



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de peligro por lahares en
el volcán La Malinche y
delimitación de los depósitos
secundarios en el sector sur**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Eduardo Ernesto Dávila Lamas

DIRECTOR DE TESIS

M. en C. Amiel Nieto Torres



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

Agradecimientos

Esta tesis forma parte de los estudios e investigaciones que se desarrollaron dentro del proyecto PAT "Mapa preliminar de peligros del volcán La Malinche" del 2017. Desarrollado en la Subdirección de Riesgos Volcánicos, de la Dirección de Investigación del Centro Nacional de Prevención de Desastres. Parte de mi proyecto de práctica profesional a cargo del Maestro en Ciencias Amiel Nieto Torres.

A mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería, que fueron las organizaciones por las cuales fue posible culminar mis estudios.

A mi tutor, el M. en C. Amiel Nieto Torres, por permitirme colaborar con él en el desarrollo del proyecto. Por su amistad, por sus constantes consejos y orientación. Por su apoyo total a la elaboración del presente trabajo y por su colaboración para hacer posibles las visitas a campo.

A mis sinodales, el Dr. Enrique González Torres, La Dra. Carmen Jaimes, M. en C. Wendy Morales y M. en C. Valerie Pompa, quienes contribuyeron a la mejora del trabajo con sus revisiones, observaciones, correcciones y sugerencias para el trabajo.

Al Dr. Ramón Espinaza quien me recibió en la Subdirección de Riesgos Volcánicos del CENAPRED, me aconsejó y compartió de su experiencia.

A la M. I. Isabel Domínguez, coordinadora de la carrera, por guiarme y apoyarme en el proceso de titulación.

A quienes me alentaron durante el estudio de mi carrera. A mis padres, quienes guiaron mis pasos desde antes de que yo tuviera control sobre ellos, y por quienes al fin ahora alcanzo, tomado de su mano, esta gran meta. Mis hermanos, Luis y Dan, mis primeros amigos. Xiadani Castro, más que una amiga, compañera y consejera, mi *ezer kenego*. A José Valtierra, Hannah, Faby, Xim, Leo, Ale, Pedro. Gracias por su apoyo incondicional y por sus incontables consejos.

A Dios, quien ha estado siempre conmigo y me ha colmado de bendiciones a lo largo de mi vida y hasta este gran logro.

Índice

Resumen

1.	Introducción.....	1
1.1.	Justificación del estudio.....	9
1.2.	Objetivos.....	23
1.3.	Hipótesis.....	24
1.4.	Peligros volcánicos.....	24
2.	Historia geológica.....	37
2.1.	Geología regional.....	37
2.2.	Historia eruptiva de La Malinche.....	42
2.3.	Geología estructural.....	52
3.	Metodología.....	55
3.1.	Integración y procesamiento de información en ArcGIS	55
4.	Resultados.....	66
4.1.	Delimitación de depósitos secundarios al sur de La Malinche.....	67
4.2.	Limitantes para lahares alrededor de La Malinche.....	72
4.3.	Simulación de lahares.....	74
5.	Discusión.....	79
	Conclusiones.....	85
	Referencias.....	86

RESUMEN

El volcán La Malinche es considerado como activo en estado de reposo, ya que su última actividad fue hace 3,100 años. Este volcán ha tenido múltiples eventos de actividad explosiva desde su origen hace al menos 38,000 años, con lo que ha alcanzado una altura superior a los 4,400 m s.n.m.m. y sus depósitos secundarios se han emplazado a distancias de hasta 23 km desde los domos centrales del volcán. Por sus grandes dimensiones y la gran cantidad de gente que habita en sus alrededores, incluyendo las ciudades de Puebla y Tlaxcala a menos de 30 km del volcán, se considera a La Malinche como uno de los volcanes más peligrosos del país.

Dada la historia del volcán, se considera que los principales peligros volcánicos presentes en La Malinche son los flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, caída de balísticos, caída de ceniza, lahares y avalanchas. De estos peligros, los lahares son los eventos de mayor probabilidad de ocurrencia, por la falta evidencia que delate una eminente reactivación del volcán, por lo que en este trabajo se analizó el peligro que presentan los lahares en La Malinche.

Se realizaron simulaciones del origen y alcance de posibles lahares que pueden generarse a futuro, considerando el registro geológico de estos eventos en los alrededores del volcán y una exhaustiva revisión de bibliografía. Con ésta, además de estudiar la evolución del volcán, se recopilaron distintos mapas geológicos y de distribución de los depósitos asociados a La Malinche. Toda esta información fue representada en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS, para su interpretación y la obtención de distintos mapas temáticos.

Utilizando distintos medios de teledetección, como vistas satelitales, aunado con trabajo de campo, se identificaron y delimitaron depósitos del sector sur de La Malinche; lo que sirvió como referencia del alcance y dimensiones de los procesos secundarios del volcán.

Finalmente, con toda la información generada y recabada, se seleccionó el escenario más probable así como su clasificación de acuerdo a su grado de peligro.

Castro-Govea, (1999 y 2007) elaboró trabajos donde delimita, describe y clasifica los depósitos del volcán La Malinche, sin embargo, en este trabajo se consiguió delimitar a mayor detalle los depósitos en la ladera sur de La Malinche, donde mejor afloran diversos depósitos secundarios, como lahares y avalanchas.

Esta tesis marca el inicio de una nueva etapa en el estudio de La Malinche, puesto que se reúne la investigación previa del volcán y se toma como base para analizar uno de los peligros volcánicos latentes en La Malinche, los lahares.

1. INTRODUCCIÓN

La Malinche es un estratovolcán ubicado en el sector oriental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) entre los estados de Tlaxcala y Puebla (Fig. 1.1). El volcán se encuentra cercano a las capitales de los municipios en que se ubica, las cuales llevan el mismo nombre del estado, hallándose a 23 km al sureste de la ciudad de Tlaxcala, que cuenta con una población total de 95,051 habitantes y 27 km al noreste de la ciudad de Puebla, con un total de 1'576,259 habitantes.

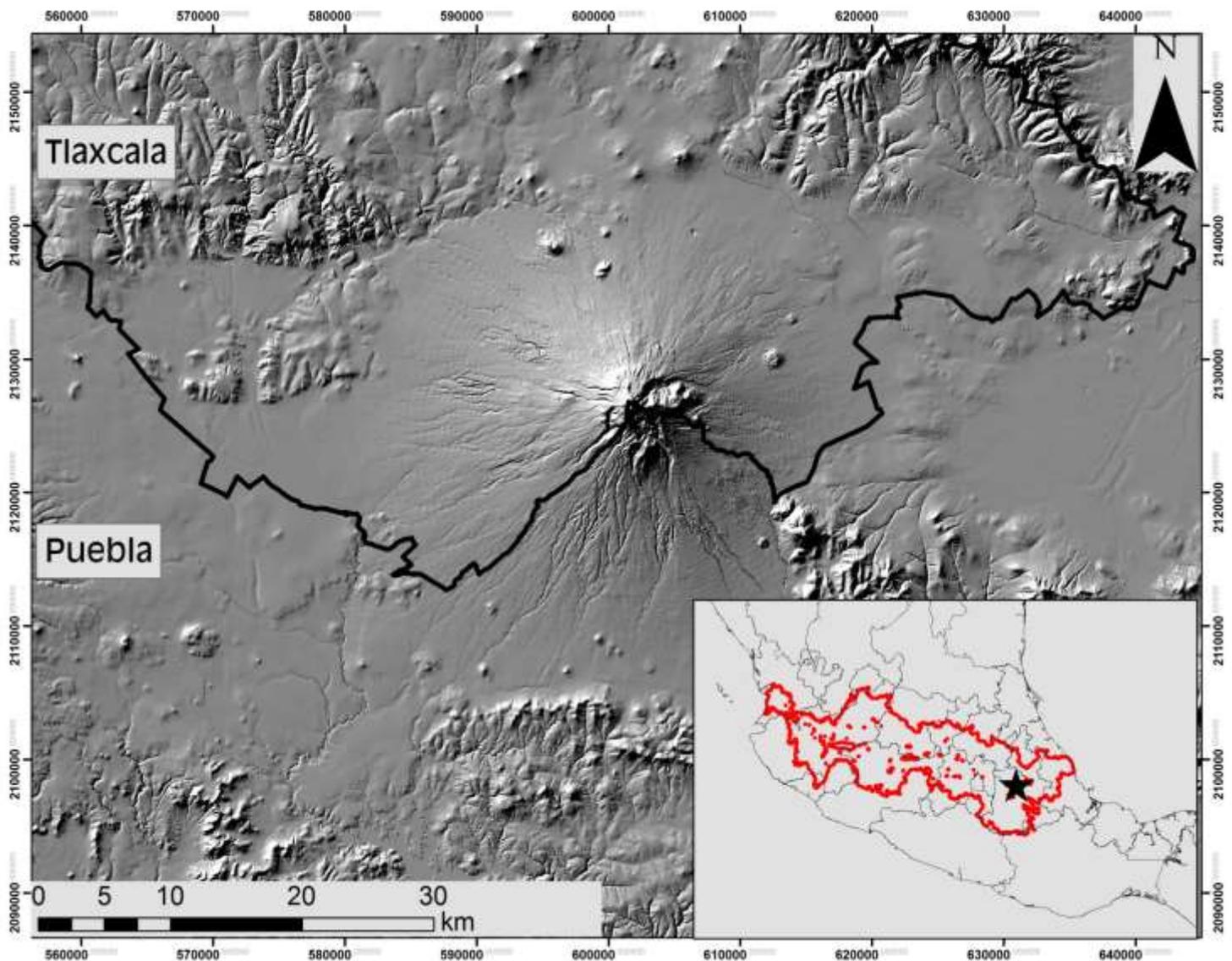


Figura 1.1) Localización del volcán La Malinche. La imagen menor permite ver su ubicación dentro del CVTM.

El nombre original en náhuatl *Matlalcuye* –la de la falda azul- ya no es utilizado hoy en día. En la actualidad se le conoce como Malinche, derivado del nombre, igual náhuatl, *Malintzin* que fue el nombre de la esposa mexicana de Hernán Cortés. Este volcán se considera activo en estado de reposo, lo que quiere decir que han pasado menos de 10,000 años desde su última erupción; algunos autores consideran que no presenta ningún tipo de actividad superficial que pueda asociarse a presencia de magma dentro del edificio volcánico (Castro-Govea y Siebe, 2007; Macías y Capra, 2005), sin embargo, Angulo-Carrillo et al. (2013) identificaron entre el 1 de septiembre de 2012 y el 1 de mayo de 2013, un total de 11 sismos volcanotectónicos de diferentes tipos. Algunos de los sismos de baja frecuencia se relacionan con la interacción fluido-roca y, por otra parte se tienen algunos sismos de tipo tornillo, cuya amplitud máxima se tiene al comienzo del sismo y disminuye gradualmente, los cuales suelen ser precursores a actividad volcánica explosiva, por lo que sísmicamente, el volcán La Malinche esta activo.

El volcán La Malinche comenzó su formación en el Pleistoceno Superior, el fechamiento más antiguo realizado por radiocarbono, es de $46,640 \pm 5,670$ / $- 3,290$ años antes del presente (A.P.), mientras que las edades más recientes varían entre 3,005; 3,115; 3,280 y 3,450 años A.P. (Castro-Govea, 1999), por lo que Castro-Govea (2007) considera la última erupción de La Malinche hace 3,1 ka.

Debido a que La Malinche se encuentra en estado de reposo, diversas localidades se han asentado en los alrededores del volcán desde hace algunos siglos y han crecido considerablemente durante las últimas décadas, principalmente por la fertilidad de los suelos y por el potencial turístico que ofrece. Sin embargo, esta concentración poblacional alrededor de La Malinche, junto con las grandes dimensiones del volcán, lo convierten en uno de los volcanes con mayor riesgo en el país.

Amenaza a la humanidad por procesos naturales

Los procesos naturales que pueden llegar a presentar una amenaza para la humanidad, tanto en pérdidas económicas como de vidas humanas, son: terremotos, inundaciones, derrumbes, procesos costeros, el impacto en la Tierra de asteroides o cometas y

vulcanismo (Keller, 2005; Macías y Capra, 2005). Cada uno de estos fenómenos tiene un origen diferente y, a la vez cada uno repercute de distinta forma en la sociedad, por lo cual, se deben estudiar de manera particular los diferentes peligros que presenta cada proceso.

La mayor parte de los procesos naturales suelen dejar evidencia dentro del registro geológico, por lo que pueden analizarse algunos de los grandes desastres naturales que ha presentado la Tierra a partir de su origen, incluyendo varios procesos que han sido vitales para la evolución del mismo planeta y la existencia actual del hombre; tales como, los cráteres, basaltos de inundación, facies sedimentarias asociadas a procesos hidrometeorológicos, eustacia a través del tiempo geológico, entre otras. Sin embargo, distintos peligros naturales continúan aconteciendo ahora pudiendo presentar riesgos para la sociedad, tanto en la infraestructura como amenazando la vida misma de personas en distintas localidades.

A lo largo del desarrollo de la humanidad, se ha ido incrementando el gasto económico que los desastres implican, dado que cada vez la humanidad demanda mayor cantidad de recursos para atender las necesidades de la creciente población (Keller, 2005). En la Figura 1.2, se puede observar el gasto que representaron los peligros naturales en todo el mundo durante la segunda mitad del siglo XX, y la tendencia exponencialmente creciente de dicho gasto. Dicho comportamiento de incremento acelerado de gastos por peligros naturales es atribuido principalmente al asentamiento de poblados en zonas de peligro, al constante crecimiento descontrolado de las distintas localidades preexistentes y la mayor inversión de capital en infraestructura, tanto en grandes ciudades, en vías de comunicación y en zonas rurales en desarrollo (Keller, 2005).

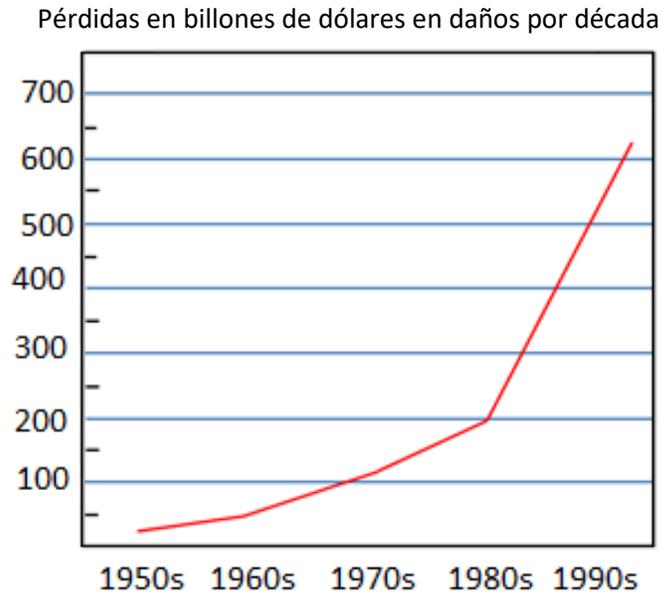


Figura 1.2) Tendencia creciente del gasto económico que implican los desastres naturales a nivel mundial por década, en la segunda mitad del siglo XX. Modificado de Keller (2005).

La cantidad de peligros naturales ocurridos varía aleatoriamente año tras año, sin embargo la necesidad de vivienda tras crecimiento poblacional en ocasiones provoca el asentamiento en zonas de peligro, lo que genera una tendencia creciente en el número de procesos naturales que afectan a la sociedad, es decir, que presentan riesgo. Esta cantidad de desastres naturales no siempre se encuentra relacionada directamente con el número de muertes provocadas por el evento o la pérdida económica. Esto se debe a varios factores, como son; la diferencia en el nivel de riesgo de los distintos procesos naturales, el grado de preparación de la sociedad a los desastres, la existencia y calidad de estudios de los distintos fenómenos en cada región determinada y el crecimiento poblacional, principalmente. Un estudio realizado por Alcántara-Ayala (2010) nos permite observar de manera práctica lo anterior tras realizar un análisis de los desastres naturales ocurridos en México y América central. Se puede observar en la Figura 1.3, la diferencia entre el número de desastres naturales acontecidos, que generaron impacto en la sociedad, contra el número de vidas humanas perdidas por estos desastres naturales, analizado de manera anual en un periodo comprendido entre 1965 y 2007. Dado que el número de desastres hace referencia a los procesos naturales que causaron afectaciones en la sociedad, se puede notar que los desastres presentan una tendencia creciente. Por otra

parte, el número de fallecimientos provocado por estos desastres muestra una disminución a través del tiempo. Sin embargo, la curva de los fallecimientos muestra 3 picos sobresalientes en los años de 1976, 1985 y 1998. En 1976 y 1985, no se tuvo una gran cantidad de desastres, sin embargo si una gran cantidad de víctimas, ésta se debe a que en esos años ocurrieron terremotos devastadores en Guatemala y México, respectivamente. Mientras que el codo de 1998 es provocado por un periodo de huracanes provenientes del Océano Atlántico, donde el principal, el huracán Mitch, afectó a Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua. Únicamente existe un evento volcánico en México que ha causado daño suficiente para apreciarse en la Figura 1.3., y es la erupción del volcán el Chichón en 1982.

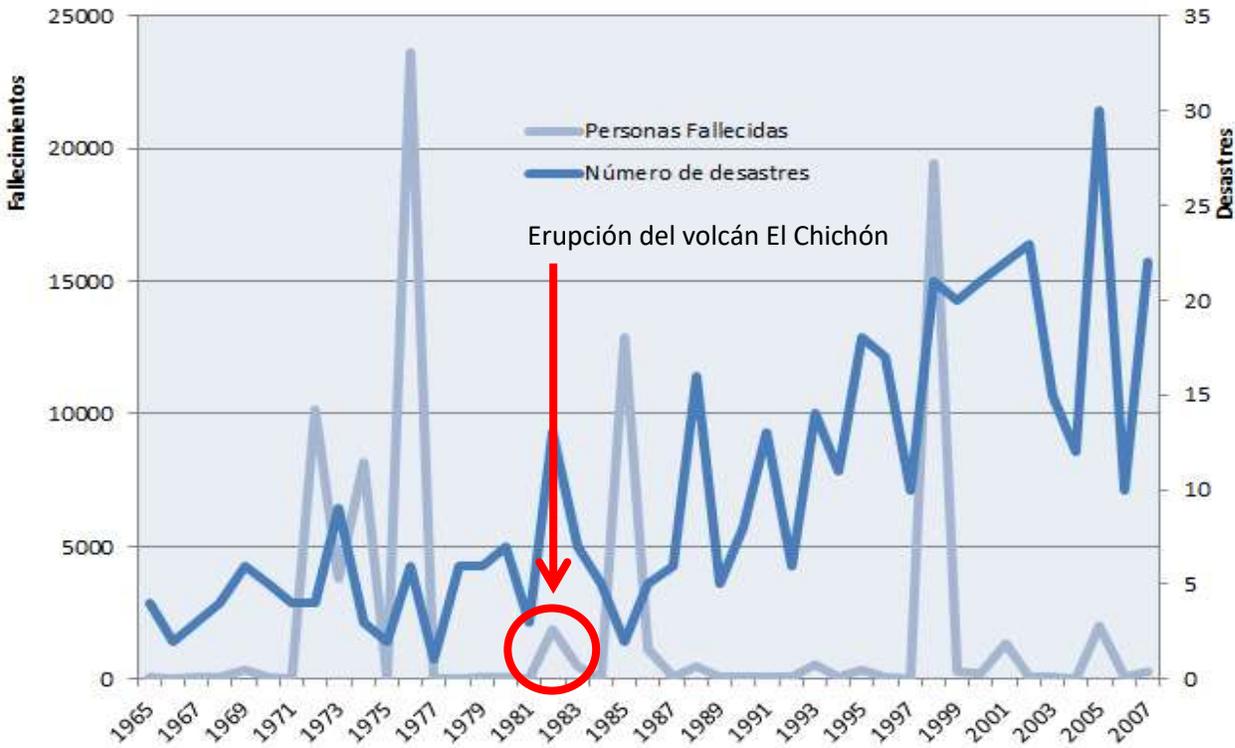


Figura 1.3) Conteo de desastres naturales que han afectado diversas localidades en México y América Central entre los años de 1965 y 2007; así como el número de víctimas fatales que provocaron dichos eventos. Modificado de Alcántara-Ayala (2010).

En los poblados de Rolando Rodríguez y El Porvenir, en Nicaragua, fallecieron más de 2,500 personas en 1998, al ser arrasados por un lahar generado en el volcán Casita, detonado por el gran aporte de agua del huracán Mitch (Alcántara-Ayala, 2010). Los más de 1400 mm de lluvia en un periodo menor a 4 días generaron el lahar en el flanco sur del volcán Casita. En menos de 3 minutos el lahar acabó con la mayor parte de los habitantes de los poblados, ya que se calcula se movieron del orden de $200,000 \text{ m}^3$ de materiales volcánicos, alcanzando una velocidad máxima de 15 m/s (Macías y Capra, 2005). En promedio el lahar tuvo un espesor de 3 m, cubriendo un área de 25 km^2 a una distancia de 18-20 km de distancia desde el volcán (Macías y Capra, 2005). Con lo cual se deduce que de los fallecimientos por el huracán Mitch, alrededor del 15% fueron generados por peligros volcánicos, aun cuando el volcán se encontraba inactivo.

Solamente hay un caso de actividad volcánica en México, que puede apreciarse en la Figura 1.3, señalado con un círculo rojo; y se refiere a la erupción del volcán El Chichón o El Chichonal, a finales de marzo y principios de abril de 1982. Este fue un evento de actividad volcánica explosiva que dejó un saldo de al menos 2,000 fallecimientos y tuvo repercusiones no solo en México, sino que también hubo impacto a nivel mundial, como se describirá más adelante (Hoffer et al. 1982).

Los picos sobresalientes restantes en la Figura 1.3, son en los años 1972, 1973 y 1974. El más significativo es el de 1972 donde las muertes fueron generadas principalmente por un terremoto en Managua, Nicaragua, donde algunos autores reportan hasta un total de 12,000 muertes (Mannan, 2014). En el caso de 1973, las bajas no se atribuyen a un único evento, sino que como se puede apreciar en la Figura 1.3, el año de 1973 fue cuando se tuvo mayor cantidad de desastres que afectaran a México y Centroamérica, en el periodo comprendido entre 1965 y 1981. De forma similar se dan las pérdidas en 1974, donde se tienen diversos eventos que produjeron las muertes, los más significativos fueron el huracán Fifi-Orlene en Honduras y la Erupción del Volcán de Fuego, en el mismo país.

Con todo lo anterior se confirma que los procesos hidrometeorológicos, tales como huracanes e inundaciones, son los eventos que causan mayor impacto social y económico

en México y los países vecinos del sur, ya que son los eventos que mayor cantidad de muertes han provocado. Estos procesos son seguidos por los procesos geológicos, principalmente los sismos. Sin embargo, los desastres de tipo volcánico son de importante consideración también, ya que aunque de forma menos constante que los anteriores procesos, suelen ocasionar también grandes pérdidas económicas y de vidas humanas, como en el caso de México en 1982 y Nicaragua en 1998.

Guha-Sapir et al. (2012) presentan que los desastres generados por procesos volcánicos, representan el 5% del total de los desastres naturales que afectan a la humanidad, mientras que el 81% es representado por los eventos hidrometeorológicos, lo cual coincide con lo analizado en la Figura 1.3. Esta diferencia se debe a que los periodos de retorno de estos fenómenos difieren ampliamente. Sin embargo, a nivel mundial los procesos volcánicos alcanzaron durante la década 2000-2010, aproximadamente 8.92 millones de víctimas en el mundo, de las cuales 1.02 millones de víctimas se dieron en Latinoamérica (Guha-Sapir et al, 2012).

