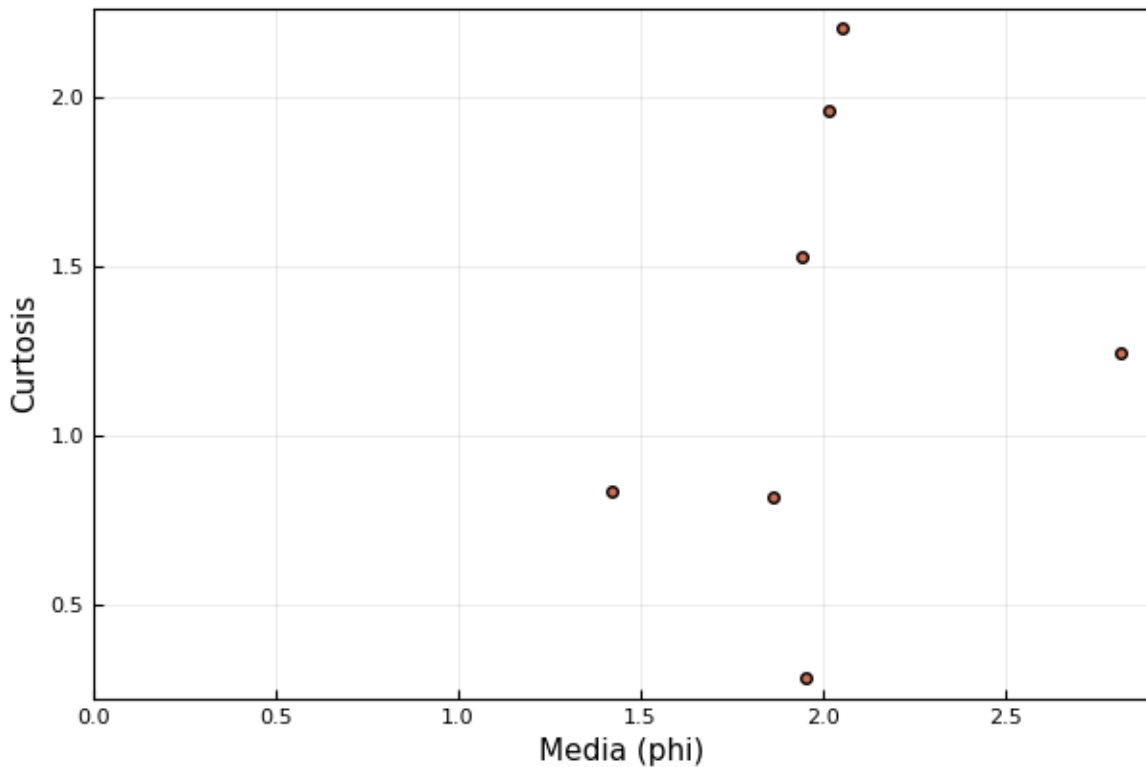


Figura 25.1: Graficas de los parámetros estadísticos para la barranca Huitzilac, a) media vs desviación estándar, b) desviación estándar vs asimetría, c) media vs curtosis.

5.3 Datos de entrada para la simulación

En el presente estudio se efectuaron dos simulaciones del lahar que se emplazó en la barranca de San Juan Tehuixtitlan. Para las simulaciones se utilizaron los parámetros descritos en la tabla 23.

El DEM utilizado tiene una resolución de 15 metros, al igual que la malla del dominio a modelar en la simulación. Para especificar el inicio del evento en las simulaciones, se creó un shapefile de puntos, los que se importaron en el programa FLO 2D. Los parámetros de la viscosidad y resistencia al corte (α y β) fueron calibrados con base en la bibliografía. En particular se escogieron los parámetros definidos por el modelo Glenwood 2 (O'Brien and Julien, 1998), valores validados para lahares no cohesivos como los ocurridos en el Popocatepetl y el volcán de Colima (Caballero et al. 2017). Para la segunda simulación se utilizaron coeficientes reológicos de mayor viscosidad como el caso del volcán deTolimán, Guatemala (Hernández, 2007).

La densidad de los sedimentos se estableció en 2.5 g/cm³. También es importante definir la descarga a través de una curva hidrográfica que representa la variación en el tiempo de la descarga máxima del flujo (Figura 26). Debido a la falta de datos directos, la curva hidrográfica fue aproximada a una forma triangular (Caballero et al., 2014).

Considerando que el 4 de octubre se registró una lluvia con una acumulación total de 35 mm en una hora y que la cuenca de San Juan Tehuixtitlan tiene un área de 6.5 km², sin considerar un proceso de infiltración se estimó un volumen total de agua de aproximadamente 227x10³ m³, con base en este volumen se ajustó una curva de descarga para la realización de la simulación. Con base en las características texturales del depósito, la concentración de sedimentos (Cv) fue variando de 0.2 a un máximo de 0.5.