México es el sexto lugar en los países que reportan más desastres naturales anualmente, teniendo dentro de los reportes, en promedio, del orden de 1 evento volcánico perjudicial al año (Guha-Sapir et al, 2012). Por ello, a pesar de la baja reincidencia, es de gran relevancia el estudio de los peligros volcánicos. Ésto se debe a que el México forma parte de los países que se encuentran en el Cinturón de Fuego del Pacífico, el cual representa la zona con el mayor porcentaje de actividad sísmica y volcánica en el planeta.

Dentro del Territorio Nacional se puede notar la presencia de 5 distintas placas tectónicas (Figura 1.4), la Placa de Norteamericana; la Placa del Pacífico; la Placa de Cocos; la Placa de Rivera y la Placa del Caribe, por ello México es un país tectónicamente activo, que cuenta con los 3 tipos de límites entre placas: convergentes, divergentes y transformantes (Demant, 1978).



Figura 1.4) Placas tectónicas presentes en Territorio Nacional.

Por estas características tectónicas que presenta el Territorio Nacional, se tiene que más del 40% de la superficie del país se encuentra cubierto por rocas volcánicas. Mientras que los volcanes activos, se concentran en su mayoría, dentro del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM; Macías y Capra, 2005); que es una provincia fisiográfica que cruza transversalmente el centro del país desde Jalisco y Nayarit, en costas del Océano Pacífico, hasta las costas de Veracruz, en el Golfo de México; teniendo una longitud aproximada de 1,000 km y una amplitud que varía entre 80 y 230 km (Gómez-Tuena et al., 2005; Demant, 1978).

1.1. Justificación del estudio

La Malinche es uno de los estratovolcanes más altos del país, sin embargo no se tienen tantos estudios de éste como de los otros volcanes, dada su inactividad en los últimos años. Por ello en este trabajo se decide dar comienzo a la etapa de evaluación de peligros volcánicos en La Malinche.

Se delimitan depósitos en la ladera sur de La Malinche dado que en este sector del volcán fue donde se esperan los mejores y más abundantes afloramientos de depósitos secundarios, los cuales son de gran importancia para la obtención de mejores resultados en las simulaciones de lahares.

Es importante estudiar los peligros volcánicos y considerarlos una primera medida preventiva, ya que estos eventos han figurado un riesgo para la población mexicana desde los primeros asentamientos hace miles de años y hasta la fecha, como se puede ver a continuación.

1.1.1. Impacto de la actividad volcánica en México

Dada la actividad volcánica en México, la sociedad siempre se encuentra amenazada por los peligros que ésta conlleva, y así lo ha estado desde que comenzó a poblarse la zona. En la Tabla 1.1 se pueden ver los principales eventos volcánicos que se han presentado en el país, comenzando con el nacimiento del volcán Parícutín en 1943, por ser éste un evento especial a nivel mundial hasta la actualidad. La actividad de este volcán evolucionó durante los 9 años en que el volcán emitió material, teniendo flujos piroclásticos y también lavas (Pioli et al., 2008). Durante los últimos años de actividad del Parícutín el Complejo volcánico de Tacaná en 1949 y 1950, tuvo una explosión freática donde la ceniza fue el principal peligro (Mendoza-Margaín, 2010). No se tiene registro de las pérdidas económicas de éstos eventos, sin embargo asciende a varios millones de pesos, principalmente por daños en agricultura y ganado. Posterior a esto, en 1955 en el Nevado de Colima se presenta un Lahar que ocasiona decenas de decesos en Atenquique, Jalisco; a 14 km de la cima del volcán (Saucedo et al. 2008). El siguiente registro de actividad

volcánica se dio hasta 1982, la gran actividad de tipo explosiva del volcán El Chichón, la que ya se mencionó anteriormente; una explosión con impactos a nivel mundial que genera pérdidas de miles de millones de pesos (Bitrán, 2001). Después de la actividad de 1982 se presentó actividad semejante a algo ya antes vivido; el Complejo Volcánico de Tacaná presenta nuevamente una explosión freática en 1986, donde los sismos previos afectaron varias localidades cercanas, incluidas no solo en México, sino también en Guatemala (Mendoza-Margaín, 2010). En 1991 en el volcán de Colima se presenta un lahar con alcance de casi 10 km, el cual cobra 2 vidas (Macías y Capra, 2005). En 1994 se reactiva el volcán Popocatepetl y produce la muerte de 5 alpinistas que ignoraron la alerta y durante su ascenso, el volcán emitió cenizas que produjeron el accidente (Bitrán, 2001). La actividad de este volcán suele ser semejante a lo largo de los años, formación de un domo de lava dentro del cráter interior, seguido de la destrucción de este domo y emisión de cenizas (Espinasa-Pereña y Martin-Del Pozzo, 2006). La siguiente actividad se dio en un volcán que ya se ha mencionado antes, el Complejo Volcánico Tacaná en 1998, pero a diferencia de los anteriores 2 eventos, esta vez se presentó un lahar, el cual causó un impacto mayor que el de las anteriores 2 explosiones en el complejo volcánico, dejando cientos de muertes en Motozintla, Chiapas (Caballero et al. 2006). Por otra parte, el Volcán de Colima presenta emisión de gases, flujos piroclásticos y balísticos en 1998 y 1999, el emplazamiento de material en este volcán permanece poco tiempo en las laderas, puesto que en los años 2000 y 2001, se generaron lahares de varios millones de m³ de volumen desplazado (Saucedo et al., 2008;Gavilanes-Ruíz, 2004; Bitrán, 2001). Igualmente en el año 2000 el Popocatepetl siguió con actividad, la cual continúa hasta la fecha, generando en ocasiones un domo interno y explosiones que fragmentan estos domos y generan pequeñas columnas eruptivas, siendo los años en que el Popocatepetl ha tenido mayores emisiones en 2000, 2001, 2005, 2012 y 2013 (Martin-Del Pozzo et al., 2016, Nieto-Torres, 2015). Entre 2002 y 2005 el Volcán de Colima mantiene actividad explosiva, con emisión de ceniza y balísticos, con algunos lahares entre erupciones, el principal en el año 2003 (Gavilanes-Ruiz et al., 2009, Macías y Capra, 2005). Igualmente en 2003 el Pico de Orizaba, presenta actividad con un gran lahar que cobra al menos 7 vidas y

genera pérdidas de 10 millones de pesos (MDP); un evento semejante se dio en el 2011, sin embargo esta segunda ocasión, no se generaron tantos daños como en el primer lahar y en cuanto a vidas, el saldo quedó en ceros (Paulín et al. 2013). Los lahares siguieron siendo el principal peligro volcánico, pues en 2005, un nuevo lahar se desplaza por las laderas del Complejo Volcánico Tacaná, evento que además contribuyó a grandes inundaciones en la zona (Murcia y Macías, 2009).

Tabla 1.1) Principales eventos volcánicos en México desde 1943 hasta el 2017, así como el impacto social y económico que cada evento produjo.

Volcán y fecha	Principales eventos	Características	Impacto	Fallecimientos (# de personas)	Impacto económico (MDP)	Fuente
Parícutin, febrero de 1943 a febrero de 1952	Flujos de lava y flujos piroclásticos.	El material expulsado evolucionó en composición, de andesita basáltica a andesita. Durante los primeros 3 años se presentaron erupciones de tipo Estromboliana Violenta, con actividad explosiva y columnas eruptivas de hasta 8 km de altura formadas principalmente por ceniza. La emisión de materiales piroclásticos, alcanza una tasa de hasta 200 ton/s durante este periodo. En los últimos 6 años, se tiene dominio de la actividad volcánica efusiva, con erupciones de tipo Vulcaniana y columnas eruptivas menores a 2 km de altura; integradas principalmente por bloques de lava, bombas y en menor proporción, ceniza. Durante los 9 años de actividad se presentan tanto emisión de piroclastos como de flujos de lava, incluso de manera simultánea. Balísticos eyectados a velocidades de hasta 150 m/s, durante cientos de explosiones individuales. Actividad sísmica intensa en la zona desde 45 días antes del comienzo.	Flujos de lava cubrieron poblados cercanos a Parícutin y San Juan Parangaricutiro. Éxodo de 2,500 personas de los poblados Parícutin, San Juan Parangaricutiro, Zirosito, Zacán y Angahuan. Ceniza alcanza la Ciudad de México, a 400 km del volcán. Muerte posible de 3 personas tras el nacimiento del volcán (desaparecidos). Daños totales 8 km a la redonda, tanto ganado y como agricultura.	(3 posibles)	/	Navarro, 2011; Pioli et al., 2008; Macías y Capra, 2005.

/ = No se tiene registro

Tabla 1.1) Continuación.

Tacaná, 1949 y 1950	Explosión freática y emisión de gases.	Fumarolas de gas a alta presión que alcanzan 500 m de altura emanado por 16 diferentes cráteres, con espesores entre 2 y 4 m.	Evacúan hogares personas en localidades hasta a 10 km SW, por la constante caída de ceniza que alcanza poblado de Unión Juárez.	/	/	Macías et al., 2015; Mendoza-Margaín, 2010.
Nevado de Colima, octubre de 1955	Lahar.	Lahar cubre un área total de 1.2 km ² . Espesor de hasta 10 m con un promedio de 4 m. Volumen mínimo de 3.2 x 10 ⁶ m ³ . Alcance de 25 km, y erosionó durante primeros 10 km. Lahar con 60% de sedimentos en peso. Flujo evoluciona a hiperconcentrado, tras el encuentro de 3 cauces (Atenquique, A. Seco y Plátanos). Flujo en el poblado durante 10-15 minutos	Afecta Atenquique, a más de 15 km del volcán; sepultando la iglesia, la escuela, varias casas, parte de la fábrica de papel del lugar y 4 puentes.	> 23	13	Saucedo et al., 2008
El Chichón, marzo y abril de 1982	Flujos piroclásticos, flujos de lava y lahares.	Inicialmente una columna eruptiva de más de 27 km por la actividad volcánica de tipo Pliniano. Posteriormente se da una explosión freatomagmática que destruye los domos centrales y genera oleadas piroclásticos en todas direcciones con alcance de 8 km a velocidades superiores a 340.3 m/s y temperaturas mayores a 500°C. Balísticos a 12 km de hasta 15 cm de diámetro. Capa de ceniza de 15 cm a 20 km y de 5 cm a 70 km. Lahar viaja más de 85 km a temperaturas alrededor de los 80°C. Libera gran cantidad de dióxido de Azufre que reacciona con la atmósfera y produce partículas sólidas suspendidas de ácido sulfúrico.	Poblado Francisco de León y El Guayabal, a 5 km, totalmente cubierto por los flujos piroclásticos. En pueblos de Chapultenango, Nicapa y Naranjo, el peso de las cenizas provocó el colapso de techos de casas, mercados e iglesias. Villahermosa, a más de 75 km, quedó en oscuridad total por la ceniza. El ácido sulfúrico generado impide paso de radiación solar, estas partículas crearon un cinturón alrededor de la Tierra, que contribuyó a la	> 2000 (500 posibles)	2,828	Macías y Capra, 2005; Bitrán, 2001.

Tabla 1.1) Continuación.

			disminución promedio de temperatura global en 0.5°C. Cierre de carreteras de acceso y 8 aeropuertos en la región, durante semanas. Se evacuaron más de 22 mil personas. Del orden de 150 mil damnificados en un radio de 200 km. Tierras cultivables se deterioraron totalmente en un radio de 10 km; y con deterioro mínimo a 15 km. Lahar causa muerte de 1 persona, y deja varios heridos.		
Tacaná, febrero mayo 1986	Explosión a frática y de sismicidad.	Columna de 1 km de altura. Sismo el 3 de febrero de 5 grados de magnitud.	Explosión produce cráter de 20 m de largo y quema 2 hectáreas de vegetación. Desalojo de población en Unión Juárez y otras localidades cercanas al volcán, total de 17 mil personas en radio de 20 km. Sismo daña infraestructura en Ixchiguam y otras 7 localidades de Guatemala, hasta 10 km al NE del volcán.	/	/
Volcán de Colima, 1991	Lahar.	Alcance de 9.9 km. Volumen aproximado de 500,000 m ³ .	Daños en poblado La Yerbabuena a 8 km del cima del volcán. Mató al menos 20 cabezas de ganado.	2	/

Tabla 1.1) Continuación.

Popocatépetl, diciembre de 1994 - enero de 1995	Caída de cenizas.	Explosiones con emisión de ceniza, en dirección NE, E y SE.	Un estimado de 25 mil personas de 23 distintas localidades fueron evacuadas.	/	/	Nieto-Torres, 2015; Bitrán, 2001.
Popocatépetl, marzo - abril de 1996	Flujos de lava y caída de cenizas.	Crecimiento del domo de lava en el interior del cráter. Emisión de ceniza. Columna eruptiva de 4 km en dirección este y oeste.	Muerte de 5 alpinistas que se encontraban cerca del cráter.	5	/	Nieto-Torres, 2015; Bitrán, 2001.
Popocatépetl, abril-junio de 1997	Caída de balísticos y ceniza.	Balísticos y ceniza alcanzan 10 km de altura. Formación de un nuevo domo al interior del cráter.	Ceniza alcanza Hidalgo, Querétaro y la Ciudad de México. Cierra el aeropuerto de la Ciudad de México durante 12 horas. Son afectados 17 pares de parabrisas frontales de las aeronaves, por abrasión de la ceniza durante vuelos; los 17 tuvieron que ser remplazados.	/	/	Nieto-Torres, 2015; Bitrán, 2001; Delgado, 2001.
Popocatépetl, julio de 1997	Lahar.	Flujo presenta 12 km de alcance	Lahar alcanza poblado Xalizintla. Es inundada una casa y se afectaron varios predios con árboles frutales y una milpa.	/	/	Espinosa-Pereña, 2012
Popocatépetl, enero de 1998	Caída de ceniza.	Columna eruptiva de 5 km de altura.	Ceniza alcanza poblados de Tianguistengo y Atlisco. Incendió de algunos pastizales.	/	/	Nieto-Torres, 2015; Espinosa-Pereña, 2012.

Tabla 1.1) Continuación.

Popocatepetl, abril de 1998	Caída de balísticos y ceniza.	de Columna de ceniza alcanza 5 km de altura.	Incendio de pastizales de la zona alta. Ceniza alcanza Xochimilco, Iztapalapa, Juchitepec y Tlalmanalco.	/	/	Nieto-Torres, 2015; Bitrán, 2001.
Popocatepetl, agosto - diciembre 1998	Caída de ceniza.	de Columna alcanza 6 km de altura. Tremor armónico durante 7 horas.	Cenizas alcanzan Juchitepec, Tlalmanalco, Xochimilco e Iztapalapa.	/	/	Nieto-Torres, 2015
Tacaná, septiembre de 1998	Lahar	Producido por tormenta tropical Earl, que en 2 días generó un total de 305 mm de precipitación (el doble del promedio mensual). Emplazado por ríos Xelajú, La Mina y Allende. Área afectada de 3.15 km ² , y un volumen desplazado mínimo de 4.4 x 10 ⁶ m ³ . Alcance máximo en río Xelajú de 17.2 km. Espesor de hasta 1 m. Flujo arrastró clastos de hasta 54 cm de diámetro.	Daños en más de 400 km de la Carretera Panamericana. Grandes daños en ciudad de Motozintla, incluyendo destrucción total de 628 casas. Evacuación de 7,000 personas, en 4 días.	214 (307 posibles)	/	Caballero et al. 2006
Volcán de Colima, octubre-noviembre de 1998	Flujos de lava, caída de balísticos y de ceniza.	de Crecimiento de domo en el la cima del volcán. Deformación del edificio volcánico en el sector noreste.	Evacuación del 18 de noviembre al 15 de diciembre (29 días) de poblado La Yerbabuena y de La Becerra, el primero a 8 km del volcán y el segundo a 12 km.	/	/	Bitrán, 2001
Volcán de Colima, febrero de 1999	Flujos de piroclásticos, caída de balísticos y de cenizas.	de Se presentan 3 explosiones de tipo vulcanianas que causan la destrucción del domo.	Evacuación poblados La Yerbabuena, Juan Barragán y Cofradía de Tonila, durante 17 días.	/	/	Gavilanes-Ruiz et al., 2009; Bitrán, 2001.

Tabla 1.1) Continuación.

Volcán de Colima, mayo a julio de 1999	Emisión de gases, ceniza y lahar.	Columna de 2.2 km de altura. Flujos piroclásticos rellenan barranca Montegrande y San Antonio. En la barranca Montegrande, a mediados de julio, se genera un lahar que moviliza el material recién depositado.	Evacuación de poblados La Yerbabuena y Juan Barragán (100 personas), por 32 días. Lahar destruye torre eléctrica.	/	/	Gavilanes-Ruiz et al., 2009; Dávila et al., 2007; Bitrán, 2001.
Popocatepetl, mayo de 2000	Lahar.	Altura de 70 cm, 4 m de ancho y velocidad de 25 km/h	El lahar llega a proximidades del pueblo de Santiago Xalizintla en Puebla; sin embargo no presenta daños.	/	/	Bitrán, 2001
Volcán de Colima, junio de 2000	Lahar.	Lahar emplazado por barranca La Lumbre, El Zarco y Montegrande. En promedio presenta 1 m de espesor, 6 m de ancho y volumen de al menos 3,150,000 m ³ .	Destrucción de 2 casas en La Becerrera. Daños en puente La Becerrera-San José del Carmen y destruye una torre de alta tensión eléctrica.	/	/	Dávila et al. 2007; Gavilanes-Ruiz, 2004.
Popocatepetl, septiembre - octubre de 2000	Emisión de ceniza y flujos de lava.	Columnas de hasta 6 km de altura. Crecimiento de domo en el cráter.	Ceniza alcanza sur de la CDMX.	/	/	Nieto-Torres, 2015; Espinosa-Pereña, 2012.
Popocatepetl, diciembre de 2000	Flujo de lava y caída de balísticos y de ceniza.	Balísticos con 5 km de alcance. Emisión de ceniza por 90 minutos continuos alcanzan entre 5-6 km de altura. Crece el domo de lava en el interior del cráter, más grande en periodo actual de actividad del Popocatepetl. Volumen de lava calculado en el domo entre 15 y 19 x 10 ⁶ m ³ . Ceniza alcanza ciudad de Cuautla. Se presentan hasta 200 exhalaciones por día. Tremor armónico durante 10 horas continuas y un total de 25 horas acumuladas.	Se evacuaron, durante 10 días, 26 comunidades sumando un total de 41,000 personas, incluyendo Santiago Xalizintla, San Pedro Benito Juárez, Puebla, y más poblados en un radio de 13 km del volcán.	/	15.8	Nieto-Torres, 2015; Espinosa-Pereña, 2012; Bitrán et al., 2001.

Tabla 1.1) Continuación.

Popocatepetl, enero de 2001	Caída de balísticos y cenizas, flujos piroclásticos y lahares.	Los flujos piroclásticos descendieron por cañadas del volcán hasta 4-6 km del cráter. Columna de cenizas alcanza los 13 km de altura sobre el nivel del cráter. Los lahares, generados por derretimiento del glaciar, alcanzaron distancias de hasta 15 km llevando bloques de hasta 50 cm de diámetro, en un ancho del flujo de 7 m. Durante la emisión de gases se expulsó principalmente agua, que alcanzó 1 km de altura.	Caída de ceniza en el pueblo Santiago Xalizintla, alcanza Ciudad Serdán, a 125 km del volcán, y algunos municipios de Veracruz; mientras que los lahares quedan a 1 km de Santiago Xalizintla.	/	/	Nieto-Torres, 2015; Bitrán et al., 2001.
Volcán de Colima, junio de 2001	Lahar.	Lluvias intensas genera lahar de tipo flujo de escombros.	Casas destruidas en La Becerra y Colima.	3	/	Saucedo et al., 2008.
Volcán de Colima, febrero de 2002	Caída de balísticos y emisión de ceniza.	Se expulsa principalmente vapor de agua.	Evacuación de 216 personas. No presenta daños.	/	/	Bitrán et al., 2003.
Volcán de Colima, abril a mayo de 2002	Sismicidad	Sismicidad volcánica, tremor armónico de gran amplitud, por periodos de hasta 100 horas (4 días).	Evacuación de poblado La Yerbabuena (50 personas), durante 18 días.	/	/	Gavilanes-Ruiz et al., 2009

Tabla 1.1) Continuación.

Pico de Orizaba, junio de 2003	Lahar.	Flujos de baja concentración con altura máxima de 2.5 m y espesor promedio de 80 cm. Se estima un volumen mínimo de sedimentos de $4 \times 10^6 \text{ m}^3$. Inundación provocada en poblados al frente de río que cambia abruptamente de dirección.	Rompe ducto de hidrocarburos de Pemex que genera una explosión provocando la pérdida de 6 vidas humanas; en poblado Balastlera, donde además hubo decenas de heridos y daño a varias casas. Inundaciones en poblados Nogales y Mendoza, dejan 1 ahogado y 30 desaparecidos. Un área afectada del orden de 5 km^2 .	7 (30 posibles)	10 (Más gastos de PEMEX)	Paulín et al., 2013; Rodríguez et al. 2006; Ávila-Pérez, 2003.
Volcán de Colima, 2003	Lahar.	Lahar emplazado por barranca de Montegrande, que drena sector sur del volcán. Alcanza 12 km de distancia y se estima un volumen de material desplazado, de al menos $2,700,000 \text{ m}^3$.	Abatimiento de estructuras eléctricas cerca de los poblados Tonila y Quesería.	/	/	Macías y Capra, 2005
Volcán de Colima, septiembre a diciembre 2004	Flujo Piroclásitico y de lava.	Emplazamiento y colapso de domo. Lavas en dirección N, NW.	Flujo piroclástico alcanza 6.1 km desde la fuente, hacia el SW.	/	/	Gavilanes-Ruíz et al., 2009; Gavilanes-Ruíz, 2004.
Volcán de Colima, febrero a septiembre 2005	Flujo Piroclásitico	12 explosiones vulcanianas. Destrucción del domo.	Alcanza 5.4 km desde la fuente. Caída de ceniza en la ciudad de Colima. Onda de impacto causa crujir de ventanas en a ciudad de Colima. Evacúan poblado Juan Barragán, durante algunas horas.	/	/	Gavilanes-Ruíz et al., 2009

Tabla 1.1) Continuación.

Popocatepetl, julio de 2005	Caída de ceniza.	de Columna eruptiva de 5 km de altura. Balísticos alcanzan 1 km de distancia.	Ceniza alcanza la Ciudad de México, y se registra su caída también en Ciudad Universitaria. Explosiones generan la destrucción del domo, y posteriormente comienza el emplazamiento de uno nuevo.	/	/	Nieto-Torres, 2015; Espinosa-Pereña, 2012.
Tacaná, octubre de 2005	Lahar	Detonado por grandes precipitaciones por huracán Stan que afectó también a Guatemala y El Salvador. Precipitación en zona montañosa de complejo volcánico Tacaná, de 143 mm. Flujo en etapa erosiva, cuando cruza poblado de Tapachula.	Daños a las ciudades de Motozintla y Tapachula. En Tapachula, a 30 km del Complejo Volcánico Tacaná, deja 100,000 damnificados. Flujo generado por crecimiento del río Coatán, que también provoca inundaciones. Se registró la destrucción de 4 puentes, las vías del ferrocarril y 10 colonias arrasadas por el flujo (2,000 casas desaparecidas). Mayor desastre histórico en Tapachula por inundación.	/	/	Murcia y Macías, 2009.

Tabla 1.1) Continuación.