Source	$\tau_y = \alpha e^{\beta C_v}$ (dynes/cm ²)		$\eta = \alpha e^{\beta C_v}$ (poises)	
	α	β	α	β
Field Data				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.036	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Area	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.2
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Relationship Available from the Literature				
Iida (1938)	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.6	17.48	0.0075	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.05	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.0047	22.2	-	-

Tabla 22: Valores para los coeficientes α y β de viscosidad y resistencia al corte, tomada de O'Brien and Julien (1998).

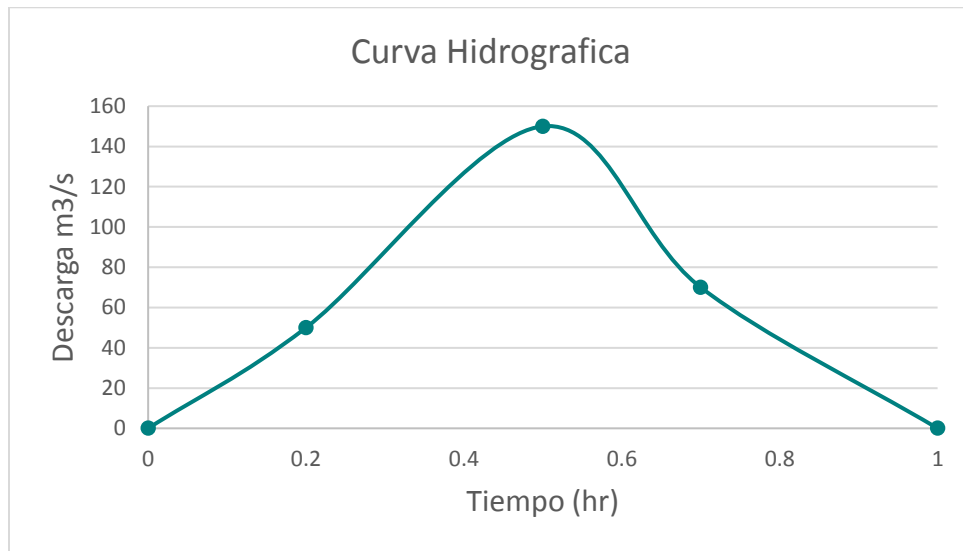


Figura 26: Curva hidrográfica que representa la descarga hídrica simulada.

Parámetros	Simulación 1	Simulación 2
Coeficiente de Manning	0.065	0.065
Numero de Froude	0.9	0.9
Viscosidad	$\eta = 0.0648e^{6.2Cv}$	$\eta = 0.03e^{26.4Cv}$
Resistencia al corte	$\tau_y = 0.0765e^{16.9Cv}$	$\tau_y = 0.005e^{32.4Cv}$
Resistencia Laminar del Flujo	2000	2000

Tabla 23: Parámetros utilizados para simular el evento en FLO 2D para la barranca San Juan Tehuixtitlan.

5.4 Resultados de las simulaciones

Una vez realizadas las simulaciones, estas fueron visualizadas mediante el programa Mapper ++. (Figura 27). Posteriormente se trabajaron estas simulaciones en el programa Qgis 2.11.18. Los resultados obtenidos a través de FLO 2D fueron los siguientes.

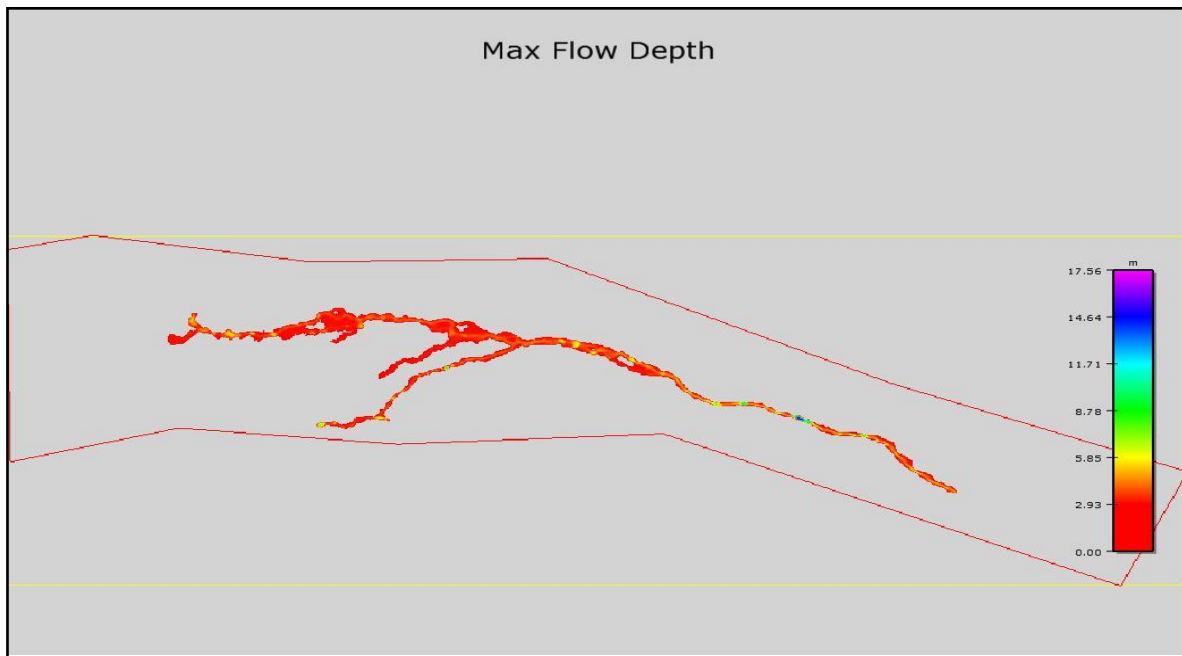


Figura 27: Máxima velocidad del flujo (Max Flow Depth) a través de la simulación en FLO 2D y visualizada en Mapper++.