Pico de Orizaba, 2011	Lahar.	Emplazado en cuenca río Chiquito-Barranca del Muerto, drenan sector suroccidental del volcán. El flujo fue generado en la parte alta y media de la cuenca, donde Pemex no había colocado muros de retención tras evento del 2003. Como consecuencia, muros de retención y gaviones en la cuenca baja, fueron destruidos.	Destruye paredes de retención y Gaviones.	/	/	Paulín et al., 2014; Paulín et al., 2013.
Popocatepetl, abril-mayo de 2012	Emisión de ceniza.	Incremento en actividad sísmica y en tasa de emisión de SO ₂ . Ceniza alcanza el SE de la Ciudad de México. Destrucción y emplazamiento de domo.	Cierre de aeropuerto "Hermanos Serdán" en Puebla.	/	/	Nieto-Torres, et al. 2013.
Popocatepetl, mayo-junio de 2013	Emisión de ceniza.	Columna alcanza 4 km de altura. Balísticos viajan hasta 1.5 km, a 96° C. Decenas de explosiones. Ceniza alcanza varias delegaciones de la Ciudad de México.	En mayo cierra aeropuerto de la ciudad de Puebla por 2 días, y en junio, cuando ceniza cubre CDMX desvían algunos vuelos, provenientes de E.E.U.U.	/	/	CENAPRED, 2013.
Volcán de Colima, julio de 2015	Flujos piroclásticos y emisión de ceniza.	Flujo alcanza 10.5 km de distancia en barranca Montegrande, y 6.5 en barranca San Antonio. Ceniza dirigida hacia el NE. Destruye domo en cráter.	Evacuación de 70 personas.	/	/	Capra et al., 2016
TOTAL				2,254 (840 posibles)	2,866.8	

En la Tabla 1.1, se puede notar que los riesgos volcánicos han causado un gran impacto en la sociedad del país desde 1943; dejando un saldo mínimo de 2,254 fallecidos en este periodo comprendido entre 1943 a 2017, dato que puede ascender a 3094 víctimas considerando las bajas no confirmadas dentro de los registros que se encontraron. Económicamente, los gastos generados por daños de riesgos volcánicos en el mismo periodo, figuran al menos 2,866.8 millones de pesos registrados (Tabla 1.1). Este último dato no toma en cuenta pérdidas secundarias, como perdida de campos de cultivo; daños a cosechas; adquisición, operación y mantenimiento de infraestructura de monitoreo y prevención de desastres; viáticos de científicos y personal de protección civil; inactivación de economía en desalojos; gastos de desalojos; impacto en infraestructura; entre otros. Como se puede apreciar en la Tabla 1.1, existen varios eventos que afectaron económicamente a las localidades aledañas, no obstante, no se tiene el registro de estos daños. Investigando al respecto se buscó el gasto generado por desalojamiento de población aledaña a volcanes con actividad, en la plataforma *Unidad de Transparencia de la Secretaría General de Gobierno*, enfatizando la actividad del Popocatepetl, sin embargo, la respuesta fue: *“Que en virtud de que en los últimos años no ha sido necesario evacuar a ningún poblado por actividad del volcán Popocatepetl... y no se cuenta con costos relacionados...” (2018).*

Con lo anterior, resalta la importancia de estudiar los peligros volcánicos y las zonas más vulnerables a ser afectadas, para así poder tomar medidas preventivas en localidades expuestas a peligros volcánicos.

Los volcanes inactivos y los que se encuentran en estado de reposo dentro del país, representan un gran riesgo para la sociedad; los inactivos por los peligros secundarios; mientras que los que se encuentran en estado de reposo tanto por los peligros secundarios como por una posible reactivación. En la tabla 1.1 se puede ver que en los volcanes inactivos, el Nevado de Colima, 1955; Pico de Orizaba, 2003 y 2011; han dejado un saldo total de 30 fallecimientos, y gastos de al menos 23 millones de pesos. Por lo que se puede deducir que también es importante el estudio de los peligros volcánicos también

en edificios inactivos o en reposo, principalmente en los volcanes de mayores dimensiones.

De igual manera, de los peligros volcánicos que han impactado a México desde 1943 (Tabla 1.1), se puede notar que alrededor del 30% ha sido daño por lahares de distintos volcanes del país. El volcán Popocatépetl por otra parte, es el volcán que más ha impactado a la sociedad, con un 40% de los eventos; por lo que los lahares son los segundos eventos más frecuentes en el país, solo por debajo de la actividad del Popocatépetl.

El volcán La Malinche, alcanza una altura total de 4,461 m snmm, y es el quinto volcán con mayor altura relativa en el país con 1661 m, quedando debajo del Popocatépetl, el Pico de Orizaba, el Volcán de Colima y el Nevado de Colima; con 3,126, 2,900, 2639, y 1690 m respectivamente (Camiz et al, 2017). La Malinche es considerado de los volcanes más peligrosos del país dadas sus grandes dimensiones y la gran cantidad de habitantes en sus alrededores, que suman del orden de 580,370 personas en un radio de 20 km; en este radio existe mayor riesgo, sin embargo las localidades son pequeñas; de considerar un radio de 25 km, se tiene menor riesgo, aunque sigue siendo latente, en este caso, son afectadas las grandes ciudades de Tlaxcala y Puebla; teniendo una población expuesta aproximada de 1,535,000 personas (INEGI, 2017). A pesar del riesgo que el volcán presenta a esta gran población, se han realizado pocos estudios de la historia eruptiva del volcán, y no existe ningún estudio previo de sus peligros asociados.

En esta tesis se analizará específicamente uno de los peligros volcánicos de La Malinche, los lahares; los cuales han alcanzado distancias de hasta 23 km desde los domos centrales.

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es identificar el área que pudiera ser afectada por el peligro volcánico de lahares generados en el volcán en La Malinche.

Los objetivos particulares son:

- Identificar, revisar y delimitar los depósitos secundarios al sur de La Malinche.
- Clasificar el área con mayor posibilidad de afectación por lahares en zonas de alto, medio y bajo peligro.

1.3. Hipótesis

La población que habita en los alrededores de La Malinche ha crecido con el paso de los años y, en su desconocimiento de los peligros volcánicos, se han asentado en zonas de peligro. El peligro volcánico que en la actualidad tiene mayor posibilidad de generarse son los lahares, los cuales tienen un gran poder destructivo y pudieran llegar a arrasar con la infraestructura que se ha desarrollado en las faldas de La Malinche, incluso pudiendo generar pérdida de vidas humanas.

La geología superficial en la ladera sur de La Malinche ha sido mapeada con anterioridad, sin embargo, se espera detallar los depósitos secundarios en el área comprendida entre los 2 abanicos aluviales al sur de La Malinche (Castro-Govea, 2007).

1.4. Peligros Volcánicos

Se define peligro volcánico como el potencial de un evento volcánico o derivados de éste, para dañar a una población o su infraestructura (Tilling, 1993). El peligro se puede relacionar directamente con la vulnerabilidad de una población, por medio de la relación:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad}$$

Donde la vulnerabilidad, es la consecuencia del crecimiento, construcción y asentamiento inadecuado de localidades. Mientras que el riesgo, se define como la probabilidad de perder vidas humanas o de presentar daños en infraestructura dentro de una o más localidades, a causa del peligro en cuestión (Schmincke, 2004).

Los peligros volcánicos se pueden clasificar en 2 grupos según la forma en que impactan a la sociedad.

1.4.1. Peligros Primarios

También conocidos como peligros directos; dado que son producto de daños directos de la actividad volcánica.

La actividad volcánica puede clasificarse en diferentes tipos, esta clasificación conocida a nivel internacional se basa en una gráfica, donde en el eje de las ordenadas se tiene el índice de fragmentación o la explosividad y en el de las abscisas el índice de dispersión o la altura que alcanza la columna eruptiva. Con esto se pueden separar distintos grupos con el tipo de actividad volcánica (Fig. 1.5). Dichos grupos reciben su nombre de acuerdo a una erupción histórica representativa. De modo tal, que puede haber actividad volcánica de tipo Hawaiana, Estromboliana, Subpliniana, Pliniana, Ultraplíniana, Vulcaniana y Sursteyana (Gill, 2010).

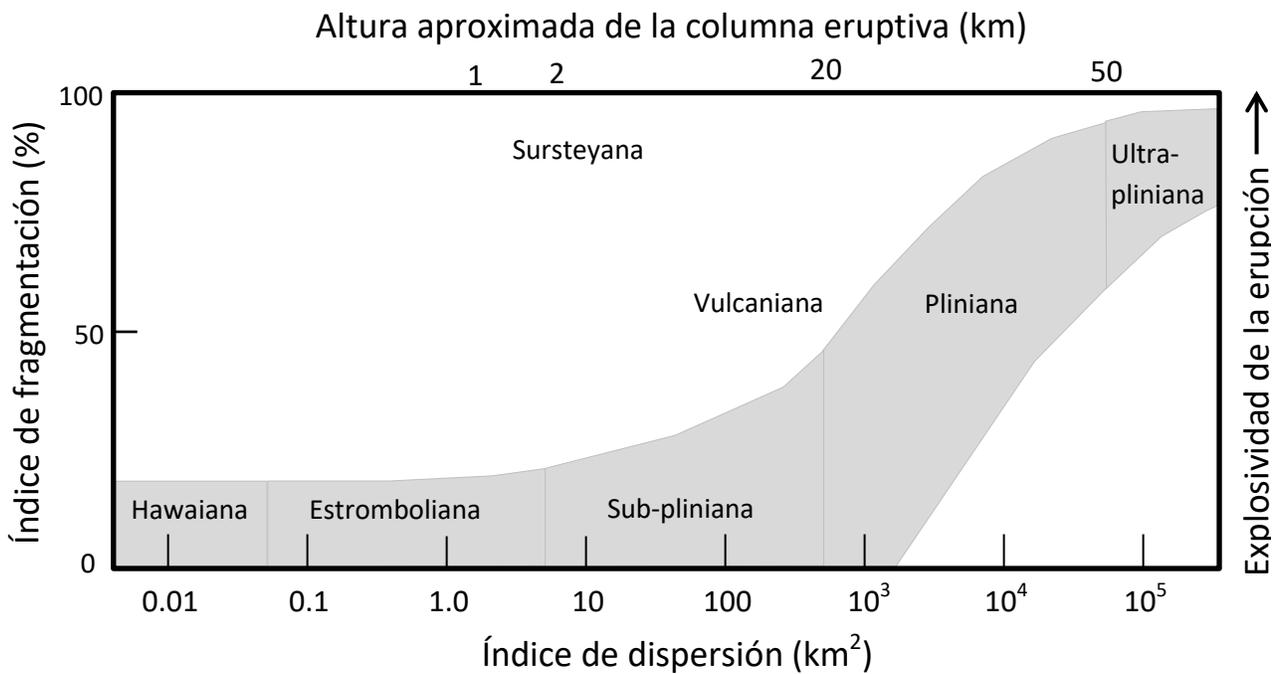


Figura 1.5) Clasificación del tipo de actividad volcánica. Modificado de Gill (2010).

La actividad volcánica puede dividirse en actividad explosiva o actividad efusiva. Únicamente el vulcanismo tipo Hawaiano cae dentro del grupo de actividad efusiva, mientras que los otros tipos son clasificados como actividad explosiva. Dadas las

diferentes características de los diversos tipos de actividad volcánica así como la actividad previa a la emisión de materiales; se pueden tener distintos peligros volcánicos primarios, los cuales se describen brevemente a continuación:

1.4.1.1. Flujos de lava

La lava es el material fundido total o parcialmente, que es expulsado desde el interior de la Tierra a través de fisuras, generando actividad volcánica efusiva que suelen tener temperaturas entre 800-1,200° C (Cas y Wright, 1988). Los flujos de lava presentan movimiento según la pendiente sobre la que se emplacen, las propiedades físicas del fluido y la tasa de emisión, por lo que Cas y Wright (1988) describen 3 tipos de flujos:

- a) Pahoehoe.- Con superficies lisas, suaves y/o acordonadas. Suelen ser depósitos delgados menores a un metro, aunque pueden alcanzar varios metros de espesor. Es la lava más fluida posible.
- b) Aa.- De superficie rugosa y espinosa. Se presentan en flujos más gruesos que las pahoehoe, que pueden tener hasta 30 m de alto. Generalmente tienen en su interior lava masiva.
- c) Lava en Bloques.- Semejantes a los flujos Aa, con la diferencia de que la superficie forma poliedros. Son los menos comunes, y se suelen dar cuando en composiciones más silíceas.

Los flujos de lava pahoehoe, comunes en magmas máficos y se suelen presentarse a distancias cortas del punto de emisión y conforme se alejan, cambian de forma gradual a flujos Aa, mientras que los flujos de lava en bloques, son más comunes en composiciones félsicas o intermedias (Gill, 2010; Cas y Wright, 1988).

Los flujos de lava presentan un gran peligro dado que tienen elevadas temperaturas que pueden dañar o destruir poblados y producir incendios de la vegetación alrededor del flujo (Blong, 1984).

1.4.1.2. Caída de ceniza

Los piroclastos son expulsados durante actividad volcánica explosiva y se pueden clasificar según el tamaño de la partícula (Tabla 1.2). La ceniza, corresponde a la granulometría de menor tamaño, siendo partículas menores a 2 mm, todo piroclasto mayor a este tamaño es conocido como balístico (White y Houghton, 2006).

Tabla 1.2) Clasificación de piroclastos según su tamaño y comparación con equivalente sedimentario. Modificado de White y Houghton (2006).

Tamaño de grano		Nombre del piroclasto/clasto			
Ø (phi)	(mm)	Piroclastos		Clastos (sedimentarios)	
<-6	>64	Bloque/Bomba		Bloque	
-6 a -4	16-64	Lapilli	Grueso	Canto o Guija	
-4 a -2	4-16		Mediano	Guijarro	
-2 a -1	2-4		Fino	Gránulo	
-1 a 0	1-2	Ceniza	Muy gruesa	Arena	Muy gruesa
0 a 1	0.5-1		Gruesa		Gruesa
1 a 2	0.25-0.5		Mediana		Mediana
2 a 3	0.125-0.25		Fina		Fina
3 a 4	0.0625-0.125		Muy fina		Muy fina
>4	<0.0625		Extremadamente fina	Arcilla	

La ceniza adquiere su pequeño tamaño dada la fragmentación del magma cuando se satura de compuestos volátiles, por lo que suele tener formas irregulares y muy angulosas (Gill, 2010). Dada esta granulometría, la ceniza puede viajar por medio de las corrientes de viento varios kilómetros desde su punto de emisión, por lo que la caída de ceniza puede afectar a la sociedad de varias maneras: I) Colapso de techos por adición de peso, II) Daños a la agricultura, III) Bloqueo o daño a máquinas o motores, IV) Dificultades para transporte y V) Complicaciones o enfermedades en vías respiratorias en caso de inhalación (Schmincke, 2004).

1.4.1.3. Caída de balísticos

Los balísticos, corresponden a piroclastos con granulometría superior a 2 mm; en caso de exceder los 64 mm en su diámetro mayor, se les llama Bombas o Bloques; mientras que de ser menores a 64 mm, son Lapilli (Tabla 1.2). Las bombas pueden alcanzar incluso varios metros de largo. Por esta granulometría, al momento de su caída, los balísticos presentan peligro por el impacto que provocan, ya que pueden pesar hasta cientos de kilogramos y caer a velocidades de cientos de metros por segundo, la más rápida registrada se movía a 600 m/s (Blong, 1984). Según la energía de la explosión y el tamaño de la partícula, será el alcance que tengan los balísticos, por lo que de manera general se reduce la distancia de alcance desde el cráter, a algunos cientos de metros para la caída de bloques, mientras que el lapilli puede recorrer hasta varios kilómetros. La mejor manera de estimar el alcance que pudieran tener los balísticos en volcán determinado, es el estudio de la historia eruptiva particular del volcán en cuestión.

1.4.1.4. Flujos piroclásticos

Durante la actividad volcánica explosiva además de los depósitos de caída, se genera una corriente de densidad piroclástica al momento del colapso de la columna eruptiva, ésta desciende por las laderas de los volcanes a velocidades de hasta cientos de metros por segundo y a cientos de grados Celsius, dicha corriente es integrada por 2 procesos, los flujos y las oleadas piroclásticas (Cas y Wright, 1988). Estas corrientes son consideradas los procesos volcánicos con mayor poder destructivo.

Los flujos piroclásticos corresponden a la facies de mayor espesor, depositada de forma masiva con mala selección de los clastos, viajando cercano a la superficie y transportando partículas heterogéneas de pómez, líticos y ceniza; los cuales viajan principalmente por arrastre y saltación (Burgisser y Bergantz, 2002). Estos flujos se emplazan preferencialmente en las barrancas, aunque en las etapas proximales, los flujos se transportan fuera de los cauces con mayor facilidad, dada la gran energía en su transporte (Cas y Wright, 1988; Blong, 1984).

1.4.1.5. Oleada piroclástica

Son depósitos dentro de las corrientes de densidad piroclásticas, caracterizados por producir depósitos estratificados (Cas y Wright, 1988). Dentro de las oleadas piroclásticas se transportan piroclastos finos en suspensión, dentro de un flujo turbulento que deposita capas delgadas de material, dicho flujo turbulento también se da en direcciones laterales (Blong, 1984).

Las oleadas piroclásticas contiene partículas homogéneas, por la turbulencia del flujo aquí se concentra la mayor cantidad de gases de una corriente de densidad (Blong, 1984). Esta corriente viaja alrededor del flujo piroclástico, y aunque de igual manera se emplazan preferencialmente en los bajos topográficos, por su menor densidad las oleadas piroclásticas presentan mayor alcance, depositándose también fuera de los cauces, por lo mismo, el viento al momento de la erupción es un factor que afecta el depósito de las oleadas piroclásticas fuera de las barrancas (Burgisser y Bergantz, 2002; Cas y Wright, 1988).

1.4.1.6. Emisión de gases

Conforme el magma asciende a la superficie de la Tierra, presenta cambios en las condiciones de presión y temperatura, lo que en superficie pudiera generar deformación del suelo o sismos. Mientras que estos cambios de las condiciones termobarométricas del magma producen que la presión de los gases disueltos en el magma superen la presión del entorno y así se exsuelvan. Estos gases volátiles, al ser más ligeros, tienden a subir antes que el magma por la corteza, pudiendo alcanzar la superficie incluso sin actividad volcánica. A éste fenómeno se le llama emisión de gases. Los principales gases que son expulsados por actividad magmática son: H₂O, CO₂, CO, SO₂ y H₂S. De éstos, el H₂O y el CO₂ son los que se encuentran en mayor abundancia, sumando más del 90% de todos los gases liberados del magma (Gill, 2010; Keller, 2005).

El caso más catastrófico que ha sufrido la humanidad por la emisión de gases, se dio en el lago Nyos en la Región noroeste de Camerún , donde un volumen del orden de 1.2 km³ de

CO₂ fue expulsado del lago, formado en un Maar, durante la noche del 21 de agosto de 1986. Se estima que murieron aproximadamente 1,700 personas y 3,000 cabezas de ganado, puesto que al ser el CO₂ más pesado que el aire, viajó alcanzando hasta 10 km del lago y abarcando un área de 18 km² (Fay, 1988).

1.4.1.7. Sismos

Dado el movimiento y evolución del magma en el subsuelo, en superficie se generan sismos de origen volcánico, los cuales ayudan a monitorear la actividad volcánica dado que se ha estudiado que previo a una erupción volcánica se suele incrementar la actividad sísmica en el volcán y a distancias de hasta a 10 km del mismo (Schmincke, 2004). Estos sismos, en general, son de menor magnitud que los sismos tectónicos, sin embargo pueden llegar a ser de grandes dimensiones y así, poder confundirse con los sismos tectónicos. Un ejemplo de esto se puede observar en la tabla 1.1, donde en el año de 1986 el volcán Tacaná tuvo actividad sísmica intensa, la cual causó daños a estructuras tanto en Guatemala como en México.

1.4.1.8. Ondas de Impacto

La actividad volcánica explosiva genera un rápido movimiento de materiales, el cual genera ondas de choque. Su energía disminuye conforme aumenta la distancia, y pueden dañar estructuras distantes. Un ejemplo del alcance que puede tener este peligro, se dio en el volcán Tambora, Indonesia; en 1815 donde tras una explosión se rompieron vidrios y ventanas a 400km (Tilling, 1993).

1.4.1.9. Deformación del suelo

El movimiento y evolución del magma dentro del edificio volcánico, puede generar cambios en las condiciones de presión del volcán, de modo tal que en superficie se puede evidenciar como deformación del suelo (Tilling, 1993). La deformación del suelo, es uno de los métodos por los cuales los científicos pueden monitorear los volcanes activos, ya que indica la adición de magma al edificio. Un caso importante, fue el del Monte Santa Helena; ya que antes de la avalancha que generó la explosión en el año de 1980, se fue

deformando de manera gradual suelo en el flanco norte del volcán, donde se observó un abultamiento con desplazamiento en algunos puntos de hasta 18 m; esta deformación cambió las condiciones estables del volcán produciendo una gran avalancha la cual a su vez despresurizó el sistema generando la explosión lateral del volcán (Schmincke, 2004).

1.4.1.10. Jökulhlaups

Los Jökulhlaups son peligros volcánicos restringidos a zonas glaciares, donde los volcanes tienen una gran cubierta de hielo y nieve. Se producen cuando un volcán expulsa material caliente; ya sean lavas, piroclastos o por actividad hidrotermal; causando la fusión de grandes cantidades del hielo sobre el volcán, sin llegar a romper el glaciar y generando así flujos de lodo y grandes inundaciones (Imsland, 1989).

1.4.2. Peligros secundarios

También conocidos como peligros indirectos. Son resultado de efectos de los peligros primarios. Los peligros volcánicos secundarios son:

1.4.2.1. Lahares

Los lahares son una mezcla fluida formada por fragmentos de roca, escombros y agua, que desciende por las laderas de un volcán, impulsados por la gravedad. Éstos suelen introducirse en las barrancas preexistentes en el volcán y alcanzar espesores de decenas de metros. Se producen principalmente por la saturación en agua, dado que el material incrementa su peso y el material disminuye la resistencia interna por presentar agua dentro de los poros (Cas y Wright, 1988).

Según su origen, los lahares pueden ser de tipo primarios o secundarios. Los lahares primarios se producen simultáneamente a una erupción del mismo volcán, mientras que los secundarios se generan después de haber terminado la actividad eruptiva.

Pérez-Pérez (2011) resume que se pueden encontrar 4 tipos de depósitos de flujos dentro de un volcán y muestra las características de estos flujos y sus depósitos, Tabla 1.3.

Tabla 1.3) Características de los tipos de depósitos de flujo. Tomado de Pérez-Pérez (2011).

	Flujo Piroclástico de Bloques y Ceniza	Avalancha de escombros	Lahares		Corriente fluvial
			Flujo de Escombros	Flujo Hiperconcentrado	
Concentración de sólidos			>80% en peso y >60<90% vol	40-80% en peso y 20-60% vol	<40% en peso y < 20% vol
Régimen de Flujo	No turbulento	No turbulento	Laminar	Transición de laminar a turbulento	Turbulento
Sistema de transporte de sólidos	Masivos gradación inversa	Fricción y colisión	Fricción y tracción	Fricción y saltación	Colisión, tracción, saltación y suspensión
Características del depósito	Monolitológico	Heterolitológico con estructuras en rompecabezas	Monolitológicos a heterolitológicos	Heterolitológico	Heterolitológico
Matriz	Arena	Arena-limo-arcilla	Arena - arcilla	Arena gruesa a media	Arenosos
Clastos	Grava de gruesas a finas	Abundantes bloques y megabloques de centímetros a metros de diámetro	>50% grava	<50% grava	Sedimentos finos y cantos rodados en menores cantidades
Forma de los clastos	De angulosos a Subredondeados	Angulosos y subangulosos. Estructuras en rompecabezas	Angulosos, subangulosos y subredondeados	Subredondeados y redondeados	Redondeados
Estratificación	Burda alineación de clastos y pómez	Sin estratificación	Sin estratificación	Estratificación plana	Estratificación cruzada y laminación
Granulometría	Bimodal	Polimodal	Bimodal	Unimodal	Unimodal
Clasificación de los clastos	Mala clasificación	Mala clasificación	Mala clasificación a extremadamente mala clasificación	Buena clasificación	Buena clasificación
Origen	Colapso de columna eruptiva o destrucción de domo	Colapso de sector del edificio volcánico (Avalancha de escombros)	Saturación de depósitos volcánicos por lluvias intensas, derretimiento de glaciares y desbordamiento de lagos cráter	Transformación o dilución de flujos de escombros	Corriente de río
Subdivisión		Facies de matriz y/o bloques	Cohesivos, contenido de arcilla > 3-5%	No cohesivos, contenido de arcilla < 3%	

% vol: porcentaje en volumen.