Las simulaciones del flujo corresponden a flujos hiperconcentrados con una relación entre sedimento y agua máxima de 0.5.

En la primera simulación del flujo en esta barranca alcanzó 9 kilómetros aproximadamente, llegando al poblado de San Juan Tehuixtitlan. El volumen del flujo simulado fue de 3.62×10^5 m³. Los resultados fueron comparados con las observaciones de campo en cuanto a la profundidad del flujo. En particular, las profundidades del flujo simulado, están en el rango de las profundidades observadas en campo.

En el punto PO1C corresponde a una zona proximal (zona que se encuentra cerca al área fuente de la formación del lahar), con una profundidad de 1.5 metros para el flujo simulado, en campo el paso del lahar dejó marcas de 4 metros de altura. Para el siguiente punto ubicado en una zona intermedia tiene una profundidad de 1.8 metros en la simulación realizada, para la parte distal (parte más alejada del área fuente de la formación del lahar) en el punto SJT1702 la simulación arroja un espesor de 1 metro y en campo tiene una profundidad aproximada de 0.8 metros. Otro punto que corresponde a la parte distal SJT1707 en donde el flujo observado tiene un espesor de 1.5 metros, la simulación presenta una profundidad de 1.2 metros. En la figura 28 se muestra la simulación en FLO 2D con los puntos de control antes descritos.

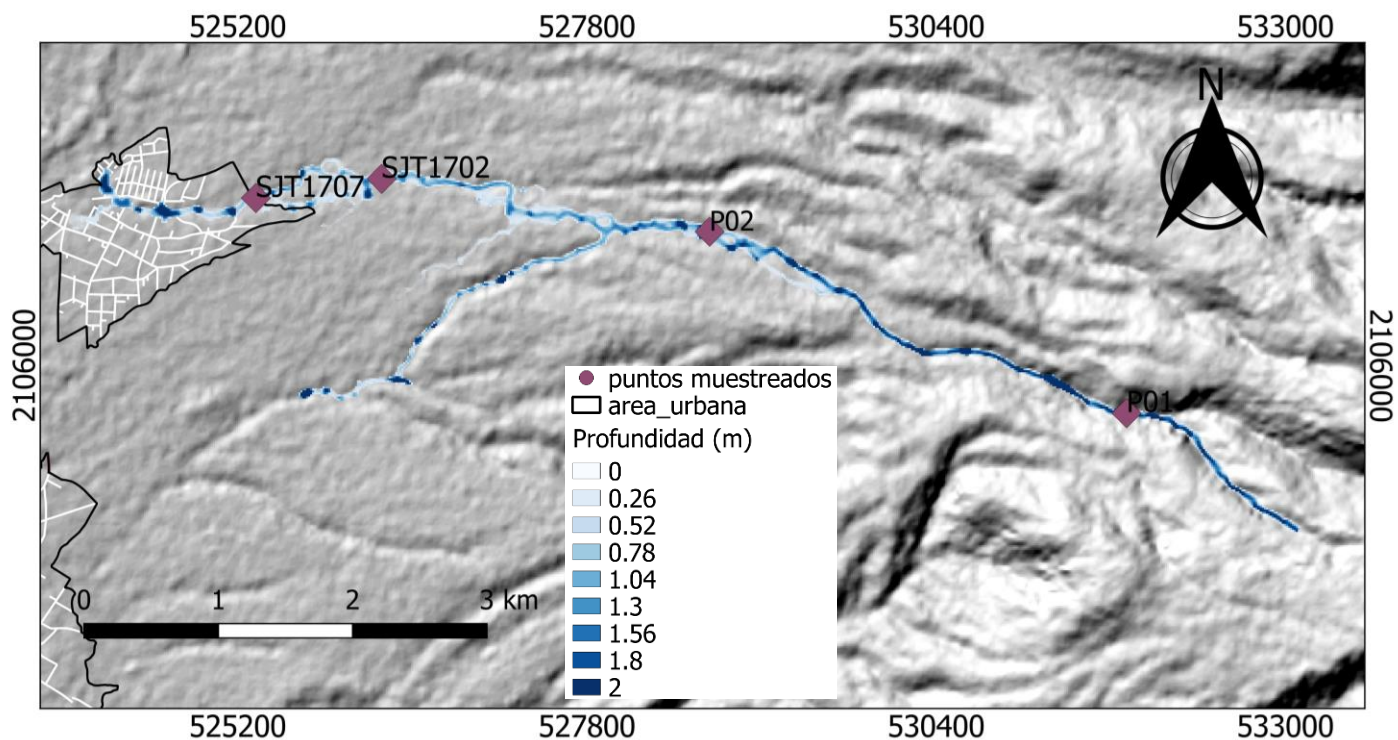


Figura 28: Resultado de la simulación 1 del lahar en la Barranca San Juan Tehuixtitlan por medio del programa Flo 2D.