Dentro de la Tabla 1.3, se puede observar la clasificación de los lahares como flujos de escombros o flujos hiperconcentrados, según la concentración de sólidos y el tamaño de las partículas. A la vez los flujos de escombros pueden subdividirse en cohesivos y no cohesivos, estos últimos con un porcentaje de arcilla menor al 3%

Los lahares son considerados los segundos eventos asociados a volcanes más peligrosos, sólo debajo de los flujos piroclásticos; ya que pueden tener un alcance de hasta cientos de kilómetros y pueden alcanzar velocidades de hasta 100 km/h (Tarbuck y Lutgens, 2013; Schmincke, 2004). Son fenómenos altamente destructivos y peligrosos, como se pudo observar el 13 de noviembre de 1985 en el volcán Nevado de Ruíz, Colombia; donde la actividad volcánica produjo el derretimiento de la nieve y hielo acumulado en la cima del volcán, con lo que se desencadenaron lahares que sepultaron la ciudad de Armero a casi 50 km de la cima del volcán, este evento se considera el peor desastre por flujos de escombros en la historia ya que sepultó alrededor de 20,000 personas y dejó del orden de 5,000 heridos, además de que causó daños a la infraestructura calculados arriba de un billón de dólares (Voight, 1990).

1.4.2.2. Avalanchas

Tanto los lahares como las avalanchas presentan una primera etapa erosiva en las partes altas, y una etapa de depósito en las zonas de menor energía potencial. Es en estas zonas donde las localidades asentadas se enfrentan a un mayor grado de vulnerabilidad (Schilling, 2014). Las avalanchas, al igual que los lahares son impulsados por la fuerza de gravedad, sin embargo, se necesita de algún agente externo que detone su comienzo. Existen 4 posibles detonantes para el comienzo de un lahar o una avalancha; saturación en agua del material, exceso de inclinación de las pendientes, eliminación de la vegetación fija o los sismos (Tarbuck y Lutgens, 2013).

Las avalanchas son el colapso de un sector del edificio volcánico, donde se desplaza un gran volumen de masa en poco tiempo (Blong, 1984).

Las avalanchas pueden tener un gran poder destructivo, en México el volcán de Colima tuvo una avalancha hace 2,500 años. Esta avalancha viajó más de 120 km sepultando el terreno donde hoy se encuentra la ciudad de Colima; de repetirse un evento similar, los resultados serían catastróficos (Gavilanes-Ruíz et al. 2009). Otro ejemplo es el desastre en el Monte Santa Helena en 1980, donde la deformación de la ladera norte del volcán produjo una gran avalancha en dicho sector, facilitando la salida de material magmático generando la explosión lateral dirigida de este volcán (Schmincke, 2004).

1.4.2.3. Tsunamis

Es una ola o tren de olas de agua que pueden alcanzar hasta decenas de metros de altura, generando un gran poder destructivo en poblados impactados (Blong, 1984).

De acuerdo a Blong (1984), existen 8 casos en los que actividad volcánica puede generar un tsunami, a continuación se mencionan y se da el porcentaje en relación a los tsunamis de origen volcánico, así como un ejemplo: I) Por el impacto de flujos u oleadas piroclásticas en agua, 27%, volcán Taal, Filipinas, 1911 y 1965; II) Sismos volcánicos, 22%, volcán Sakura-jima, Japón, 1914; III) Explosiones submarinas, 19%, caldera Rabaul, Papua Nueva Guinea, 1937; IV) Avalanchas, 13%, volcán Unzen, Japón, 1792; V) Colapso de calderas, 9%, caldera de la Isla Ritter, Papua Nueva Guinea, 1888; VI) Lahares que corren a un cuerpo de agua, 4.5%, volcán Monte Pelée, Martinica, 1902; VII) Por ondas de impacto, 4.5%, volcán Bezzymianny, Rusia, 1956 y; VIII) Caída de grandes volúmenes de lava, 1%, Volcán Matavanu, Samoa, 1906.

1.4.2.4. Inundaciones

El emplazamiento de material de origen volcánico en la superficie de la Tierra, altera el equilibrio natural de la hidrografía en las cercanías del volcán alcanzado tras la última actividad que haya presentado (Tilling, 1989). Por ello, pueden generarse inundaciones, ya sea:

I) por el desvío del flujo en un canal preexistente, como en el caso del desastre en Tapachula en el año 2005, cuando lahares generados en el complejo volcánico de Tacaná,

culminaron en una inundación en la ciudad y el mayor desastre en su historia (Murcia y Macías, 2009); o

II) Movimiento de un gran cuerpo de agua, como en el volcán Eyjafjallajökull, Islandia, en 2010, donde la actividad volcánica junto con intensas lluvias, produjo grandes inundaciones (Galas, 2016).

1.4.2.5. Contaminación de manantiales y aguas subterráneas

Al ascender el magma hacia la superficie algunos de los gases de la mezcla suelen perder miscibilidad con el magma separándose de él, el gas puede viajar de manera más sencilla, por lo que suele ser expulsado hacia la superficie o en muchos casos, hacia los cuerpos de agua subterránea, el agua disuelve estos gases y es contaminada (Tilling, 1989). Una de las formas de monitorear un volcán es el monitoreo de los manantiales, ya que el agua se suele contaminar con azufre o CO₂, principalmente, asociado al ascenso del magma.

1.4.2.6. Geotermalismo

La presencia de magma en el subsuelo altera el gradiente geotérmico, elevando la temperatura del agua, tanto superficial como subterránea, pudiendo llegar a generar vapor que en superficie sea expulsado como un géiser. Este geotermalismo muchas veces es aprovechado por el hombre para producir energía geotérmica; sin embargo puede ser un peligro por las altas cantidades de presión y temperatura que pudieran presentarse y variar gradualmente (Tarbuck y Lutgens, 2013).

1.4.2.7. Incendios forestales

Tanto los flujos piroclásticos como los de lava, se encuentran a elevadas temperaturas, que pueden alcanzar hasta los 1,000° C, por lo que al entrar en contacto con la vegetación cercana al punto de emisión pudiera dar comienzo a la quema de ésta. Dado que la atención a la actividad volcánica se centra en evitar el daño a las poblaciones cercanas, suele dejarse de lado los frentes que avanzan por zonas inhabitadas y con libre crecimiento en vegetación, por lo que se puede iniciar un incendio, y si las condiciones lo

permiten avanzar decenas de hectáreas, pues no se puede parar en las etapas connotas del incendio.

1.4.2.8. Efectos atmosféricos y lluvia ácida

La emisión de gases por la actividad volcánica, puede afectar los ecosistemas que se encuentren en zonas cercanas al punto de emisión, acabando tanto plantas como con animales. Entre los principales gases expulsados durante la actividad volcánica, encontramos el CO₂, el cual se concentra en la atmósfera en un pequeño espacio, produciendo una serie de reacciones al entrar en contacto con el agua, para producir así ácido carbónico generando lluvia ácida (Blong, 1984). Otro de los gases importantes durante la actividad volcánica es el dióxido de azufre, el cual en grandes cantidades puede reaccionar en la atmósfera produciendo ácido sulfúrico que impide el paso de radiación solar pudiendo así afectar la temperatura en una zona o incluso a nivel mundial, como en el caso de la erupción de 1982, del volcán Chichón, donde el ácido sulfúrico contribuyó a una disminución de la temperatura promedio mundial de 0.5° C (Tabla 1.1).

2. Historia Geológica

La geología regional y la historia eruptiva de La Malinche no tiene numerosos estudios como en el caso de otros estratovolcanes de México. Los primeros estudios de depósitos en La Malinche fueron hechos por Weyl (1974), quien identificó la composición de las rocas del volcán. Posteriormente Heine (1988) definió los principales eventos eruptivos del volcán y analizó depósitos glaciares en de distintos volcanes en esta zona de del CVTM. Fue Castro-Govea (1999) quien clasificó los depósitos de las diferentes erupciones de La Malinche por primera vez, identificando 14 principales erupciones, divididas en 4 etapas diferentes. Finalmente el mismo autor detalló un poco más esta clasificación en su trabajo de tesis doctoral (Castro-Govea 2007). A continuación se describe la geología de la zona con base en este último trabajo y, se complementa la descripción con algunos estudios más recientes del volcán así como trabajo de campo, realizado para esta tesis.

2.1. Geología Regional

La Malinche se encuentra en la zona oriental del CVTM (Figura. 1.1), provincia fisiográfica de México en la cual se concentra la mayor cantidad de actividad volcánica del país. Esta provincia es un arco volcánico originado por la subducción de la Placa de Cocos por debajo la Placa Norteamericana. El CVTM fue tiene su principal evolución durante el Mioceno medio y tardío, hace poco más de 15 Ma; sin embargo desde entonces ha continuado su actividad volcánica hasta la actualidad (Ferrari, 2000; Demant, 1978). A diferencia de la mayoría de arcos volcánicos formados en el Cinturón de Fuego del Pacífico, el CVTM no se encuentra alineado paralelamente a la trinchera, sino que se orienta oblicuamente a 16° en sentido anti horario, la razón de dicho cambio de orientación aún es tema de controversia (Gómez-Tuena et al., 2005; Ferrari, 2000). Dado que el CVTM es de tan reciente edad, sus depósitos se encuentran sobrepuestos a las formaciones más antiguas del país.

En la Figura 2.1, se muestran los rasgos morfológicos distintivos en la zona, los cuales servirán como referencia a las descripciones que se realizarán más adelante.

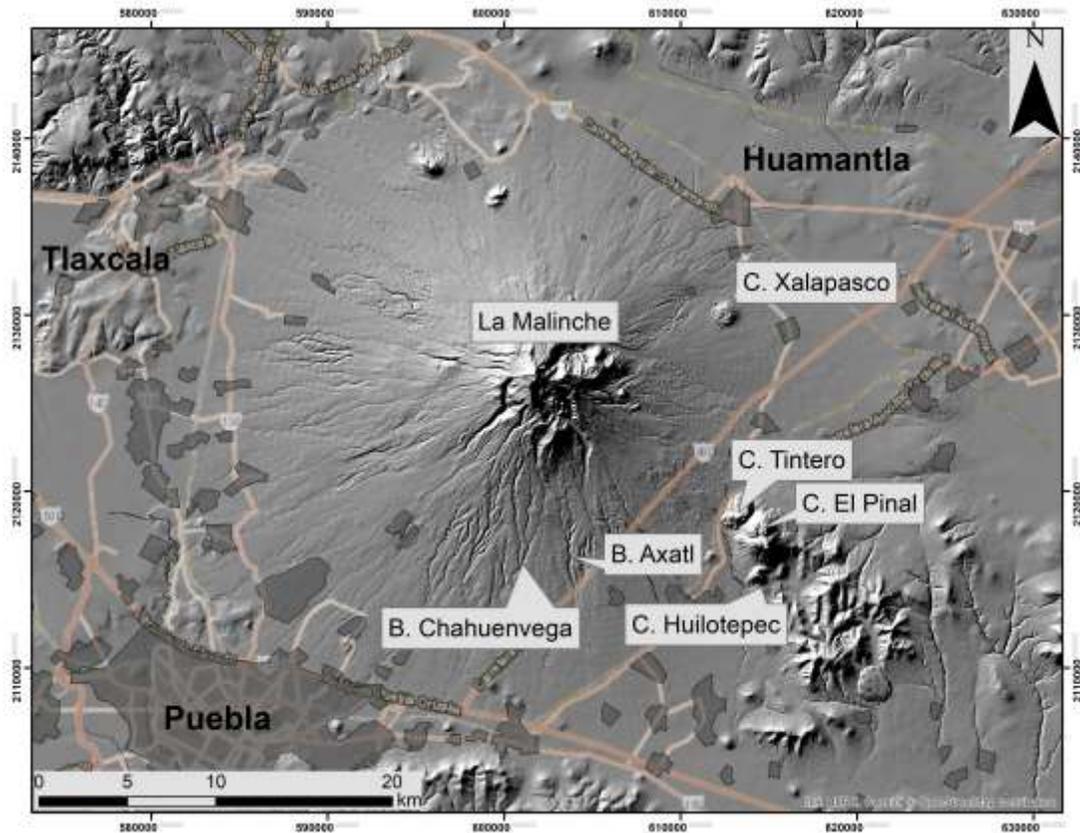


Figura 2.1) Principales estructuras morfológicas en los alrededores de La Malinche.

La Malinche, con su última actividad hace 3.1 ka, permite el afloramiento de pocas formaciones de edades más antiguas, sin embargo, de estos afloramientos Castro-Govea (2007) describe la siguiente estratigrafía de la zona.

2.1.1. Rocas del Cretácico

Carbonatos

Castro-Govea (2007) describe que los carbonatos son las rocas más antiguas de la zona y están representadas por 2 formaciones diferentes:

La Formación Orizaba del Cretácico Medio, que aflora al SE Cerro Pinal ubicado al ESE de La Malinche. Donde se tienen calizas de arrecife con potencial para producir hidrocarburos por su gran cantidad de foraminíferos; la formación tiene espesores que varían entre los 600 m y hasta 1.5 km (González-Alvarado 1976).

La Formación Maltrata del Cretácico Superior, que aflora al S del volcán, la cual tiene un espesor que varía entre 50 y 70 m, y que presenta mayor cantidad de arcilla (González-Alvarado 1976).

Ambas son secuencias plegadas de calizas estratificadas con intercalación de capas delgadas de rocas clásticas, principalmente areniscas y limolitas y, se les considera el basamento del volcán, pues se han encontrado xenolitos con clastos de caliza y nódulos de pedernal en el Cerro Xalapasco, y también existe una Brecha de explosión al pie de los cerros Tintero, Pinal y Huilotepec; con clastos de andesita y caliza, dicha brecha es interpretada como evidencia del inicio de la actividad volcánica de estos cerros (Castro-Govea, 2007).

2.1.2. Depósitos del Paleógeno y del Neógeno

Dentro de estos periodos se tiene mayor variedad de litologías, dado que en estas edades es cuando comienza la actividad volcánica y evoluciona en gran proporción.

Secuencias: Tlaxcala y Benito Juárez

Son secuencias lacustres Tlaxcala y Benito Juárez, son horizontes de arenas y limos finamente estratificados con silicificación y, con capas de cenizas piroclásticas. Otro rasgo importante es que dichas secuencias no presentan deformación dúctil, pero se encuentran falladas con estructuras orientadas al E-W. NW-SE y NE-SW (Castro-Govea, 2007). La secuencia Benito Juárez del Mioceno Tardío, se encuentra limitada en su cima por una capa delgada de depósitos fluviales; aflora predominantemente al NE de La Malinche, y se encuentra por debajo del Grupo Terrenate, la Andesita El Crestón y depósitos coluviales y piroclásticos más recientes (Castro-Govea, 2007; Gómez-Tuena y Carrasco-Núñez, 2000). Mientras que la secuencia Tlaxcala además de tener horizontes de ceniza, se intercala con horizontes de pómez de caída, la secuencia aflora al NW y W del volcán, presenta diques a los que se les atribuye la silicificación (Castro-Govea, 2007). De esta secuencia no se ha obtenido ningún fechamiento, sin embargo, lo más probable es que sea una secuencia contemporánea a la Benito Juárez (Castro-Govea, 2007).

Grupo Terrenate

El Grupo Terrenate se encuentra sobreyaciendo a la Secuencia Lacustre Benito Juárez. Está integrado por flujos de lava en los que se pueden observar lavas estratificadas, autobrechas de lava y depósitos de colapso, ya sea del frente de un flujo o de un domo. El grupo aflora principalmente al NNE del volcán y presenta textura porfirítica, con composición andesítica y basalto-andesítica (Carrasco-Núñez et al., 1997).

Andesita El Crestón

La Andesita El Crestón, sobreyacida también a las secuencias lacustres, consiste en flujos y domos de lava con textura porfirítica, emplazados al NE del volcán y alineados con una orientación NW-SE. También se observan colapsos de frente de lava y autobrechas (Castro-Govea, 2007). La composición de estos flujos varía desde andesita a dacita, incluyendo contenido de anfíbol. Los depósitos fueron fechados por análisis de roca total con K-Ar, obteniendo edad de 9.7 ± 0.5 Ma, perteneciendo también al Mioceno tardío (Carrasco-Núñez et al., 1997).

Depósitos piroclásticos no diferenciados del neógeno

Al N y NW de la Ciudad de Tlaxcala se encuentran algunos depósitos de flujos piroclásticos limo-arenosos no consolidados del Neógeno Superior sobreyaciendo la Secuencia Lacustre de Tlaxcala, sin embargo, debajo de conos volcánicos de edad Cuaternaria (Castro-Govea, 2007).

2.1.3. Rocas y depósitos del Cuaternario

Volcanes monogenéticos

En este periodo se formaron la mayoría de conos de escoria y domos de lava de la zona, teniendo todos una composición que va de basáltica a andesítica. Se tienen un par de fechamientos por análisis de roca total con K-Ar, el primero de una lava del Cerro Quimicho con edad obtenida de 0.49 ± 0.07 Ma antes del presente y; el segundo de un cono basáltico al norte del volcán con edad de hace 1.5 ± 0.07 Ma (Carrasco-Núñez et al.,

1997). Es apreciable que algunos de los volcanes monogenéticos tienen morfología más erosionada que el Cerro Quimicho, por lo que Castro-Govea (2007) menciona la posibilidad de que algunos de los conos sean del periodo Neógeno o Paleógeno; de igual manera, otros conos como el Cerro Tintero, Pinal y Huilotepec, se encuentran menos erosionados, delatando una edad de formación más reciente, idea que se respalda con que los depósitos de estos volcanes se encuentran sobreyaciendo a depósitos de La Malinche.

Secuencia San Fermín

La Secuencia San Fermín del Pleistoceno, aflora al E y ESE del volcán, y consiste en más de 80 m de depósitos limoarenosos de tipo fluviales, flujos de lodo y piroclásticos, dentro de la secuencia se pueden encontrar un par de capas de pómez de caída y además se pueden observar fallas con orientación E-W (Castro-Govea, 2007).

Piroclastos no diferenciados del Pleistoceno

Dentro del Pleistoceno, también podemos encontrar depósitos piroclásticos, no diferenciados, sobreyaciendo a las rocas del Mioceno al NE del volcán. Estos depósitos presentan intercalaciones de con las pómez de caída de La Malinche; Huamantla y Baquedano e incluyen depósitos coluviales (Castro-Govea, 2007).

Depósitos secundarios

Desde el comienzo de la formación del volcán La Malinche y hasta la actualidad, se encuentran en desarrollo depósitos sedimentarios, tanto en el volcán como en sus alrededores; estos depósitos se describen a continuación:

Abanicos aluviales Malinche

Castro-Govea (2007), describe la existencia de 4 abanicos aluviales importantes en La Malinche, al W, al E al SSE y al SW; todos comenzaron su formación en el Pleistoceno tardío. Los abanicos al E, SSE y SW, se desarrollan por cárcavas, en forma de herradura cercanas a la cima del volcán, generadas en la zona externa de los domos centrales de La

Malinche, donde se encuentran en contacto con los depósitos piroclásticos y de caída. Por otra parte, la barranca del abanico W se forma al término de los depósitos volcánicos más distales en este sector, que corresponden a depósitos del Periodo I. Los 4 abanicos, presentan intercalación de depósitos de lahar con sedimentos fluviales.

Aluvión

En la cima de la columna se tienen depósitos fluviales con granulometría que varía desde limo y arcillas, hasta gravas. Estos depósitos se encuentran cubriendo los bajos topográficos en toda la zona de estudio, y se han depositado durante el Pleistoceno tardío y hasta la fecha.

2.2. Historia Eruptiva de La Malinche

Algunas de las erupciones de La Malinche, junto con otros depósitos de la zona, fueron descritas y ordenadas estratigráficamente por Heine (1988); sin embargo, fue Castro-Govea (1999) quién se dedicó a describir con mayor detalle los depósitos de las distintas erupciones del volcán, clasificando 14 erupciones distintas. Posteriormente Castro-Govea (2007) continuó su primer trabajo y propuso una clasificación para la historia eruptiva de La Malinche, con 2 grandes etapas, la etapa Pre-Malinche y la Etapa Malinche; ésta última a su vez la subdivide en 3 periodos más, Periodo I, Periodo II y Periodo III (Fig. 2.2).

Los depósitos del volcán no se encuentran consolidados, sin embargo se realiza la división de la historia de La Malinche con base en extensos horizontes de pómez, los cuales funcionan como horizonte índice.

En general, La Malinche presenta depósitos de flujos piroclásticos de bloques, ceniza y pómez con los horizontes índice de pómez de caída, todo intercalado en determinadas zonas con depósitos de Lahar y fluviales que alcanzan potencia de varios metros.

Se conservó lo propuesto por Castro-Govea (2007), por ser un trabajo muy completo y el más reciente en la clasificación de los depósitos de la historia eruptiva de La Malinche.

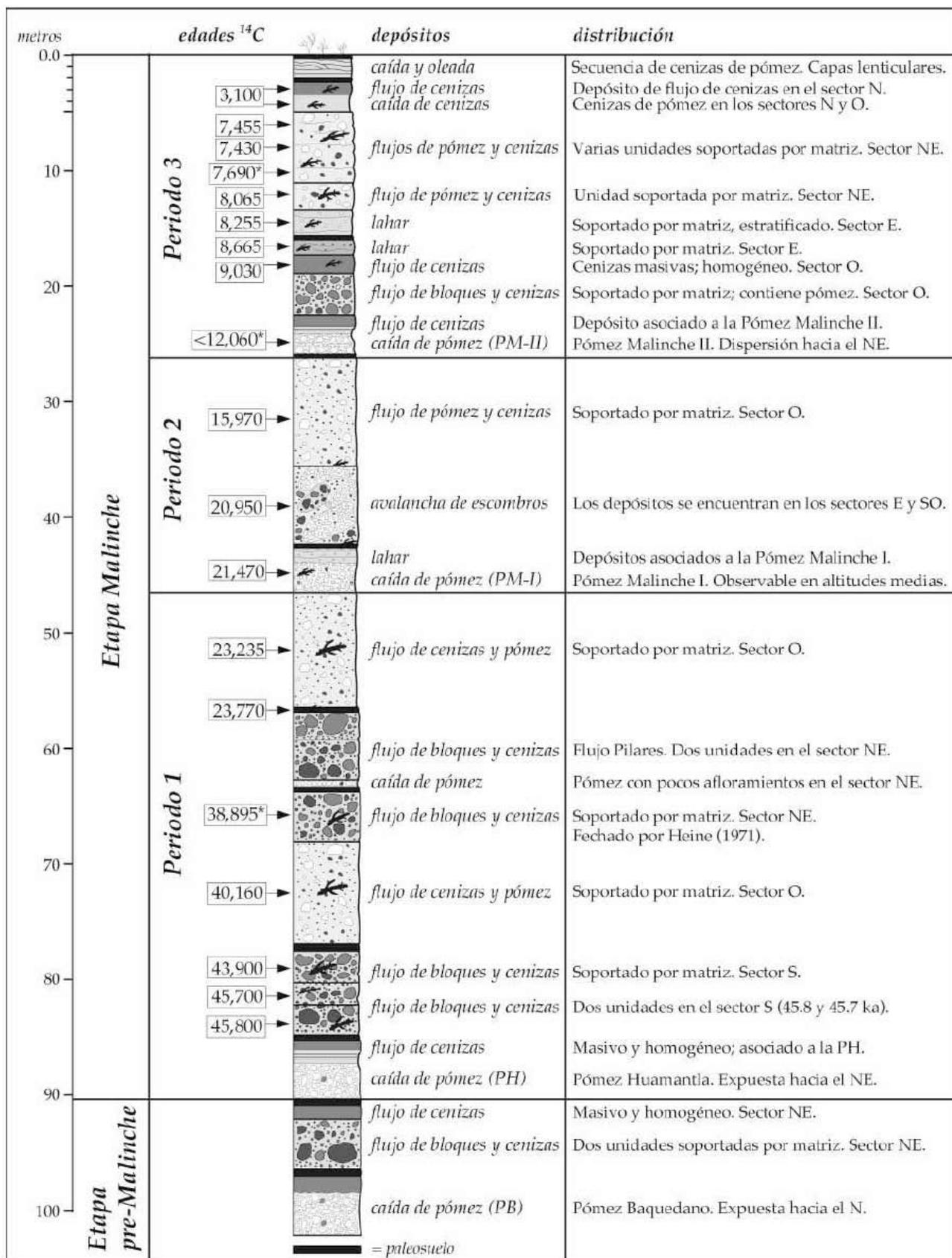


Figura 2.2) Columna estratigráfica del volcán La Malinche. Tomado de Castro-Govea (2007).