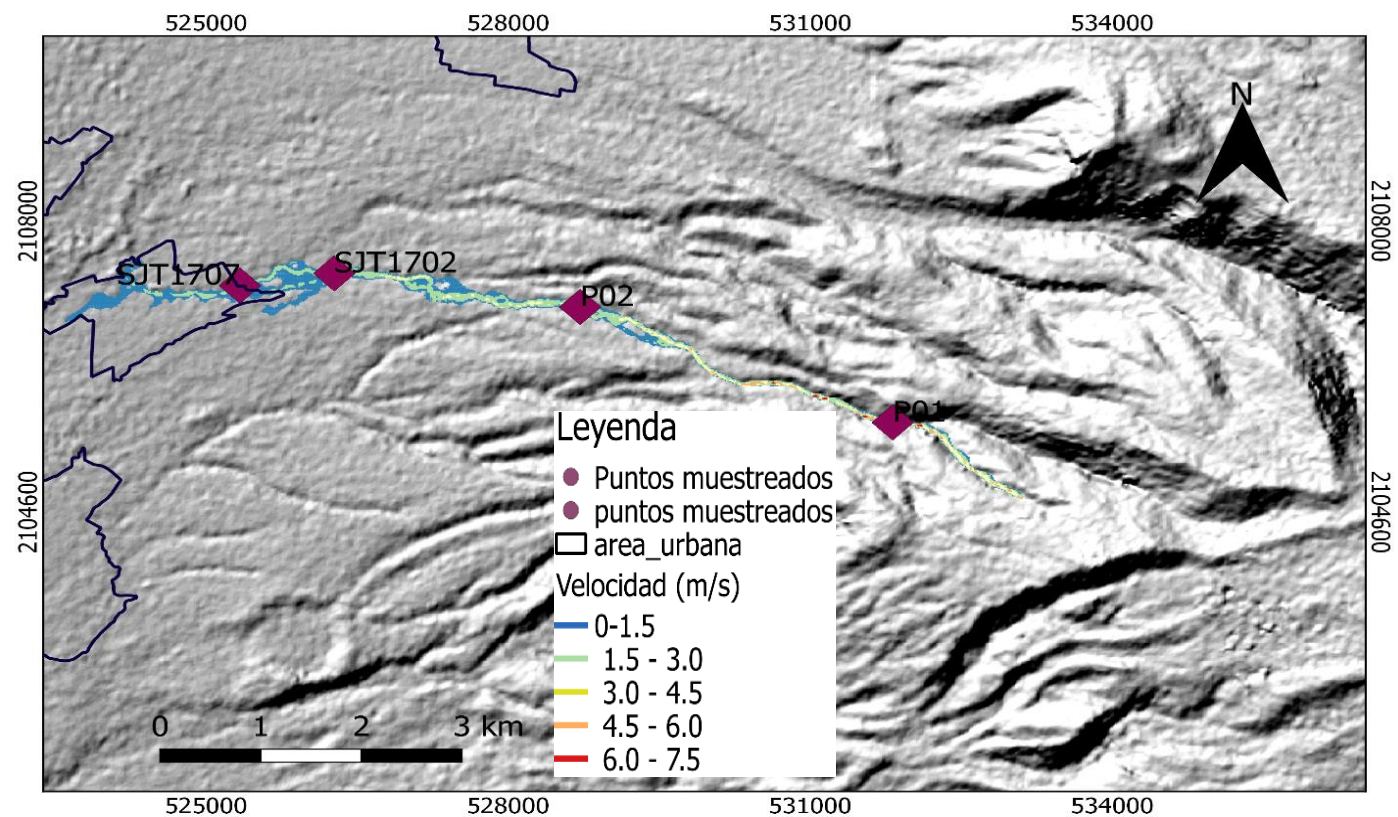


Figura 28.1: Velocidades obtenidas en la simulación del flujo a través de FLO 2D.

Las distribuciones de velocidades del flujo simulado son máximas en la zona proximal con valores de 3.8 m/s, la cual va disminuyendo conforme el flujo desciende, en la parte intermedia se obtienen velocidades de 3 m/s, para terminar en la zona distal con velocidades que van en un rango desde 1.2 a 2.5 m/s (Figura 28.1).

En la simulación 2 (Figura 29) se puede observar que el alcance que tuvo el flujo es mucho menor que la que se obtuvo en la simulación 1, este flujo no llega al poblado de San Juan Tehuixtitlan, debido a los parámetros reológicos que se utilizaron que corresponde a flujos de mayor viscosidad,

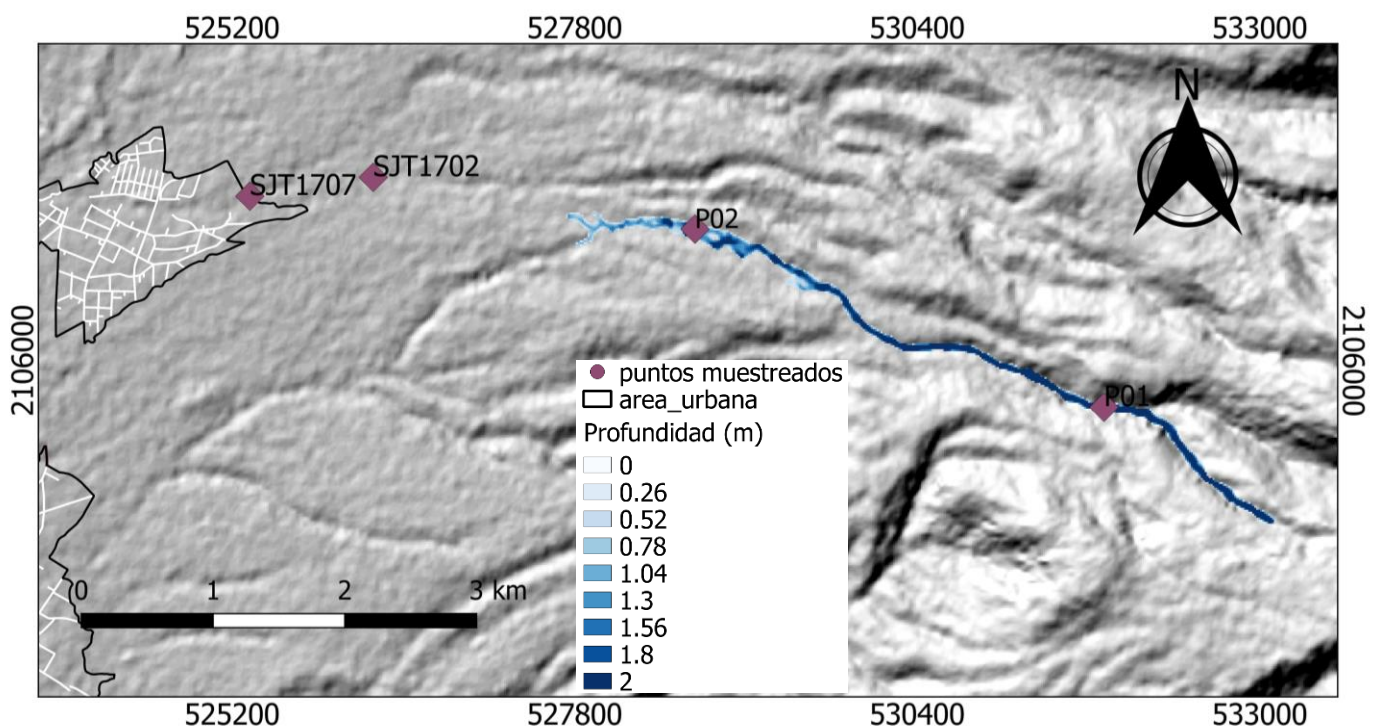


Figura 29: Resultado de la simulación 2 del lahar por medio del programa Flo 2D.

Capítulo 6: Discusión

El sismo que tuvo lugar el 19 de septiembre de 2017, disparó múltiples procesos de remoción en masa en la parte oeste del volcán Popocatepetl, donde se formaron numerosos deslizamientos superficiales con la acumulación de grandes volúmenes de material suelto en las barrancas de San Juan Tehuixtitlan y Huitzilac. El 4 de octubre se registró una lluvia que provocó la removilización del material acumulado lo que formó un lahar que llegó a afectar a la población de San Juan Tehuixtitlan. Este fenómeno nunca se había observado con anterioridad en los canales que llegan hacia dicha población.

El depósito del lahar emplazado en la barranca San Juan Tehuixtitlan corresponde a un flujo de lodo (mud flow, Crandell 1971) ya que se caracteriza por tener más del 50 % de la fracción de arena. Es un depósito homogéneo, café oscuro, moderadamente clasificado con una moda en 3ϕ . El contenido de arcilla es de 1% en todas las muestras.

En la barranca de Huitzilac, el depósito observado presenta características similares al descrito en la barranca de San Juan, sin embargo, es de un volumen mucho menor, con base en los espesores observados. Para este depósito se distinguieron dos unidades principales, la inferior de color café oscuro, constituida principalmente por material del tamaño de arena. Moderadamente seleccionada con moda en 3ϕ , la unidad superior está más enriquecida en fragmentos de pómez del tamaño de la grava, presentando una selección más baja y un enriquecimiento en las fracciones de -1 a 2ϕ .

En la gráfica de los pesos acumulativos se comparan los dos depósitos, en donde se puede observar una mayor heterogeneidad en las características granulométricas del depósito en la barranca Huitzilac (Figura 30).