2.2.1. Etapa Pre-Malinche

La etapa Pre-Malinche, representa el afloramiento más antiguo del volcán. Aflora predominantemente al NE de La Malinche aunque también se le identifica al S del volcán, en la barranca del abanico aluvial SSE, la Barranca Axal.

La Etapa Pre-Malinche consiste en los depósitos de la Pómez Baquedano y flujos piroclásticos de bloques y cenizas.

Pómez Baquedano

Es un depósito masivo de pómez de caída de color blanco, tamaño lapilli y de forma subangular a subredondeada que presenta textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y biotita (Castro-Govea, 2007). Representa el horizonte más antiguo en La Malinche y alcanza espesores de hasta 3 m a distancias de 20 km al NNE de la cima del volcán (Castro-Govea, 1997).

Flujos piroclásticos de bloques y cenizas

Asociados a la actividad volcánica que dio origen a la Pómez Baquedano se tienen depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza, junto con cenizas de caída, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y biotita en dimensiones menor a los cristales en la Pómez Baquedano; éstos depósitos, afloran hasta 11.5 km al NE del volcán y tienen un espesor promedio de 4m (Castro-Govea, 2007). El depósito se encuentra soportado por clastos subangulares de composición dacítica-andesítica, con tamaños desde 2 a 100 cm (Castro-Govea, 2007).

Los depósitos pre-Malinche afloran poco dado que se encuentran cubiertos casi en su totalidad por la Etapa Malinche. No se cuenta con ningún fechamiento de estos eventos, sin embargo, Castro-Govea (1999) deduce que estos depósitos corresponden a edades superiores a 45.8 ka A.P.

2.2.2. Etapa Malinche

2.2.2.1. Periodo I

Consiste predominantemente en secuencias de flujos piroclásticos, principalmente de bloques y ceniza alrededor de todo el volcán; aunque se cuenta con depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez en el sector W de La Malinche. Estos horizontes se encuentran intercalados con depósitos de lahar. Todos los depósitos se encuentran por encima de la Pómez Huamantla. El horizonte más antiguo fue fechado por carbono-14 en $45.7 \pm 2.8 / -2.0$ Ma antes del presente y el análisis se hizo a depósitos de bloques y ceniza al S del volcán. En la cima de esta secuencia se encuentra la Pómez Malinche I (Castro-Govea, 2007).

La Pómez Huamantla

Es una secuencia de depósitos de caída con espesores superiores a los 2 m, 10 km al NE de la cima del volcán. A) Primeramente cuenta con un horizonte de cenizas de caída color gris, bien seleccionadas; B) seguido de pómez de caída subredondeada con gradación normal y tamaño lapilli, con fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda. Este evento se encuentra intercalado con depósitos de lahar en la barranca al S del poblado de Pilares. C) Posteriormente se tiene un horizonte gradado de ceniza de caída intercalada con capas delgadas de lapilli fino, de color gris claro y blanco. D) Finalmente la pómez Huamantla se encuentra coronada por depósitos de flujo piroclástico de ceniza color beige grisáceo, con un alcance de hasta 20 km y espesor promedio de 90 cm (Castro-Govea, 2007).

Flujo piroclástico de bloques y ceniza 1

Aflora en la ladera oriental del volcán, sobreyaciendo a depósitos de lahares. Consiste en una unidad de clastos de lava y pómez, con tamaño que varía entre bloques y lapilli, dentro de una matriz de ceniza y presenta contenido de carbón principalmente hacia la base. Los clastos son subangulares y subredondeados de composición dacítica-andesítica, con fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda. Se desconoce la relación estratigráfica que presenta con la Pómez Huamantla, y el fechamiento obtenido fue de

46.6 ka A.P., con una gran incertidumbre por la cercanía al límite de detección del método, por lo que Castro-Govea (2007) no incluye este depósito en la columna estratigráfica de La Malinche (Fig. 2.2).

Flujo piroclástico de bloques y ceniza 2

Afloran principalmente en la ladera S del volcán. La unidad presenta carbón y es matriz-soportada. Presenta clastos de bloques y lapilli de composición dacítica-andesítica con fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda. Se tienen 3 fechamientos por radiocarbono de este depósito en diferentes afloramientos, obteniendo las edades de 45.8 ± 2.7 ; $45.7 +2.8/-2.0$ y; $43.9 +3.6/-2.5$ ka A.P. Esta unidad tiene un alcance máximo entre 9 y 13 km desde la cima del volcán, y presenta espesor variable, desde 2 a 14 m (Castro-Govea, 2007).

Este evento es sobreyacido por una avalancha de escombros y flujos piroclásticos y, se encuentra encima de depósitos de lahar, flujos piroclásticos y la Pómez Huamantla.

Flujo piroclástico de cenizas y pómez 1

Aflora hasta 12.5 km al W de la cima de La Malinche con espesores de entre 5 y 20 m, es una unidad matriz soportada con clastos subredondeados de pómez de entre 2 y 40 cm de diámetro y con troncos carbonizados de los que se hicieron fechamientos de $40,160 +1,760/-1,440$ a A.P., también contiene en menor proporción líticos, de máximo 20 cm de diámetro (Castro-Govea, 2007).

Flujo piroclástico de bloques y ceniza 3

Aflora en el sector NE. Presenta clastos de lapilli y bloques subredondeados de hasta 1 m de diámetro y composición dacita-andesita con fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda, dentro de una matriz de ceniza. Presenta carbón, fechado en $38,895 \pm 1,200$ a A.P., y el depósito tiene un alcance de alrededor de 11 km (Castro-Govea, 2007).

Caída de pómez 1

Aflorando en el sector NE del volcán, se tiene un depósito de pómez de caída sobreyaciendo al flujo piroclástico de bloques y ceniza 3. La unidad se encuentra intercalada con delgados depósitos de lahar y, consiste en capas delgadas de pómez con tamaño de lapilli y cenizas con gradación normal. La pómez es blanca, subredondeada y presenta fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda (Castro-Govea, 2007).

Flujos Pilares

Aflorando al NE del volcán, Castro-Govea (2007) denomina *Flujo Pilares*, a una secuencia de flujos piroclásticos de bloques y ceniza y; subdivide la unidad en Flujo Pilares Inferior y Flujo Pilares Superior, las cuales se encuentran sobreyaciendo a la Caída de pómez 1. El Flujo Pilares se presenta principalmente de forma masiva, aunque dentro del Flujo Pilares Superior se puede observar estratificación en algunos afloramientos. El principal rasgo distintivo entre estos depósitos es que el Flujo Pilares Inferior es de color rosa rojizo, mientras que el flujo Pilares Superior es de color gris. Ambos presentan líticos de dacita-andesita subredondeados a subangulares, con tamaño variable desde lapilli a bloques de hasta más de 2 m, dentro de un arreglo matriz-soportado de ceniza. El Flujo Pilares inferior tiene un alcance máximo de 14.5 km desde la cima del volcán, mientras que el Flujo Pilares Superior, tiene alcance de 13.5. Cada uno tiene un espesor promedio de 3 m (Castro-Govea, 2007).

Flujo piroclástico de cenizas y pómez 2

Aflora en la ladera NE de La Malinche. Es una unidad matriz soportada, con espesor promedio de 5 m, de color que varía entre gris claro y amarillo pálido. Presenta lapilli y bloques de pómez blanca subredondeada, con fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda. Presenta algunas ramas de árbol carbonizadas en la base, fechadas por radiocarbono en 23,235 ±190/-185 a A.P. El depósito tiene un alcance máximo de 12 km y es sobreyacida concordantemente por la *Pómez Malinche I* (Castro-Govea, 2007).

2.2.2.2. Periodo II

Esta representada por depósitos sobre la Pómez Malinche I, la cual indica el comienzo del periodo. Consisten en intercalación de lahares y pómez de caída alrededor de La Malinche; en la ladera E y SSW existe evidencia de pequeños colapsos de los flancos y; en la ladera W se observa un flujo piroclástico de ceniza y pómez. Las principales avalanchas se dieron en el flanco SW y E, y aunque solo se tiene el fechamiento de una de ellas, Castro-Govea (2007) supone que son de edades semejantes. La secuencia se encuentra sobreyacida por la Pómez Malinche II, que indica el comienzo del tercer y último periodo eruptivo.

Pómez Malinche I

Es una unidad de pómez de caída presente en todas las laderas del volcán, sobreyaciendo paleosuelos formados sobre lahares y depósitos de flujos de ceniza. En la ladera N de La Malinche, la secuencia se subdivide en 2 capas, con gradación normal; la primera capa se encuentra coronada por cenizas finas. Mientras que al sur, no son apreciables las capas anteriores, sin embargo si estratificación del depósito. La unidad tiene lapilli y cenizas de pómez blanca, subredondeada a subangular y se encuentra enriquecida en líticos del mismo tamaño pero subangulares. Dentro de la unidad existen algunas laminaciones de color gris que presentan oleadas piroclásticas del mismo evento que generó la pómez. La pómez presenta fenocristales de plagioclasa, hornblenda y escasa biotita, y alcanza diámetros de hasta 20 cm. La Pómez Malinche 1, fue fechada en 21,470 +940/-840 a A.P. Presenta intercalación, en algunos sectores, con depósitos de lahar y flujos piroclásticos (Castro-Govea, 2007).

Avalanchas de escombros

Se tienen 2 avalanchas de escombros, una en la ladera E con espesor promedio de 6 m, y la otra al S de La Malinche con espesor promedio de 3 m, ambas compuestas por los materiales que hasta entonces integraban el edificio volcánico y ambas con lahares tanto a la base como encima (Castro-Govea, 2007).

Castro-Govea (2007) fechó madera a la base del depósito obteniendo fechas de 20,950 \pm 180; y menciona que por la semejanza en la secuencia estratigráfica y los componentes ambos depósitos de fueron generados por el mismo evento tectónico, y por consiguiente son de edades similares. El alcance máximo que tienen es de 13 km en la ladera E y 16 km en la SW dese la cima del volcán (Castro-Govea, 2007).

Flujo piroclástico de cenizas y pómez 3

Aflora en la ladera W del volcán. La unidad es matriz-soportada y tiene un espesor promedio de 8 m. Presenta lapilli y cenizas subredondeados de pómez blanca con fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda. Presenta carbón hacia la base del flujo, del cual se obtuvo el fechamiento por radio-carbono de 15,970 \pm 120 a A.P. El alcance máximo de este depósito es de 9.5 km (Castro-Govea, 2007).

2.2.2.3. Periodo III

Este periodo comienza con el depósito de la Pómez Malinche II. Consiste en depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez principalmente, con fechamientos entre los 9 y los 7.5 ka A.P., predominantemente (Castro-Govea, 2007). Sin embargo los depósitos más jóvenes fueron fechados por Castro-Govea (1999) por radiocarbono en cenizas en la cima del volcán; obteniendo edades de 3,005; 3,115; 3,280 y 3,450 años A.P., las cenizas de las que se obtuvo el análisis fueron tanto cenizas de caída como de flujo.

Pómez Malinche II

Corresponde a una secuencia de pómez de caída que aflora principalmente en la ladera N del volcán y se distingue por la presencia de una unidad estratificada de color ocre amarillento. La secuencia consiste en 2 unidades de pómez de caída sobreyacidas por una de flujo piroclástico:

A) En la base se tiene un depósito formada por estratos delgados que varían su espesor entre 1-15 cm, contiene lapilli y cenizas de pómez y líticos subangulares a subredondeados con gradación normal, los líticos son de menores dimensiones que la pómez. La pómez es

de composición andesítica con fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda y; de color ocre amarillento o blanca con manchas amarillas. Presenta un espesor máximo de 87 cm, a 6 km al NE de la cima (Castro-Govea, 2007).

B) Cubriendo concordantemente a la anterior unidad, se tienen cenizas de color gris finamente estratificadas, con un espesor máximo de 105 cm, 9 km al NE de la cima (Castro-Govea, 2007).

C) Coronando la secuencia se tiene el depósito de un flujo piroclástico de cenizas; la unidad es matriz-soportada de color beige y presenta lapilli fino de pómez subredondeada y líticos subredondeados y subangulares. El espesor promedio de esta unidad es de 1 m, y tiene un alcance máximo de 10 km desde la cima de La Malinche (Castro-Govea, 2007).

Se cuenta con 2 fechamientos de esta secuencia, el primero fue tomado de un tronco carbonizado a la base del depósito, con edad de 12,060 a A.P., y el segundo de un flujo piroclástico encima de la secuencia, con edad de 9,030 a A.P., (Castro-Govea, 2007).

Flujos piroclásticos de bloques y cenizas 4

Aflora en la ladera W sobreyaciendo discordantemente a la Pómez Malinche II. La unidad consiste en depósitos de lapilli y bloques matriz-soportados subredondeados a subangulares de vidrio de composición dacítica, la mayoría de los clastos son inferiores a 15 cm, sin embargo existen algunos con diámetro máximo de hasta 40 cm. El depósito tiene un espesor promedio de 3 m y un alcance de 7 km desde la cima (Castro-Govea, 2007).

Flujo piroclástico de ceniza

Aflora en la ladera W y sobreyace discordantemente al Flujo piroclástico de bloques y ceniza 4. Es un depósito homogéneo de flujo de cenizas color beige, con un espesor promedio de 90 cm y un alcance mínimo de 6.5 km desde la cima del volcán. La unidad contiene lapilli fino, de menos de 2 cm, de pómez subredondeada. Se tienen 2

fechamientos de este depósito, realizados por Castro-Govea (1999), obteniendo las edades de $9,030 \pm 85$ y $8,645 +430/-405$ a A.P.

Lahar 1

Aflorando en el sector oriental del volcán sobre el depósito de Pómez Malinche I, se tiene un lahar de 1.2 m de espesor. El depósito heterolitológico presenta ceniza color beige grisáceo, líticos y pómez subredondeados a subangulares. Este depósito tiene un alcance mínimo de 9 km desde la cima del volcán. También se encuentran carbones, de los que se obtuvo el fechamiento de $8,655 +195/-190$ a A.P. (Castro-Govea, 2007).

Lahares 2

Sobre el depósito de lahar 1 se emplazan varios lahares delgados, con espesores de entre 5 y 40 cm. Son una secuencia con ceniza y lapilli de pómez redondeada y en menor proporción, lapilli de líticos subredondeados a subangulares. La secuencia tiene un espesor máximo de 3.4 m, y se encuentran algunos lentes de lapilli de pómez grano-soportada. El depósito tiene un alcance máximo de 10 km desde la cima del volcán y fue fechado en $8,255 \pm 65$ a A.P. (Castro-Govea, 2007).

Flujos piroclásticos de ceniza y pómez 4

Afloran en el flanco NE del volcán. La secuencia de matriz-soportada de hasta 7 unidades de flujos piroclásticos de ceniza con espesores entre 2-3 m cada una, se encuentra constituida por lapilli y bloques de pómez dacítica de color blanco y clastos líticos subangulares en menor proporción que la pómez, dentro de una matriz de ceniza. Los clastos de pómez llegan a superar los 20 cm de diámetro. Tanto la pómez como los líticos presentan textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y biotita. Dentro de la secuencia se tiene un horizonte de pómez de caída, de color blanco y con espesor de 12 cm. La pómez es de tamaño lapilli, y la unidad presenta gradación normal. Se tienen 2 fechamientos de esta secuencia, con edades de $8,065 \pm 105$ y $7,430 +200/-195$ a A.P. El alcance máximo de estos depósitos es de 10 km desde la cima de La Malinche (Castro-Govea, 2007).

Caída de cenizas

Representa el evento volcánico más reciente de La Malinche. La unidad es descrita como depósito de caída de cenizas bien seleccionadas de pómez, que aflora a alturas superiores a 2,700 m s.n.m.m. El espesor de la unidad y tamaño de las partículas incrementa gradualmente conforme se asciende topográficamente. En menor proporción a la pómez presenta cristales y fragmentos líticos. La unidad presenta débil estratificación cerca de la cima y la granulometría ya alcanza tamaño de lapilli, con pómez de máximo 3 cm. Asociado a la actividad que generó la caída de cenizas, en la ladera norte se tiene un flujo piroclástico, con cenizas gruesas de pómez subredondeada; sobreyaciendo las cenizas de caída y oleadas piroclásticas; la secuencia en conjunto alcanza un espesor de 3.3 m (Castro-Govea, 2007). Castro-Govea (1999) obtuvo diferentes fechamientos de éstos depósitos: $3,005 \pm 75$, $3,115 \pm 55$, $3,280 \pm 65$ y $3,450 \pm 100$ a A.P., de lo cual concluye que la última erupción de La Malinche ocurrió hace 3,100 a A.P.

2.3. Geología Estructural

El CVTM se caracteriza de forma general por presentar una gran cantidad de fallas normales, con gran variedad en la orientación, sin embargo, en el sector occidental se presenta dirección preferencial NE-SW y NW-SE; en el sector central E-W y; en el sector Oriental, que es nuestra zona de interés, NE-SW (Gómez-Tuena et al. 2005). Al analizar estos lineamientos un poco más a detalle, se observa que en la zona de La Malinche las fallas tienen una orientación N-S, alineación que concuerda con la orientación de los grandes estratovolcanes en esta zona del CVTM (Demant, 1978). Sin embargo, al analizar la orientación de los volcanes monogenéticos en esta zona del CVTM, se aprecia un alineamiento preferencial E-W y NE-SW; lo que significa zonas de debilidad con esta dirección preferencial (Castro-Govea 2007; Fig. 2.3).

Con lo anterior se identifica que la orientación principal de las fallas en los alrededores de La Malinche es NE-SW y E-W, lo cual concuerda con que de los 4 grandes abanicos aluviales de La Malinche 3 mantengan constante su orientación por más de 10 km sobre estas direcciones, 2 de orientación E-W y el abanico del SW.

El trabajo de Castro-Govea (2007) estudia con mayor detalle la geología estructural de los alrededores de La Malinche, obteniendo que en las regiones S y SE del área de estudio se presentan predominantemente alineaciones de orientación N-S y E-W; afectando únicamente a las rocas más antiguas de la región; mientras que el par de secuencias lacustres que afloran al NE, NW y W presentan fallas normales de orientación E-W (Fig. 2.3).

A lo largo del CVTM existe un sistema de Horst y Graben con orientación E-W, lo cual también se presenta en la zona de estudio, pues al norte de La Malinche las fallas normales buzaban hacia el sur, mientras que al sur del volcán el buzamiento de las fallas es hacia el norte, de forma tal que La Malinche se edificó en un graben, siendo en su momento la zona más baja topográficamente (Mooser y Ramírez, 1987 y Castro-Govea 2007). El graben de Puebla, mapeado de forma general por Lermo-Samaniego y Bernal-Esquia (2006), se considera actualmente activo y afecta directamente la zona de estudio (Fig. 2.3).

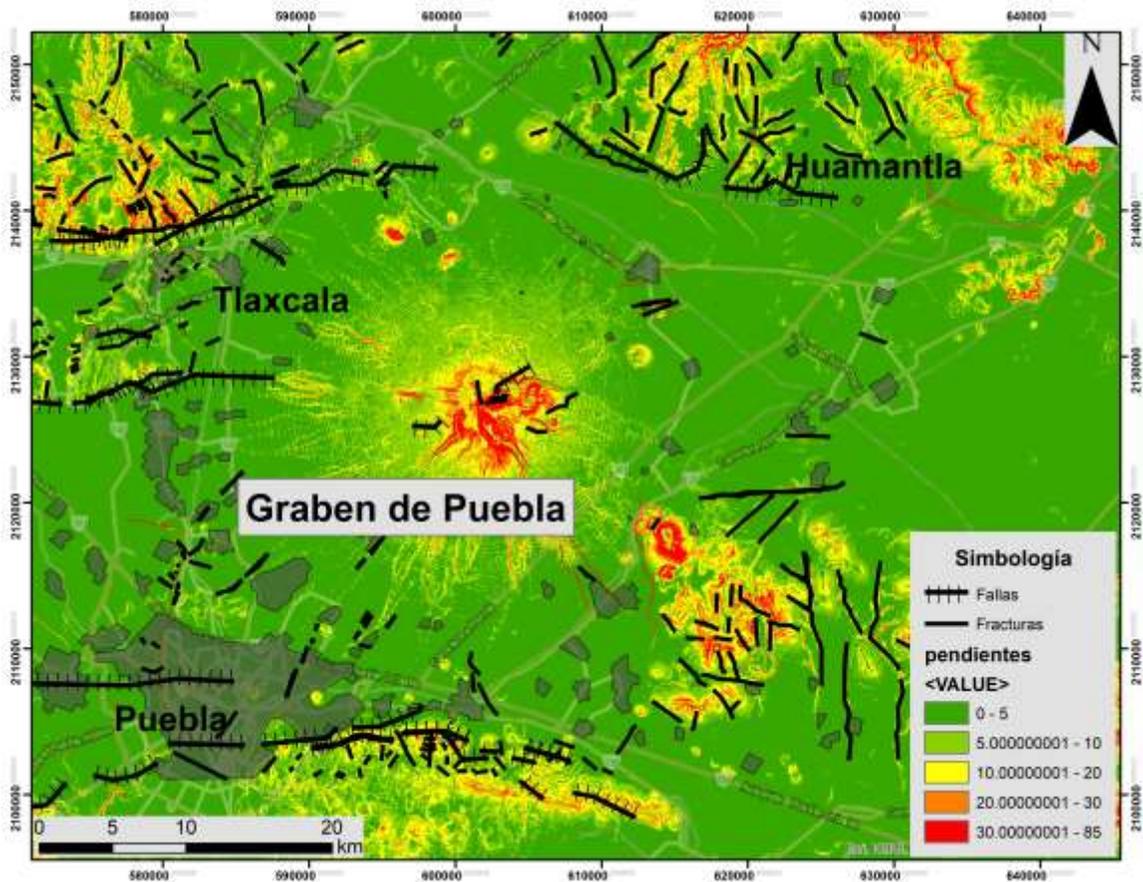


Figura 2.3) Mapa de pendientes del área de estudio mostrando las principales fallas y fracturas de la zona. Modificado de Castro-Govea (2007) y Lermo-Samaniego y Bernal-Esquia, (2006).

Dado que La Malinche se encuentra dentro de un graben, en la Figura 2.4 se busca identificar la simetría del sistema de fallas; se puede notar que el terreno alrededor del volcán presenta mayores elevaciones al NW, N, NE y E, mientras que al SE, S, SW y W se tienen menores alturas. Esto podría indicar un salto asimétrico con eje NW-SE, sin embargo los la gran abundancia de eventos monogenéticos al N oculta la simetría del salto original, quedando esto a debate.