En cuanto a la magnitud de los eventos, se puede observar que el depósito estudiado en la barranca de San Juan Tehuixtitlan alcanzó los 9 kilómetros, mientras que en la barranca Huitzilac el depósito tuvo una mayor extensión (10 kilómetros).

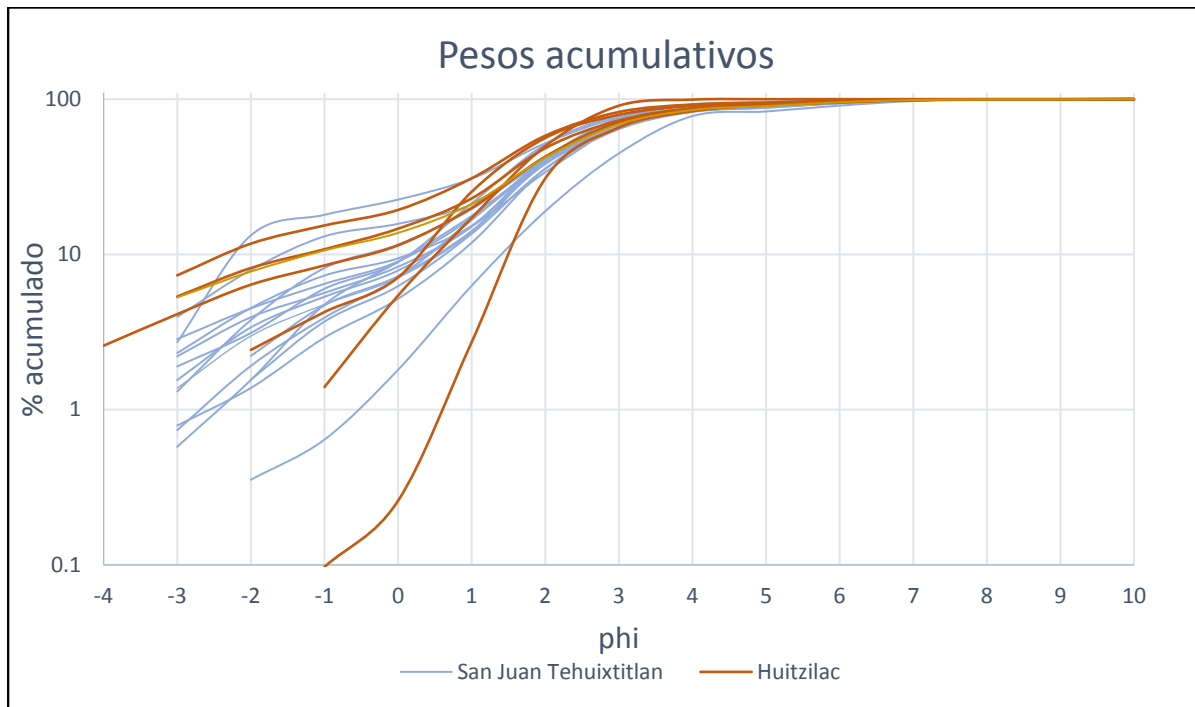


Figura 30: Curvas de frecuencia acumulativa del porcentaje en peso para las muestras correspondientes para las dos barrancas (San Juan Tehuixtitlan y Huitzilac).

La simulación realizada en este trabajo fue validada con los datos obtenidos en campo, las profundidades que se observan en campo se acercan a los espesores que se obtuvieron de las simulaciones realizadas descritas con anterioridad. En la simulación, el evento tuvo un alcance de 9 kilómetros, el cual se observó hasta el poblado de San Juan Tehuixtitlan con un volumen del flujo de $3.62 \times 10^5 \text{ m}^3$.

Los eventos generados a raíz del sismo de 2017 son completamente diferentes a los lahares que se han originado en el volcán Popocatepetl durante su historia eruptiva. Estos eventos corresponden a los lahares ocurridos en 1997 y 2001.

En 1997 después de una intensa caída de ceniza en la parte alta del glaciar, se registró un derretimiento parcial de este y un rápido descenso de agua ($1 \times 10^7 \text{ m}^3$) lo que originó un lahar que llegó al poblado de Santiago Xalitlitzitla, este lahar transportó $1.85 \times 10^5 \text{ m}^3$ de material. El lahar se ha descrito como un flujo de escombros muy mal clasificado, heterolitológico y con predominancia en fragmentos del tamaño de bloques embebidos en una matriz arenosa (Capra et al., 2003).

El 22 de enero de 2001, tuvo lugar un episodio explosivo, con una columna eruptiva de 8 kilómetros de altura, asociada a flujos de pómez los cuales se emplazaron en el sector norte del volcán. Estos flujos descendieron sobre el glaciar provocando una fusión parcial del mismo. Después de 5 horas aproximadamente, un lahar descendió a lo largo de la barranca Huiloac con un alcance de 15 kilómetros, llegando a la población de Santiago Xalitlintla, con un volumen calculado de $1.6-2.4 \times 10^5 \text{ m}^3$. El depósito fue descrito como un flujo de escombros masivo con espesores alrededor de los 70 centímetros y un espesor máximo de 150 cm en la parte media del lahar, con fragmentos de pómez de varios centímetros de diámetro embebidos en una matriz caracterizada por un 70% de limos y arena y con 1% de arcilla.