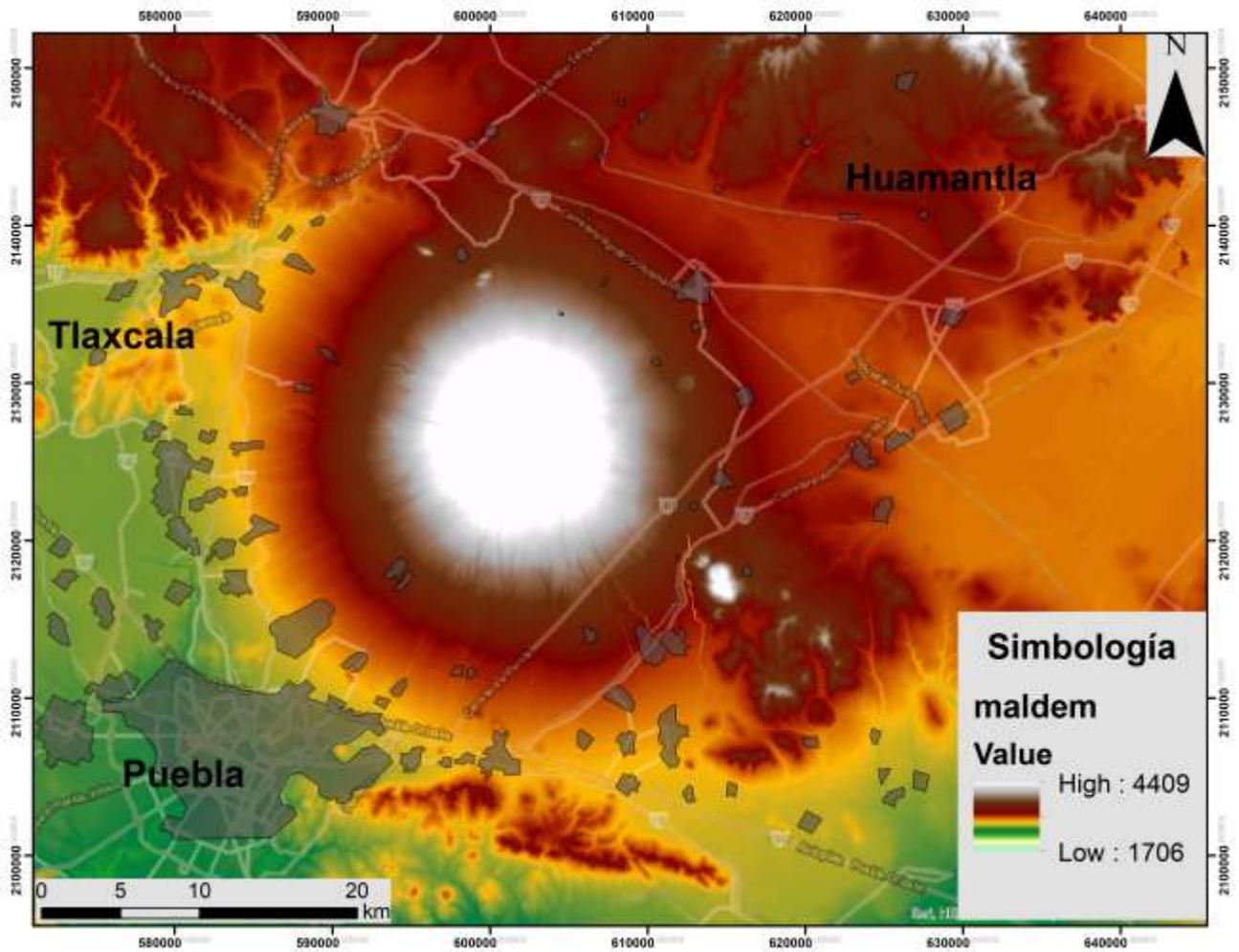


Figura 2.4) Mapa de alturas de La Malinche y los alrededores.

3. Metodología

El presente trabajo se realizó en 2 etapas de gabinete y una de trabajo de campo. La primera etapa consistió en trabajo de gabinete mediante la revisión extensiva de bibliografía del volcán La Malinche, con lo que se conoció la geología de la región así como la historia eruptiva del volcán. La segunda etapa consistió en realizar trabajo de campo para confirmar la presencia de algunos depósitos y, se buscó delimitar a detalle los contactos de algunos lahares, principalmente en la zona sur; de igual manera se prestó especial atención a las áreas donde afloraba la avalancha. Finalmente en la tercera etapa se realizó trabajo de gabinete mediante el procesamiento e integración de datos de la información recabada en campo, y en los casos necesarios se corrigieron los contactos antes propuestos.

A continuación se describe tanto trabajo de gabinete como de campo; el primero se subdivide según las diversas herramientas utilizadas.

3.1. Integración y procesamiento de información en Arc-GIS

Para la mejor visualización del área de estudio, se decidió crear una capa *Hillshade*, que es un mapa de sombras del relieve. Este archivo se genera por medio de una herramienta en el software Arc-GIS a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés) obtenido como archivo *Raster* de la página del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) del INEGI con actualización en julio de 2017. La herramienta de Arc-GIS pide como datos de entrada el archivo *Raster*, que es una matriz de datos con información en los 3 ejes; X, Y y Z, y datos sobre cómo se desea generar el sombreado del relieve, es decir, la posición en que se desea simular que el Sol ilumine el relieve. El *Hillshade* creado, será igualmente un archivo *Raster* y conservará la resolución del archivo de entrada, solo cambiará el valor asignado al eje Z, por un nuevo valor, con base en los píxeles alrededor de la celda, el cuál será un tono en escala de grises; creando en conjunto el mapa de sombras.

Con el archivo *Hillshade* se pudo identificar la morfología y algunos rasgos distintivos del relieve. Además de que fue utilizado como mapa base para la mayoría de los mapas generados.

3.1.1. Software *LAHARZ*

El software *Laharz* fue diseñado por Schilling (1998) como un programa en Arc INFO que simula las zonas de inundación de los lahares que puedan generarse en las laderas de un volcán, según algunas descripciones que el usuario debe incluir. Esta primera versión del software se desarrollaba de forma muy lenta, puesto que se debía simular cada barranca de forma individual, y solo permitía un volumen de material, por simulación. Schilling (2014) creó una nueva versión del software diseñada como herramienta de ArcMAP, con algunas mejoras al programa original, este nuevo software corre en versiones de ArcGIS 10 o más avanzadas. Dentro de esta versión, se pueden simular 1 o más lahares en una sola corrida, y también se pueden simular entre 1 y 4 volúmenes distintos.

Laharz basa la simulación de la zona de inundación por lahares en un análisis estadístico de 27 diferentes lahares en 9 distintos volcanes. Estos depósitos fueron mapeados y, del análisis derivan las siguientes fórmulas.

$$(1) A = 0.05 V^{2/3}$$

$$(2) B = 200 V^{2/3}$$

Donde:

A = Área de sección transversal

B = Área planimétrica y,

V = Volúmen de material desplazado a simular.

Laharz trabaja a partir de un DEM, creando diferentes archivos *raster* y *shapefiles* auxiliares para la simulación. Los *raster* generados son: Dirección de Flujo, Acumulación de flujo y de Delimitación de la corriente; mientras que los *shapefiles* auxiliares son: Red

Hidrográfica y Conos de Energía. Con los archivos anteriores, *Laharz* crea secciones transversales a lo largo de la barranca donde se simula el lahar y continúa avanzando en la dirección del flujo conforme a los archivos Raster, hasta que las fórmulas (1) y (2) sean iguales (Fig. 3.1).

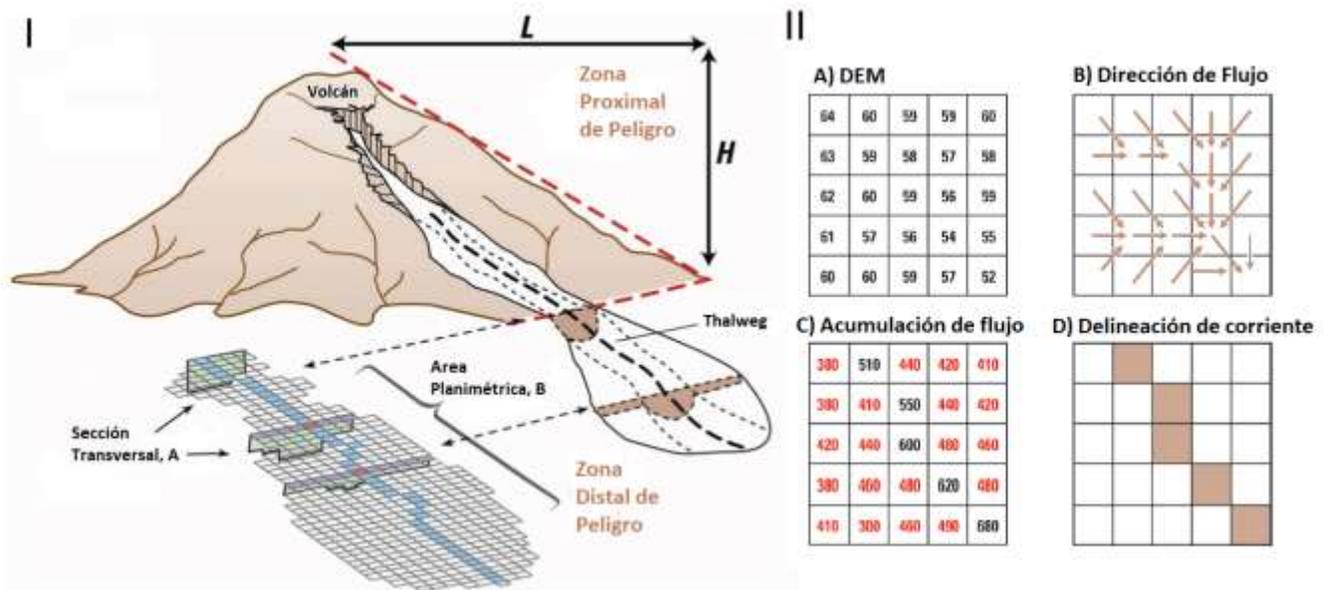


Figura 3.1) Imágenes decriptivas del funcionamiento de Laharz. I) Muestra los elementos que ocupa *Laharz* para el funcionamiento del software. II) Muestra un ejemplo de los archivos Raster que genera Laharz a partir del Modelo Digital de Elevación, con los cuales se efectúa simulación del lahar. Modificado de Schilling (2014).

Los archivos *shapefiles* generados para *Laharz*, no se ocupan en la simulación de forma directa igual que los archivos *raster*, sino que ayudan a extraer datos necesarios que pedirá el programa. La información que debemos obtener de estos *shapefiles*, es el punto de origen de los lahares.

Para conseguir el posible punto de origen de los lahares, primeramente se genera un archivo con la red hidrográfica de la zona, igual a partir del DEM, identificando así todas las barrancas en la zona de estudio (Fig. 3.2). Esta red hidrográfica converge hacia la cima del volcán, y permite observar las barrancas que llegan a mayor altura, y otras que se generan en las laderas del mismo.

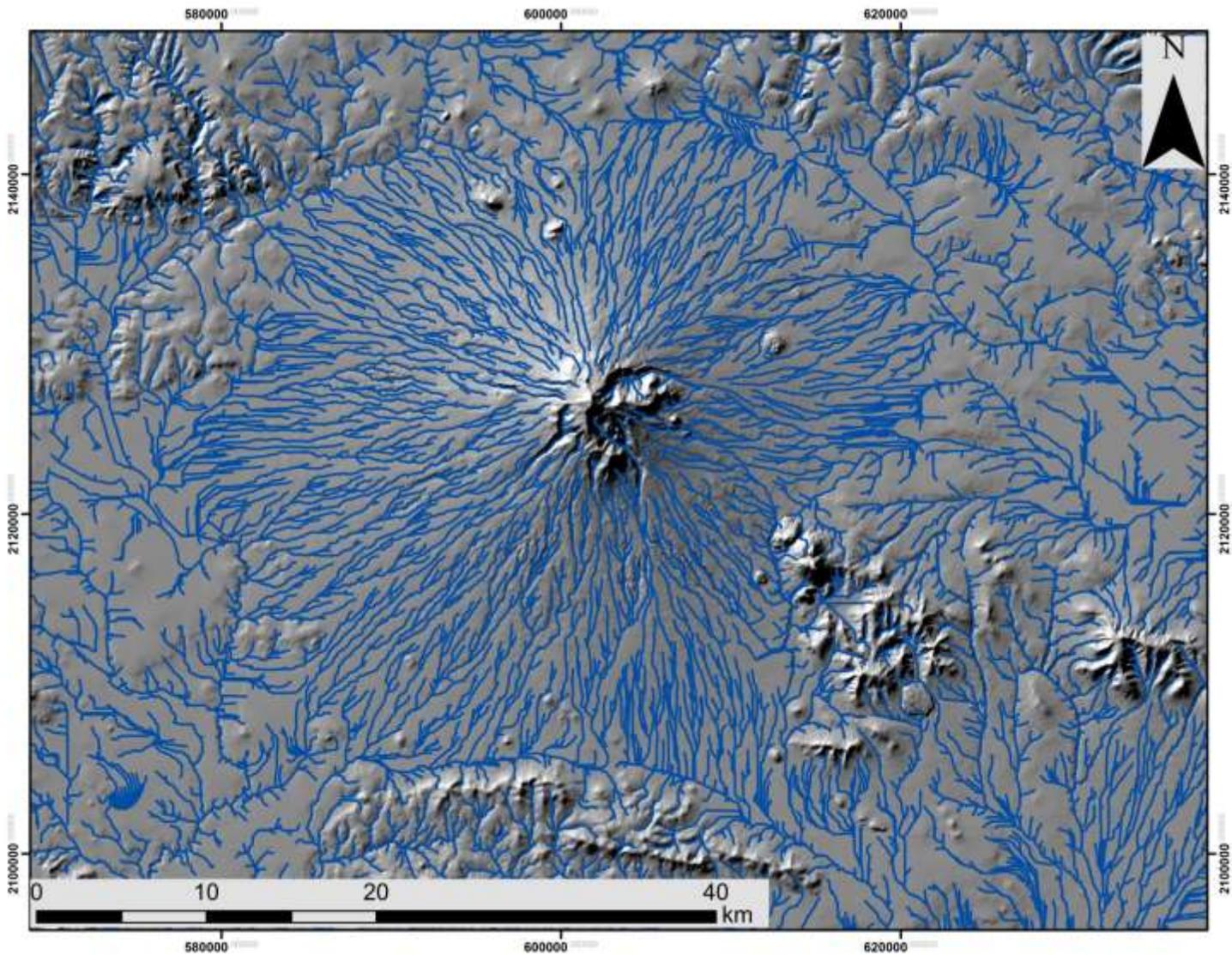


Figura 3.2) Red Hidrológica en el volcán La Malinche.

A continuación se generan los conos de energía con las diferentes pendientes que se deseen simular. Con estos polígonos se puede ver la altura a la cual es posible el comienzo de un lahar, según el valor de pendiente que se indique, H/L (altura sobre longitud; Fig. 3.1). Con base en los trabajos de Niño-Estrada (2016); Pérez-Pérez (2011) y Schilling (2014) se decidió generar 3 conos de energía con las pendientes 0.25, 0.30 y 0.35 (Fig. 3.3).

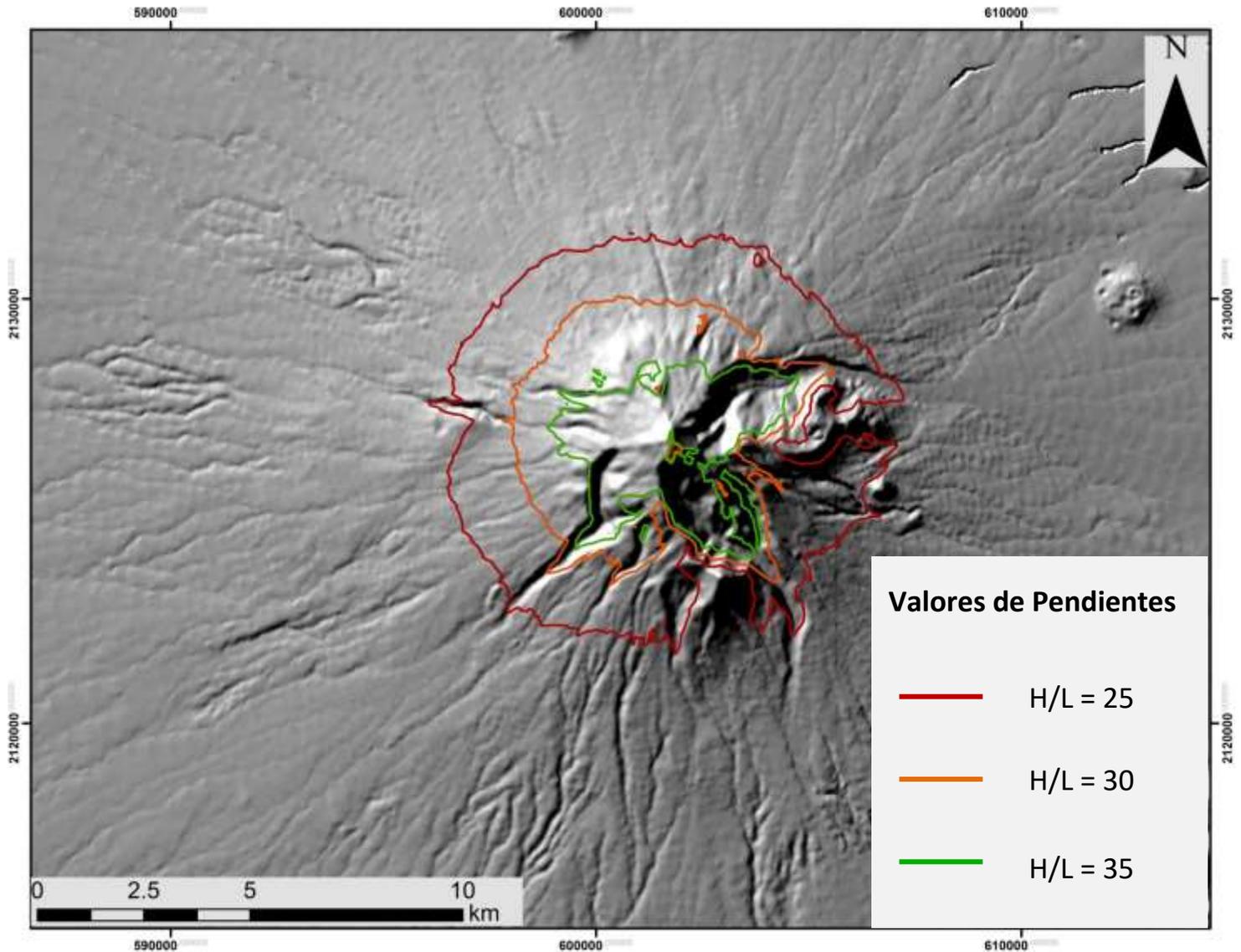


Figura 3.3) Conos de energía para la generación de lahares en volcán La Malinche, según diferentes valores de pendiente.

Con estos 2 *shapefiles*, red hidrográfica y conos de energía, se puede obtener el punto de origen de un lahar. Únicamente debe elegirse la barranca que se desea simular, seguirla hacia la cima del volcán e identificar el punto en el que intersecta con el cono de energía de la pendiente que se simulará. Con esta sobreposición de los conos de energía y la red hidrográfica se encontró variación en el número de barrancas para cada uno de los 3 valores de pendientes (Tabla 3.1). Una vez definidas las barrancas, se extrajeron las coordenadas de la intersección de cada barranca con los diferentes puntos dentro de los 3 conos de energía.

Tabla 3.1) *Conteo de las barrancas con alcance en los diferentes conos de energía.*

Pendiente (H/L)	# de Barrancas que Contiene
0.25	40
0.30	26
0.35	17

Finalmente se definieron los volúmenes de material con los que se realizaron las simulaciones de los lahares. Con base en los trabajos de Castro-Govea (2007), Pérez-Pérez (2011), Niño-Estrada (2016) e información histórica de lahares en estratovolcanes de México (Tabla 1.1); se decidió usar los volúmenes de 500,000; 1,000,000 y 10,000,000 m³. Con esto, se terminó la obtención de la información necesaria para correr las simulaciones de Laharz.

Tanto las coordenadas con los posibles puntos de origen de los lahares y los diferentes volúmenes que se simularán, se deben tener de forma independiente en archivos txt.

3.1.2. Imágenes y mapas de apoyo

De las diversas fuentes consultadas se pudieron encontrar varios mapas que delimitan diversos depósitos asociados a La Malinche.

Primeramente, se utilizó el mapa geológico de Castro-Govea (2007; Fig. 3.3) y se le anexaron los depósitos de los últimos 10 ka, fechados y mapeados por Castro-Govea (1999).

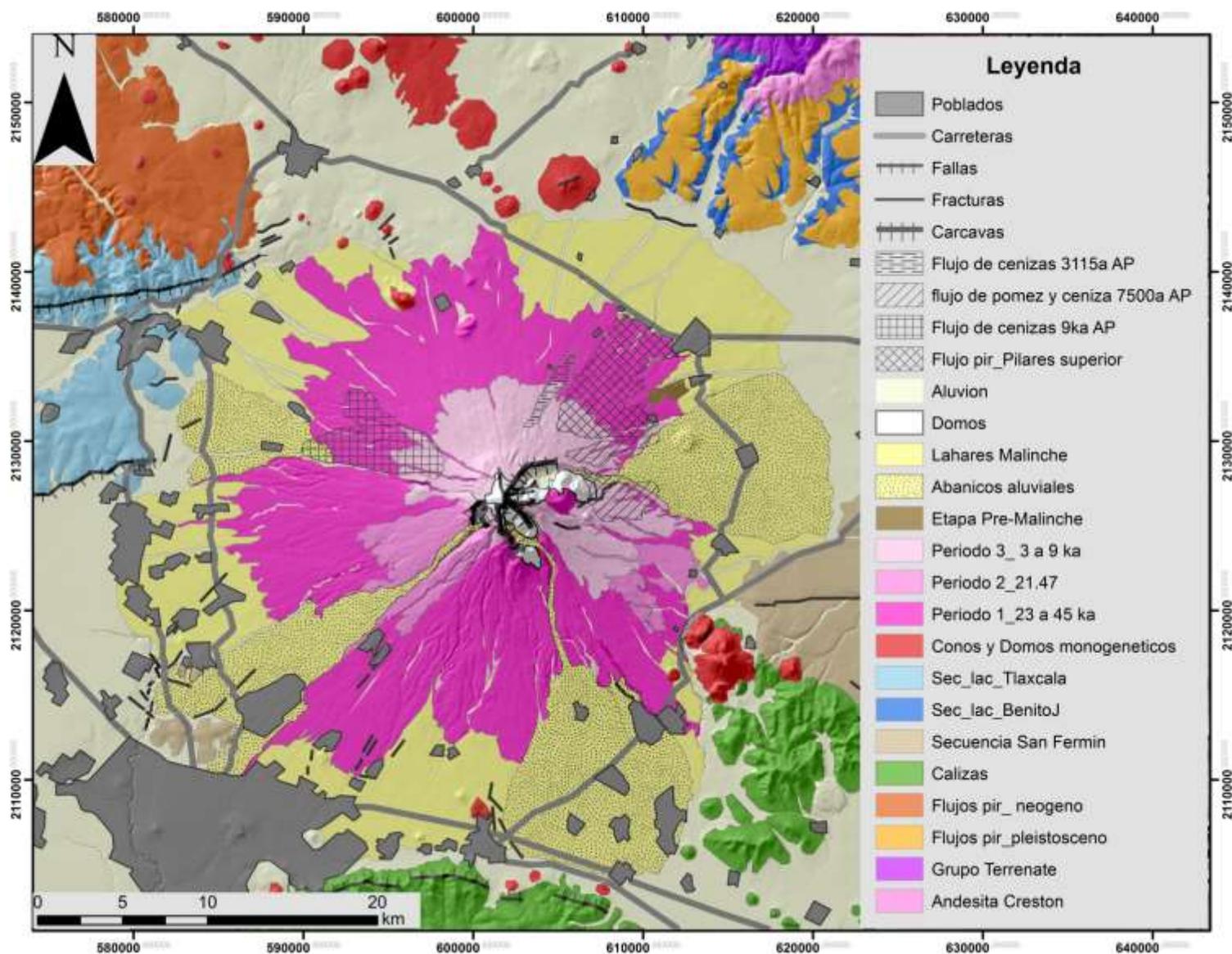
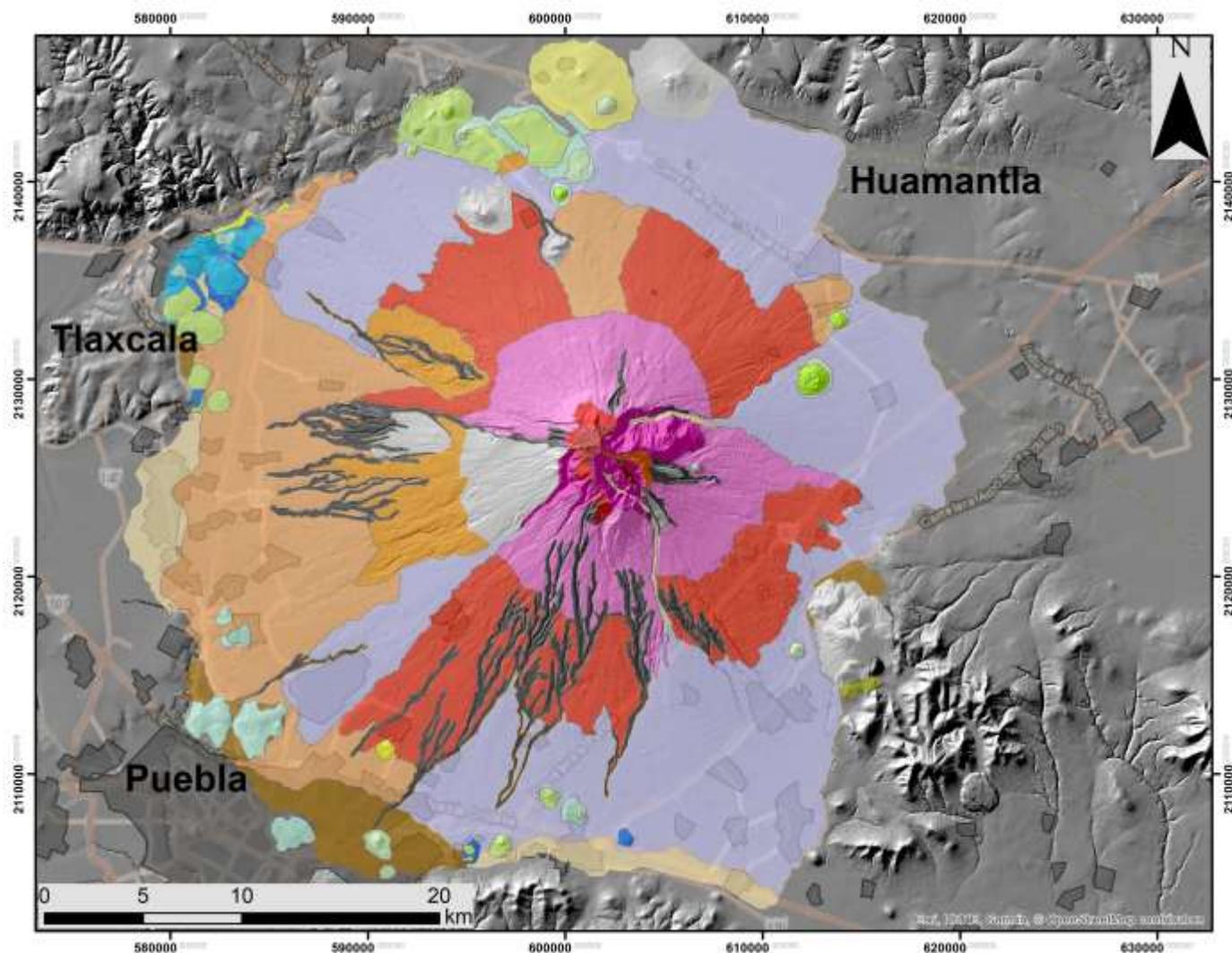


Figura 3.3) Mapa Geológico de La Malinche y depósitos circundantes. Modificado de Castro-Govea (1999 y 2007).

También se consultó el mapa morfoestratigráfico de Castillo-Rodríguez et al. (2010; Fig. 3.4). El cual identifica un total de 29 unidades geomorfológicas. En la Figura 3.4, se muestran 26 de ellas; puesto que se decidió unificar los valles en un solo grupo.



Simbología	
	Planicie aluvial 1_frio semiarido
	Planicie aluvial 2_fresco semiarido
	Planicie aluvial 3_semi frio y urbano
	Pendiente abrupta 4_gelido semiarido_leptosols
	Pendiente abrupta 5_gelido semiarido_regosols
	Pendiente abrupta 6_nevado_cambisols y vertisols
	Pendiente de colina 7_fresco semiarido_cambisols
	Pendiente de colina 8_fresco semiarido_fluvisols
	Pendiente de colina 9_fresco semiarido_cambisols
	Pendiente de colina 10_fresco semiarido_cambisols y urbano
	Pendiente de colina 11_fresco semiarido_arbustos en leptos y cambisols
	Pendiente de colina 12_semifrio lluvioso_bosque de roble y pastos en cambisols
	Pendiente de colina 13_semifrio lluvioso_croops on regosols
	Pendiente de colina 14_semifrio lluvioso_bosque de roble leptosols y regosols
	Pendiente de montaña 15_frio semilluvioso_bosque fluvisols
	Pendiente de montaña 16_frio semilluvioso_bosque de roble con suelo volcanico
	Pendiente de montaña 17_frio semilluvioso_bosque de pino en regosols
	Pendiente de montaña 18_helado semilluvioso_bosque de pino pastizales antropicos y lepisols
	Pendiente de montaña 19_semifrio semilluvioso_arbustos en leptos y regosols
	Pendiente de montaña 20_helado semilluvioso_bosque de pino en regosols
	Pendiente de montaña 21_helado semilluvioso_bosque de roble en regosols
	piepmont 22_frio semilluvioso y fresco semiarido_arbustos en regosols
	Piedmont 23_frio semilluvioso_arbustos en regosols
	piepmont 24_frio semilluvioso_bosque de pinos en regosols
	Piedmont 25_semi frio y lluvioso_arbustos en fluvisols
	Valles 26

Figura 3.4) Mapamorfogeográfico de La Malinche. Modificado de Castillo-Rodríguez (2010).

Estos dos mapas permitieron conocer la distribución espacial de los principales depósitos asociados a La Malinche. Sin embargo también se consultaron 2 mapas más, la Carta de Uso de Suelo y Vegetación “Ciudad de México” E14-2, del INEGI (2016) y la Carta

Geológico-Minera “Ciudad de México” E14-2, del SGM (2002); las cuales sirvieron para conocer los nombres de los principales rasgos topográficos, mientras que la segunda ofrecía poca información relevante.

Imágenes satelitales

Para detallar el mapeo y delimitar a mayor detalle los depósitos asociados al volcán, principalmente los depósitos secundarios como lahares y avalanchas, se realizó el procesamiento e interpretación de imágenes satelitales, obtenidas por el satélite *landsat*. Estas imágenes fueron procesadas dentro del software Arc-GIS, realizando la combinación de distintas bandas propuestas por Franco (2017) (Figura 3.5).

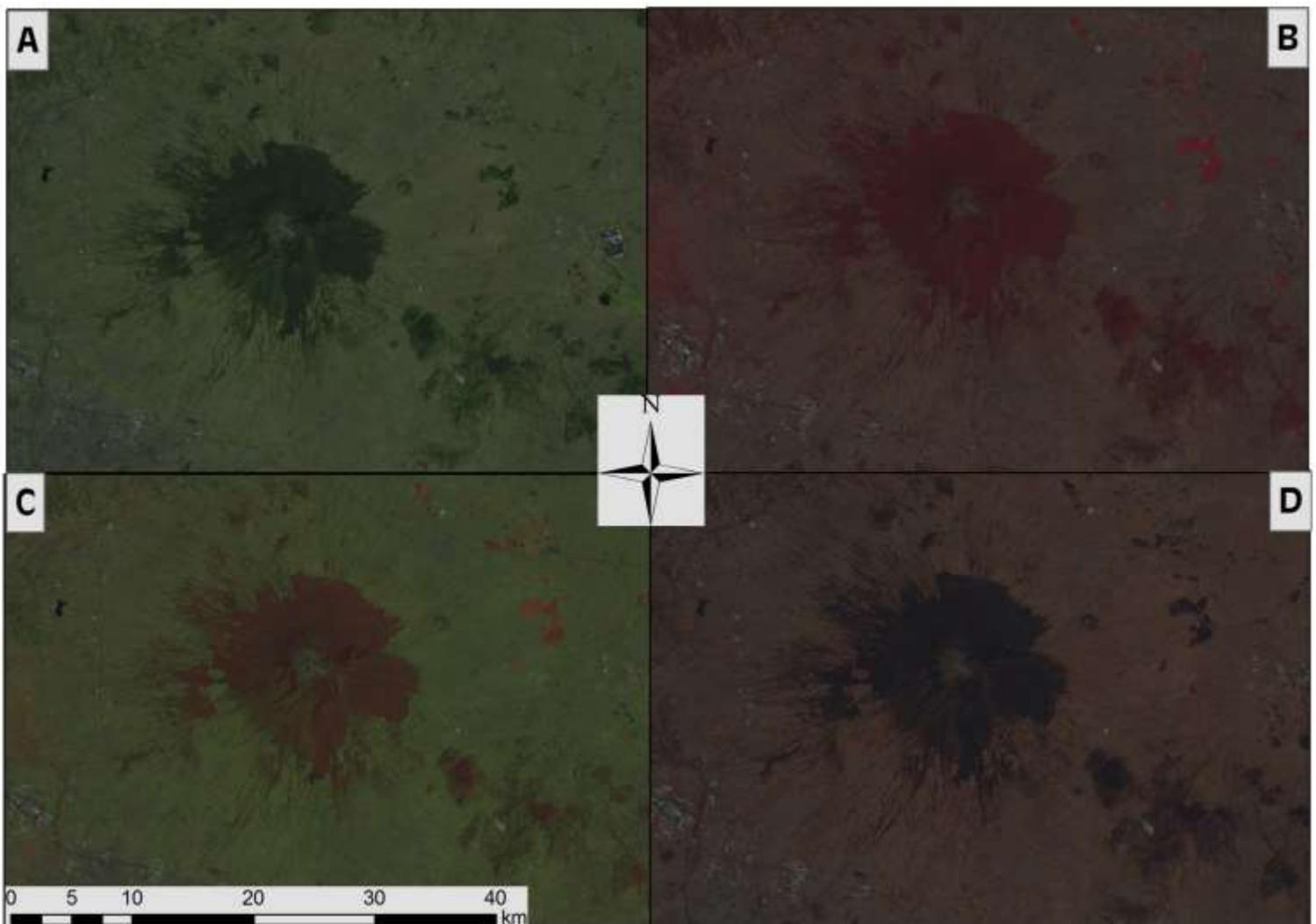


Figura 3.5) Imágenes satelitales .A) Resalta formaciones rocosas y ciudades, combinación 764. B) Vista infrarrojo, combinación 543. C) Resalta vegetación saludable, combinación 562. D) Resalta rasgos geológicos, combinación 742.

Se procesaron distintas combinaciones de bandas y se decidieron usar 4 diferentes combinaciones propuestas por Franco (2017) para la interpretación; la combinación 764 resalta las formaciones rocosas y permite ver las áreas urbanas, la combinación 543 da una vista sumamente semejante a la visión infrarrojo, la combinación 562 permite ver áreas con vegetación saludable y, finalmente la combinación 742 permite la visualización de algunos rasgos geológicos (Fig. 3.5).

Se utilizaron también las imágenes *Digital Globe* y *Copernicus*, tanto para delimitar depósitos como para conocer el nombre de los principales poblados y carreteras.

Con base en el análisis de las anteriores cartas e imágenes, se eligió el área dentro de la cual se delimitaría el alcance de los lahares, seleccionando así el área comprendida en el sector sur, entre los abanicos aluviales del SSE y SW, por ser la zona donde se tienen mejor exhibidos los depósitos de La Malinche y mostrar varios contactos entre los depósitos volcánicos y rocas calcáreas (Fig. 3.6)

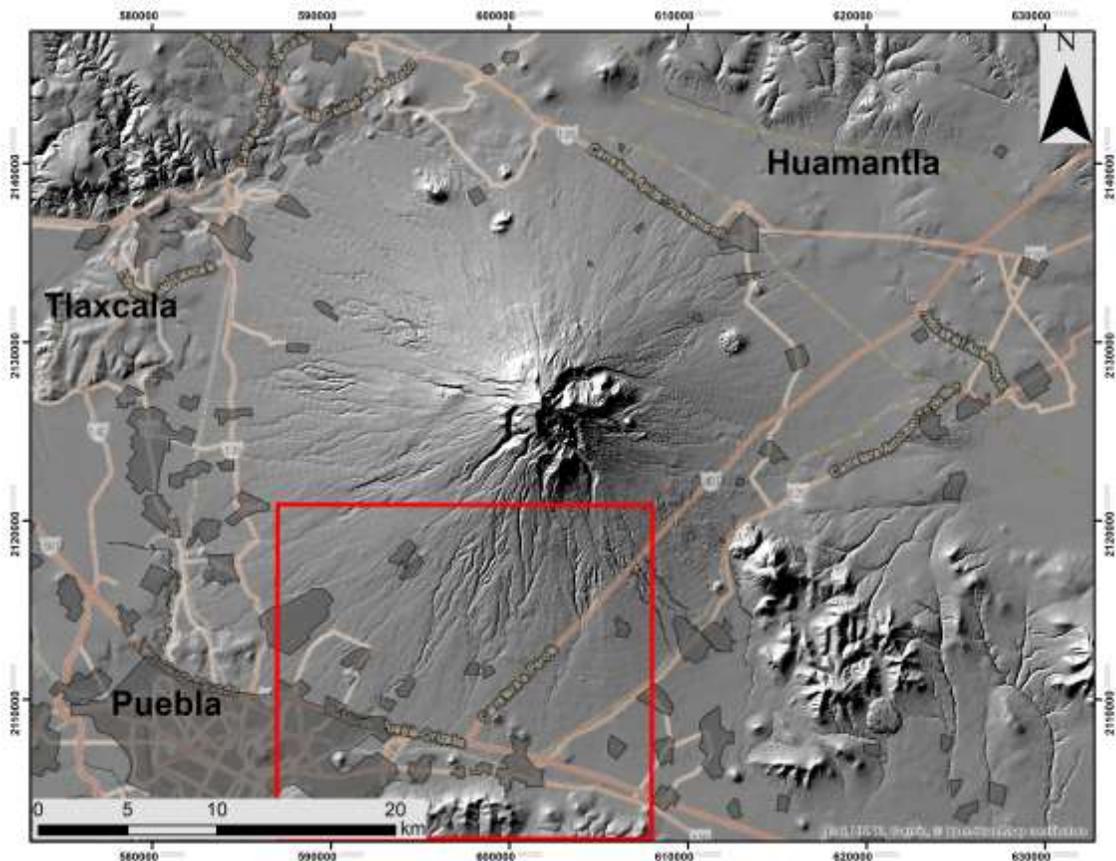


Figura 3.6) Mapa *hillshade* de la zona de estudio. En el recuadro se señala la zona de interés para delimitar depósitos secundarios.

Trabajo de campo

Se visitaron un total de 24 afloramientos alrededor del volcán, dentro de los cuales primeramente se obtuvieron las coordenadas geográficas y se identificaron los depósitos presentes así como su relación estratigráfica, se midió con flexómetro el espesor de los depósitos así como el tamaño de los clastos más representativos. Con esto se confirmó o corrigió la información interpretada de las imágenes satelitales y los mapas anteriormente mencionados.

Adicional a los afloramientos visitados, se realizó el análisis de vistas panorámicas en algunos lugares alrededor de La Malinche.

4. Resultados

En la Figura 4.1, se encuentran todos los puntos visitados, aquellos que tienen etiquetas corresponden a los afloramientos que permitieron mejores interpretaciones de los cuales se presentan esquemas, perfiles y/o columnas estratigráficas.

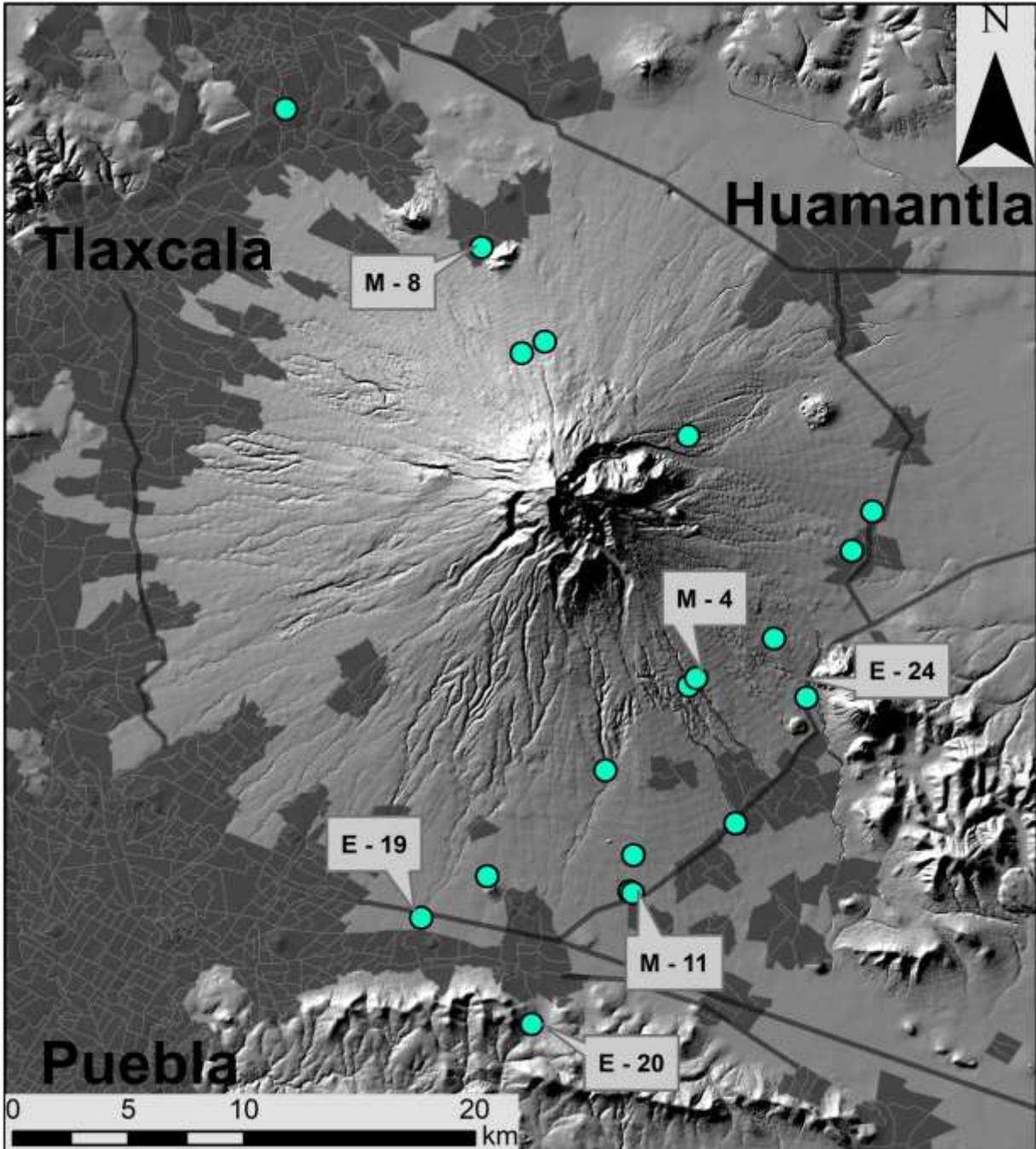


Figura 4.1) Afloramientos visitados alrededor del volcán La Malinche. Los puntos con etiqueta corresponden a afloramientos más representativos, y descritos a mayor detalle.

4.1. Delimitación de depósitos secundarios al Sur de La Malinche

En el punto E-20 se encontró el depósito de la avalancha en contacto con los carbonatos al sur de La Malinche (Figura 4.2). Se observó que la avalancha ascendió algunos metros sobre las laderas de los carbonatos disminuyendo la pendiente de esta barrera topográfica. Este proceso es detallado en el trabajo de Gutiérrez-Elorza (2008), que menciona que la masa desplazada tiende a ir descendiendo por la ladera hasta que pierda su energía, siempre que el volumen en desplazamiento no se tope con alguna barrera topográfica que impida dicho movimiento; en estos casos parte del material en colapso tiende a ascender por la ladera que se opone al movimiento.

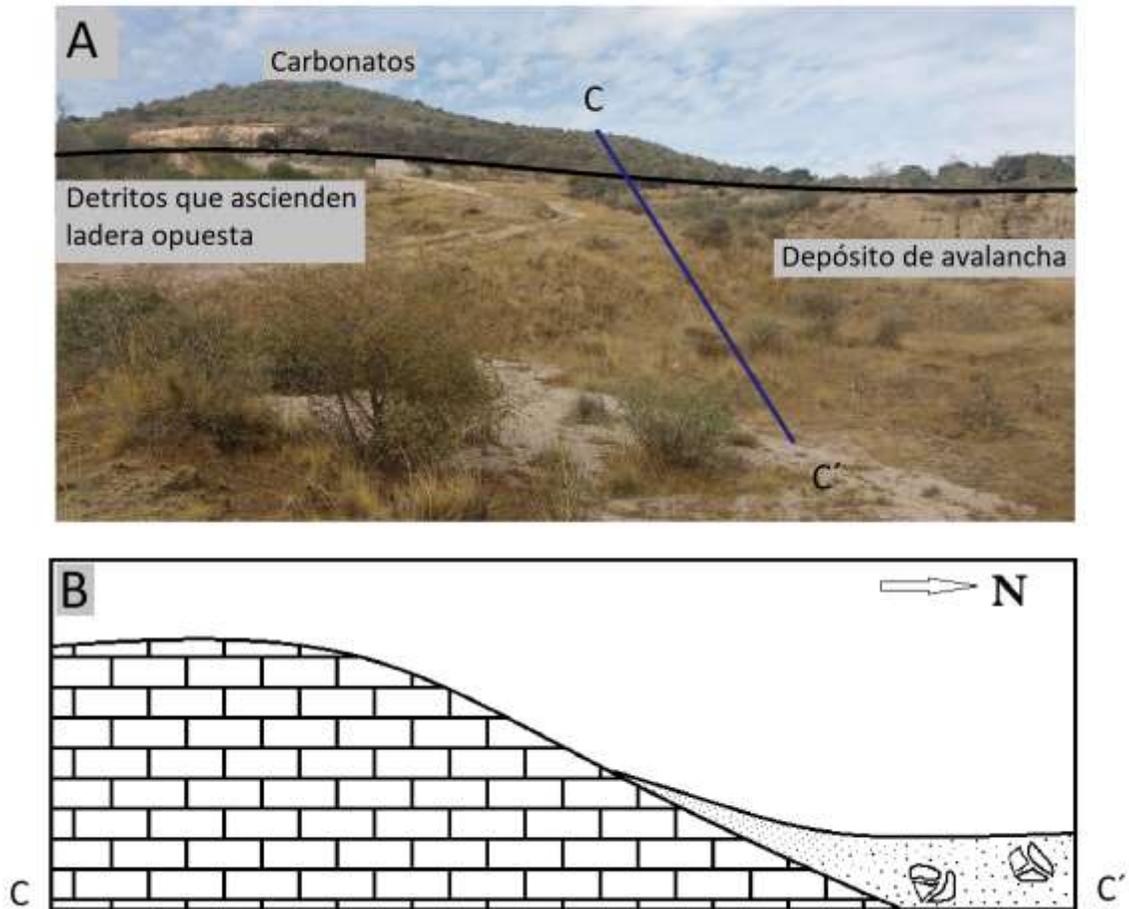


Figura 4.2) Contacto entre depósitos de avalancha y carbonatos al sur de La Malinche en afloramiento E-20. A) Fotografía panorámica del afloramiento con interpretación del emplazamiento de la avalancha. B) Esquema resaltado del perfil del afloramiento.