Ambos lahares ocurridos en la barranca Huiloac son primarios (sin-eruptivos), ya que ocurrieron durante un episodio eruptivo. En el caso del evento de 1997, el material fue progresivamente erosionado desde el cauce del río, de diferente composición y tamaño. En el caso de del lahar de 2001, el material removilizado consistía principalmente por el material juvenil de depósitos piroclásticos (pómez). Por el contrario, los eventos ocurridos durante el sismo, no tiene relación con la actividad volcánica y se originaron por la removilización súbita de material que constituye las capas más superficiales del cono actual, principalmente ceniza volcánica que periódicamente se acumula durante las frecuentes erupciones volcánicas.

En el caso del evento en la barranca Huitzilac, la removilización fue más profunda e integró depósitos de caída de pómez de las erupciones plinianas históricas del volcán.

Capítulo 7: Conclusiones

El evento en la barranca de San Juan Tehuixtitlan fue reportado después de una lluvia que acumuló 35 mm el día 4 de octubre, tuvo un alcance de 9 kilómetros. El lahar que ocurrió en la barranca Huitzilac tuvo un alcance alrededor de los 10 kilómetros sin embargo no hay testigo de cuando se haya originado, si el mismo día del sismo o si ocurrió en los días posteriores.

Los resultados que arrojó la caracterización granulométrica que se realizó a los depósitos que dejó el lahar se utilizaron para obtener los valores que se utilizaron en las simulaciones numéricas realizadas, el material que formaba al lahar estaba formado de un porcentaje muy alto de arena y un porcentaje mínimo de arcilla, definiendo al lahar como poco viscoso. Debido a los parámetros estadísticos se trata de depósitos moderadamente clasificado a pobremente clasificados. Las observaciones en campo fueron fundamentales también para obtener estos valores empleados en la simulación numérica.

El modelo numérico de un lahar representa una adecuada herramienta para la reproducción del evento observado, en el presente trabajo se utilizó el código FLO 2D, con el cual se obtuvo una buena aproximación en cuanto a las observaciones en campo. En la simulación 2 se puede observar que el alcance que tuvo el flujo es mucho menor que la que se obtuvo en la simulación 1, debido a los parámetros reológicos que se utilizaron corresponden a flujos de mayor viscosidad, por lo que no representa lo observado en campo. Siendo los parámetros de la simulación 1 los más apropiados para reproducir este evento lahárlico.

Las imágenes Spot utilizadas para determinar la génesis del evento también permitieron comparar el alcance del lahar con respecto a lo observado en campo y en la simulación realizada en FLO-2D.

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian la importancia que tiene el estudio de lahares, ya que representan una de las mayores amenazas volcánicas debido a que son capaces de movilizar grandes volúmenes de sedimentos, los cuales producen severos efectos para las poblaciones que se encuentran cerca de volcanes, además de que esta amenaza puede ocurrir cuando el volcán se encuentra en una etapa de actividad eruptiva como los lahares de 1997, 2001 y pueden también ocurrir cuando, no necesariamente el

volcán se encuentre en actividad, como por ejemplo los lahares ocurridos en 2017 o el lahar secundario ocurrido en 2010 al NW del Popocatepetl.

7.1 Recomendaciones

1. Mantener en buen estado el canal por el cual descendió el lahar en el poblado de San Juan Tehuixtitlan, sin obstrucciones como basura que puedan desbordar el flujo, evitando daños tanto a la población como a la infraestructura.
2. La construcción de barreras que bloqueen y desvíen la trayectoria de posibles lahares, minimizando sus efectos.
3. Ya que la población de San Juan está expuesta a este fenómeno, es recomendable estar enterados de que hacer y cómo actuar antes, durante y después de un evento lahático.
4. Monitoreo en ambas barrancas, por ejemplo, mediante el uso de sensores sísmicos. Estos sensores detectan el ruido generado durante el tránsito de estos flujos en el canal en el cual están instalados (en tiempo real).

Bibliografía

Blas, C, J. 2013. Metodología de ortorectificación de imágenes de satélite spot 5 para la generación de información geográfica de alcance nacional en el INEGI. Tesis de Licenciatura en Geografía, UNAM.

Borcelli, L y Sarocchi, D.,2012. Decolog www.decolog.org.

Caballero, G, A, M., 2007. Análisis textural del depósito de avalancha de escombros “El Zaguan”, Volcan Nevado de Toluca: Dinámica de transporte y mecanismo de emplazamiento, Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Instituto de Geofísica, UNAM.

Caballero, G, A. M., 2012. Dinámica de flujo de escombros: Nuevas evidencias a partir de datos experimentales, Tesis que para obtener el grado de Doctora en Ciencias. Instituto de Geología, UNAM.

Caballero, L., Capra L, 2014. The use of FLO 2D numerical code in lahar hazard evaluation at Popocatepetl volcano: a 2001 lahar scenario. Natural Hazards and Earth System Sciences.