En el afloramiento E-19, dentro de la barranca al este de la ciudad de Puebla (sin nombre) al sur del volcán, se identificó un depósito de flujo piroclástico suprayaciendo al de la avalancha; ambos atravesados por la barranca donde se tiene depósito de lahar (Fig. 4.3). El flujo piroclástico contiene carbón con diámetro menor a 2 cm y se puede apreciar una leve estratificación.

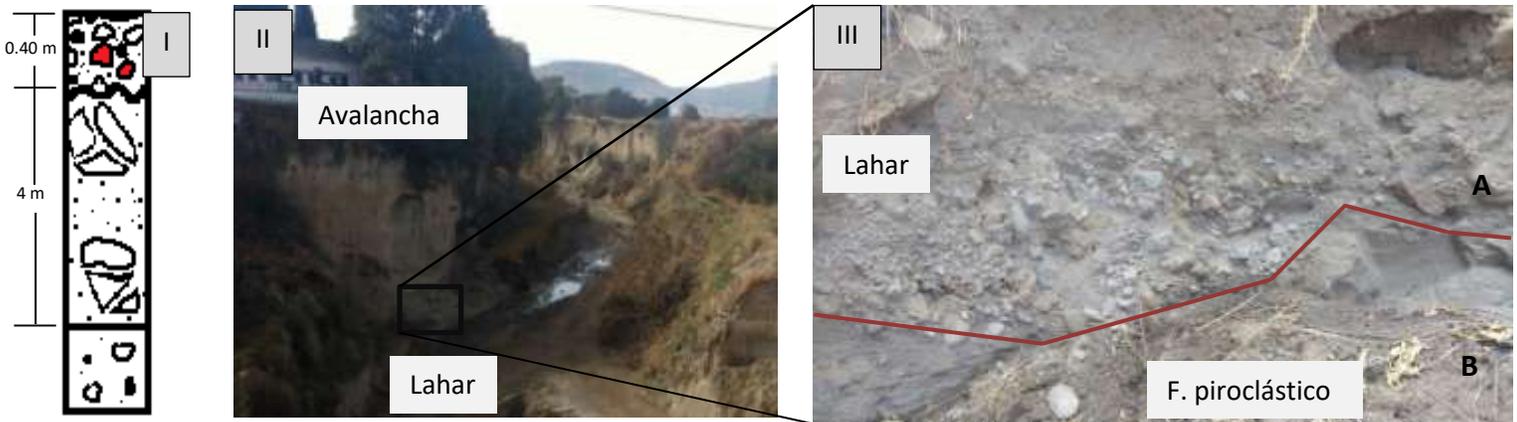


Figura 4.3) Depósitos en afloramiento E – 19. I. Columna estratigráfica. A la base se tiene un flujo piroclástico de ceniza y pómez, con presencia de carbón, seguido de depósito de avalancha, ambos erosionados y finalmente coronados con el depósito de un lahar. II. Fotografía panorámica del afloramiento, se aprecia principalmente el gran depósito de la avalancha que forma las paredes de la barranca y, en algunos puntos un pequeño escalón a la base de la barranca que corresponde a depósito de lahar. III. Acercamiento a una de las paredes de la barranca A) Depósito de lahar. B) Flujo piroclástico con una ligera estratificación, en algunos puntos cruzada y en otros paralela.

En el punto M – 11, junto a la carretera federal 129 Acajete – Teziatlán, en la zona distal del abanico aluvial SSE de La Malinche, se encontraron grandes afloramientos dada la presencia de minas, las cuales explotan la arena para material de construcción. Dentro de este punto se puede apreciar una gran secuencia de depósitos aluviales, fluviales y de lahar; de al menos 15 m de altura (Fig 4.4). El espesor máximo dentro de la secuencia de depósitos, es de 1 m; aunque la mayoría rondan los 20 cm. Los lahares contienen líticos de hasta 15 cm de diámetro y pueden apreciarse principalmente en forma de lentes, aunque dada la dirección del corte del talud, en algunos puntos se ven de forma tabular.



Figura 4.4) Afloramiento en punto M – 11, mina dentro del abanico aluvial al SSE de La Malinche. A) Fotografía de la mina, la pared tiene 15 m de altura. B) Acercamiento a una de las paredes de la mina, donde se aprecia un lente formado por el depósito de un lahar.

Dentro del punto E – 24, a la base de los volcanes monogénicos del Cerro Tintero y Cerro El Pinal, entre La Malinche y los carbonatos al SE, se encuentra un depósito de avalancha que Castro-Govea (2007) separa de la avalancha de los afloramientos E-19 y E-20. Esta avalancha se encuentra sobre depósitos de lahar que continuaron formándose también después del colapso del sector E del volcán, por lo que en algunos puntos en superficie aflora la avalancha, mientras que en otros los depósitos de lahar (Fig. 4.5). Un rasgo distintivo de las avalanchas, es que la avalancha en el punto E – 24 tiene un menor espesor, que la vista en los puntos E – 19 y E – 20, aun encontrándose a menor distancia de la cima del volcán.

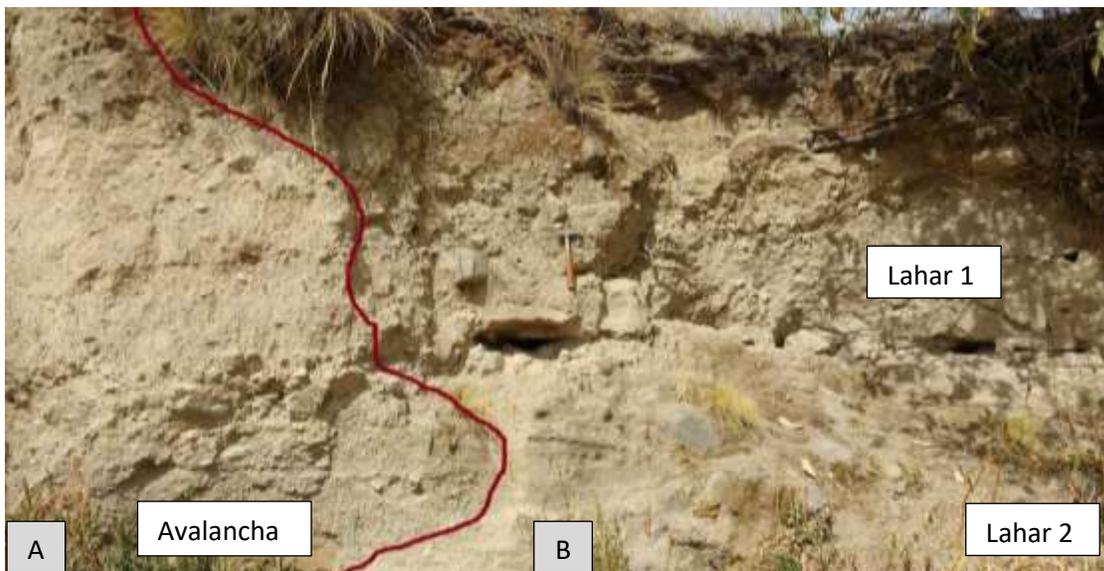


Figura 4.5) Afloramiento en punto E – 24. A) Depósito de avalancha con altura de 2 m, cortado por depósitos de lahares. B) Depósitos de lahares. Se aprecia la presencia de al menos 2 eventos de lahares distintos, cada uno con bloques de hasta 30 cm y un espesor

Finalmente en el punto M – 4, ubicado al este de la zona proximal del abanico aluvial SSE de La Malinche, se buscó saber si el abanico aluvial al SSE de La Malinche, sería el factor geológico que delimite las avalanchas del S y del E del volcán. En este punto se encontraron diversos depósitos con diferente origen, incluyendo el depósito de avalancha con 3 m de espesor (Fig. 4.6).

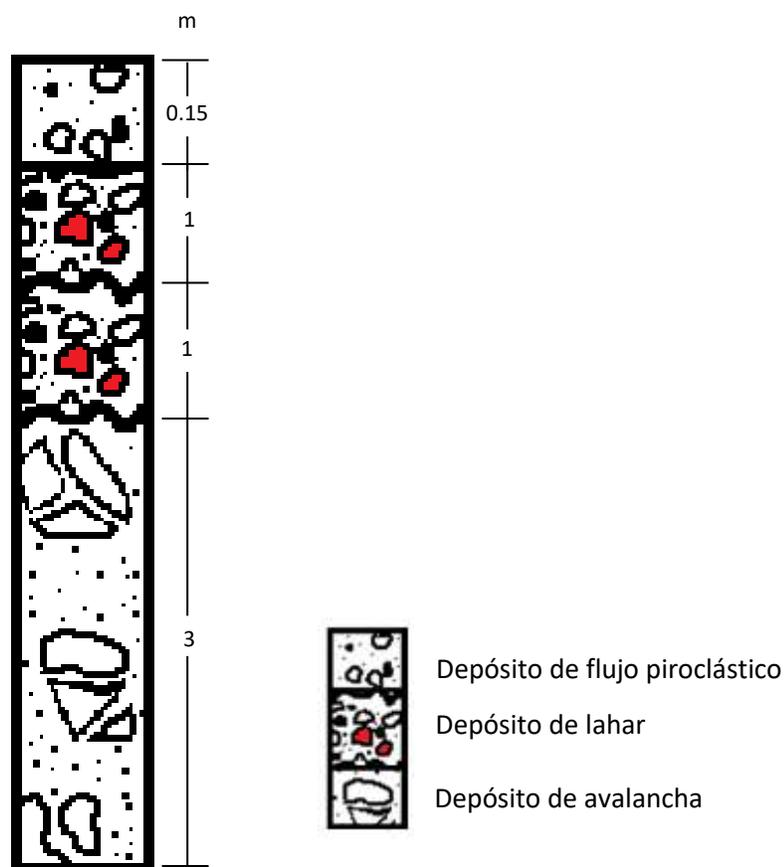


Figura 4.6) Columna estratigráfica del punto M – 4. Primeramente se tiene el depósito de una avalancha, con espesor de 3 m. A éste le sobreyacen un par de depósitos de lahar que se pueden diferenciar por presentar gradación normal y espesor de 1 m cada uno. Finalmente se encuentra un flujo de pómez de color blanco, con contenido de carbón menor a 2 cm, con un espesor de 15 cm.

La avalancha al sur de La Malinche fue identificada en todos los afloramientos en el área de interés siendo, en superficie, el principal depósito de la zona comprendida entre los abanicos aluviales del sector sur del volcán. Fue dentro de las barrancas, donde pudieron apreciarse distintos depósitos, principalmente lahares y flujos piroclásticos, los primeros

se restringen únicamente a las barrancas, mientras que los flujos piroclásticos deben tener continuidad debajo de los depósitos secundarios.

Con la información de los anteriores 5 puntos fue posible detallar el emplazamiento de los depósitos secundarios en el sector sur de La Malinche, con lo que se realizó la modificación del mapa geológico de Castro-Govea (2007) en esta área (Fig. 4.7). Con este mapa, es posible identificar con mayor precisión la distribución de los lahares al sur del volcán y de esta manera evaluar mejor el peligro de lahares en La Malinche.

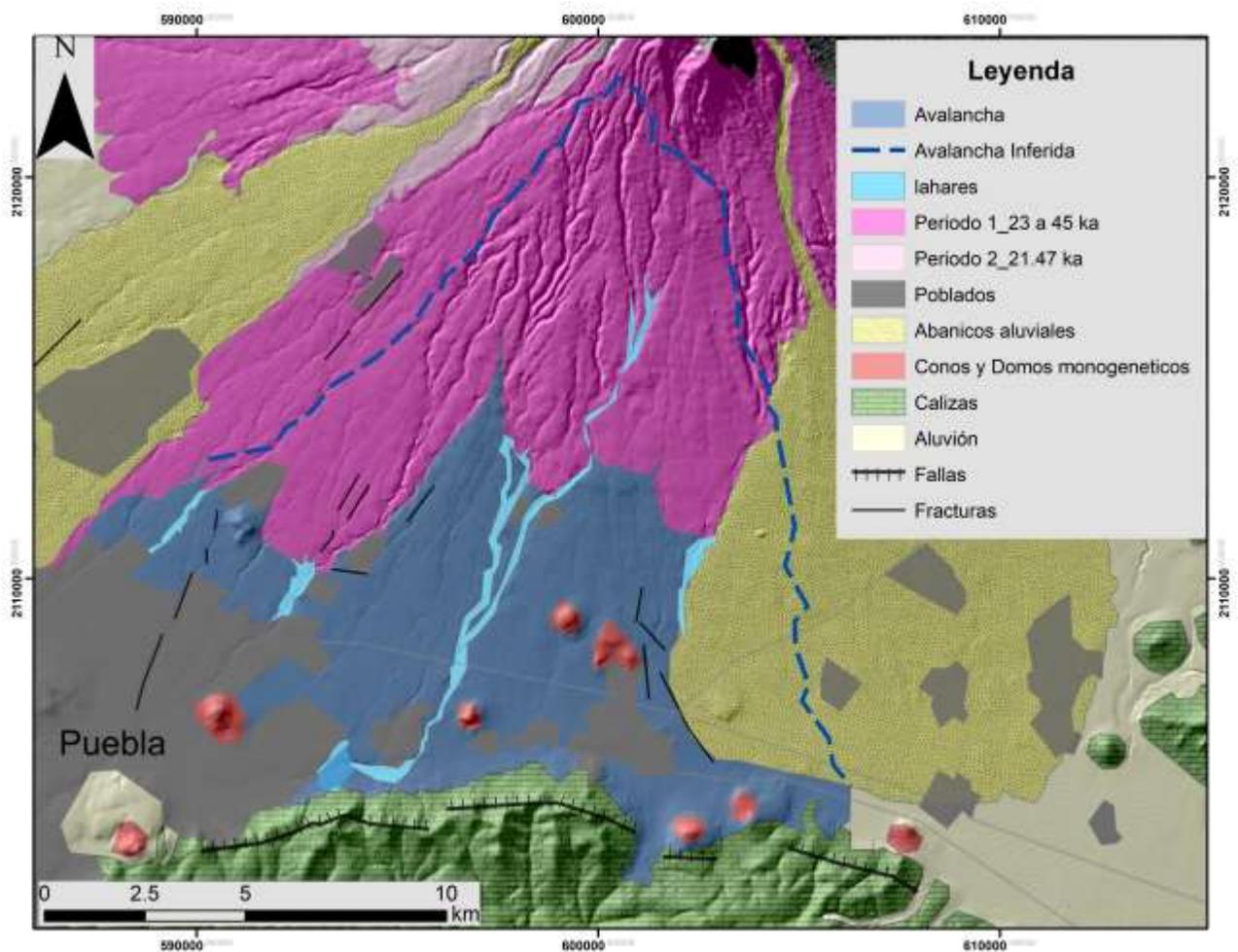


Figura 4.7) Delimitación de los depósitos de lahares y avalancha al sur del volcán La Malinche.

4.2. Limitantes para lahares alrededor de La Malinche

Dado que en el subcapítulo 4.1 se pudo conocer la ubicación de depósitos de lahares únicamente al sur de La Malinche, en este subcapítulo se verán algunos puntos y rasgos geomorfológicos que afectan el emplazamiento de lahares en el resto de los alrededores del volcán.

Primeramente, sobre la autopista 150 México – Puebla, al NW de la ciudad de Puebla; se tomó una fotografía panorámica del volcán (Fig. 4.8) donde se puede apreciar que al dirigirse hacia La Malinche sobre la autopista, uno se encuentra descendiendo topográficamente sobre los depósitos de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl.



Figura 4.8) Vista del volcán La Malinche. Morfológicamente se desciende de los depósitos de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl, hasta comenzar depósitos de La Malinche.

Siebe et al. (1996), mencionan que estos depósitos corresponden a lahares provenientes de los volcanes y, fueron generados gracias a las últimas 3 grandes erupciones del volcán Popocatepetl, que fueron de tipo Pliniano con edades de entre 4,800-5,200 a A.P.; 2,200-2,800 a A.P. y 675-1,095 a d.C. Estos eventos depositaron gran cantidad de material, principalmente al E y NE del Popocatepetl y al E y SE del Iztaccihuatl, el cual fue removilizado en forma de lahares que alcanzaron más de 35 km al E y S de estos volcanes. Los lahares cubrieron totalmente las localidades de Cacaxtla y Cholula y cubrieron parcialmente la hoy ciudad de Puebla. Los lahares generados en el volcán Popocatepetl no

contactan los depósitos de La Malinche, sin embargo, los lahares generados en el volcán Iztaccihuatl representan el límite al W y SW de los lahares modernos en La Malinche (Siebe et al., 1996; Fig. 4.9).

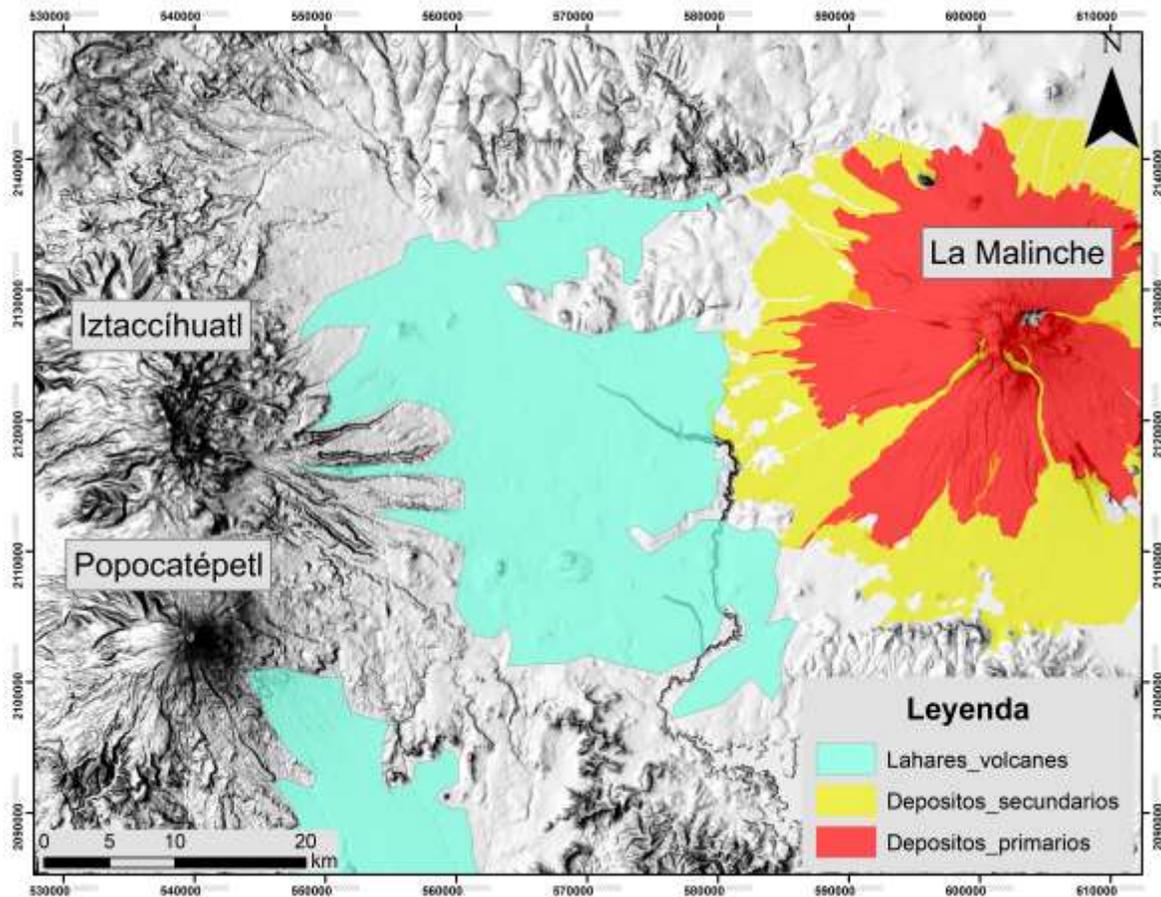


Figura 4.9) Lahares generados en laderas de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl principalmente con material expulsado por el Popocatepetl en las últimas 3 erupciones plinianas. Los lahares del Iztaccihuatl, presentan barrera morfológica para lahares de La Malinche. Modificado de Siebe et al. (1996) y Castro-Govea (2007).

Al NE y NW de La Malinche, para limitar los lahares se encuentran las barreras topográficas de los depósitos piroclásticos del Neógeno y del Pleistoceno, cada una acompañada de una secuencia lacustre.

Se intentó delimitar el alcance y orientación de los lahares al N de La Malinche, sin embargo en ninguno de los puntos visitados al norte del volcán se encontraron depósitos de lahares. Dentro del punto M- 8, se pudo encontrar la mayor secuencia de depósitos al norte de La Malinche (Fig. 4.10).

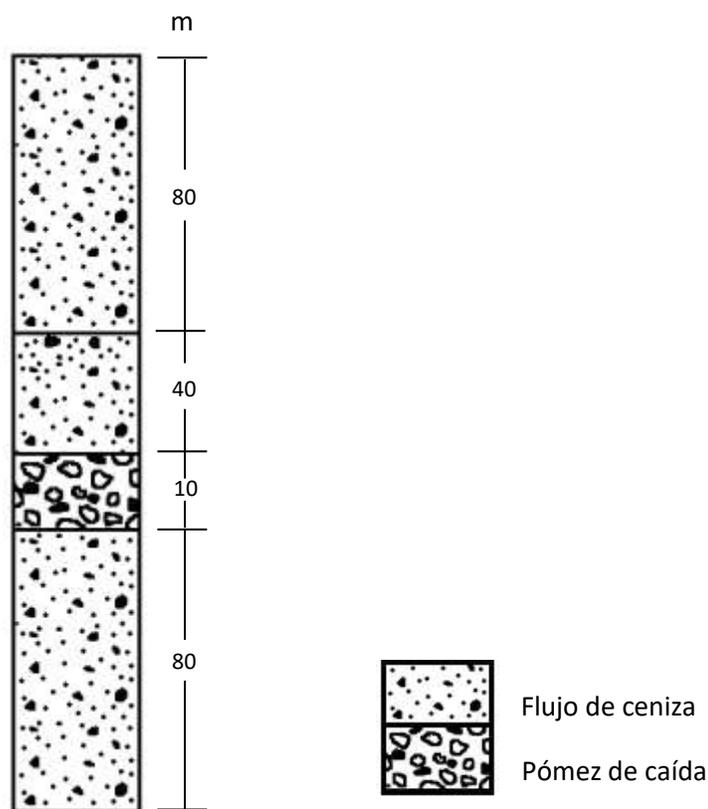


Figura 4.10) Columna estratigráfica del punto M – 8, al N de La Malinche. A la base se tiene un flujo de ceniza color ocre, seguido de pómez de caída blanca subredondeada; a ésta le sobreyace un nuevo horizonte de flujo de ceniza, ahora de menor espesor pero del mismo color. La secuencia se encuentra coronada con un último horizonte de flujo de ceniza, en esta ocasión de color amarillo pálido. Todos los depósitos tienen carbón en tamaños menores a 2 cm.

Al SE de La Malinche, se delimitan los lahares por los carbonatos en esta zona, junto con la secuencia San Fermin, que desvían los lahares hacia el sur y, finalmente al E del volcán, no se encontró ninguna barrera topográfica que desviara los lahares generados en esta ladera de La Malinche.

4.3. Simulación de Lahares

Se realizaron las simulaciones de las barrancas correspondientes para cada uno de los 3 diferentes conos de energía y se obtuvo la Figura 4.11. En esta se puede observar que al W, NW y N se mantienen lahares en todas las simulaciones, mientras que en el resto de los sectores el número de simulaciones disminuye gradualmente conforme se incrementa

la pendiente. También se puede observar que los volcanes monogénéticos representan barreras topográficas muy marcadas, y las simulaciones que se dirigen a estos rasgos morfológicos cambian drásticamente su dirección, dejando estas zonas como seguras al peligro de lahares. La mayor zona donde no se generan simulaciones, se encuentra al SE del Cerro El Pinal y el Cerro Tintero, donde afloran carbonatos; esta peculiaridad se explicará más adelante.