Capra, L., Poblete, M. A., Alvarado, R., 2004. The 1997 and 2001 Lahars of Popocatepetl volcano (Central México): textural and sedimentological constrains on their origin and Hazards: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 131, 351-369.

Cas, R.A.F., Wright, J.V., 1987. Volcanic Successions. Chapman and Hall, London.

Castruccio, A., Clavero J. 2015. Lahar simulation at active volcanoes of the Southern Andes: implications for hazard assessment. Natural Hazards 77.

Costa, J. E., 1984. Physical geomorphology of debris flow. In: J.E. Costa and Fleisher, P.J. developments and applications of Geomorphology. Springer- Verlag, Berlin.

Costa, J, E. 1987. Rheologic, Geomorphic and Sedimentologic Differentiation of Water Flodds, Hyperconcentrated Flows and debris flow. In Baker-V, Kocher-R, Patton-P, Flood Geomorphology. Wiley.

Davila, N., Capra, L., Gavilanes, J.C., Varley, N., Norini, G., Gomez, A., 2007. Recent lahars at Colima volcano (Mexico): Drainage variation and spectral classification. Journal of Vulcanology and Geothermal Research, v.165, p.127-142.

Espinosa-Pereña, R., Martin del Pozzo, A.L., 2006. Morphostratigraphic evolution of Popocatepetl volcano, Mexico. Geological Society of America Special Paper 402.

Franco, O, 2005. Geomorfología del volcán Popocatépetl. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Tesis de licenciatura.

Franco, O., Castillo, M., 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.

González, A. E., 2000. Estudios de detalle estratigráfico y sedimentológico del lahar de San Nicolás en el flanco noreste del volcán Popocatépetl. Tesis de ingeniería, Universidad Autónoma de México, México, 109 p.

Macías, J.L., 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 3 377-424.

Martin Del Pozzo, A, L.; Alatorre, I, M.; Arana-Salinas, L., Bonasia, R.; Capra, L.; Cassata, W.; Córdoba, G.; Cortes, R.; Delgado-Granados, H., Fonseca, A., García, R., Gisbert, G., Guerrero, L., Jaimes, V., Macías, V, J., Nieto, O., Nieto-Torres, A., Paredes-Ruiz, P.A., Portocarrero-Martínez, J., Renne, P., Rodríguez-Espinoza, D.M., Salinas-Sánchez, S., Siebe-Grabach, C., Téllez-Ugalde, E. 2017. Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del Volcán Popocatépetl, Monografías Instituto de Geofísica.

Muñoz, E., 2007. Los lahares del Popocatépetl: 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 Popocatepetl volcano (Mexico), Geomorphology, 92: 91-99.

Muñoz, E., Palacios, D., Namikawa, L., Sheridan, M, Renschler, C., 2004. Contrast between computer simulations and field observations of Popocatépetl lahars. European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2004, Nice, France. Poster.

Niño, E., 2016. Evaluación del peligro asociado a lahares en el Volcán Nevado de Toluca, en el sector Noreste, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM.

O'Brien, J., 2009. Reference Manual, FLO-2D.

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.41.

Pierson, T.C., Scott, K.M., 1985. Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resource Research* 21.

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

Sarocchi D., Borselli L., Macias J.L., 2005. Construcción de perfiles granulométricos de depósitos piroclásticos por métodos ópticos. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*, v.23, 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.

Saucedo, R., Macías, J. L., Sarocchi, D., Bursik, M., Rupp, B., 2008. The Rain-Triggered Atenuque volcaniclastic Debris flow of October 16, 1995 at Nevado de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* vol. 173, 69-83.

Sheridan, M. F., Hubbard, B., Bursik, M.I., Abrams, M., Siebe, C., Macías, J.L., Delgado, H., 2001. Gauging short-term Volcanic Hazards at Popocatepetl: *Transactions American Geophysical Union*, 82, 187-188.

Smith, G.A., Lowe, D.R., 1991. Lahars: volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow hyperconcentrated flow continuum. *Sedimentation in Volcanic Settings*, SEPM Special Publication 45.

Tanarro, L. M., Andrés, N., Zamorano, J.J., Palacios, D., and Renschler, C. S: Geomorphological evolution of a fluvial channel after primary lahar deposition: Huiloac Gorge, Popocatepetl volcano (Mexico) *Geomorphology*, 2010.

Tanarro, L. M., Zamorano, J. J., Palacios D. 2005. Glacier degradation and lahar formation on the Popocatepetl volcano (Mexico) during the last eruptive period (1994-2003). *Zeitschrift für Geomorphologie* 140, 73-92.

Vallance, J. W., 2000. Lahars. Encyclopedia of volcanoes. Academic press.

Vázquez, R., Capra, L., L, Caballero. L., Arámbula- Mendoza, R., and 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.

Zaragoza, C. A., 2017. Caracterización y dinámica del lahar secundario ocurrido en 2010, volcán Popocatepetl: Mecanismos disparadores, características texturales y simulación numérica. Tesis que para obtener el grado de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM.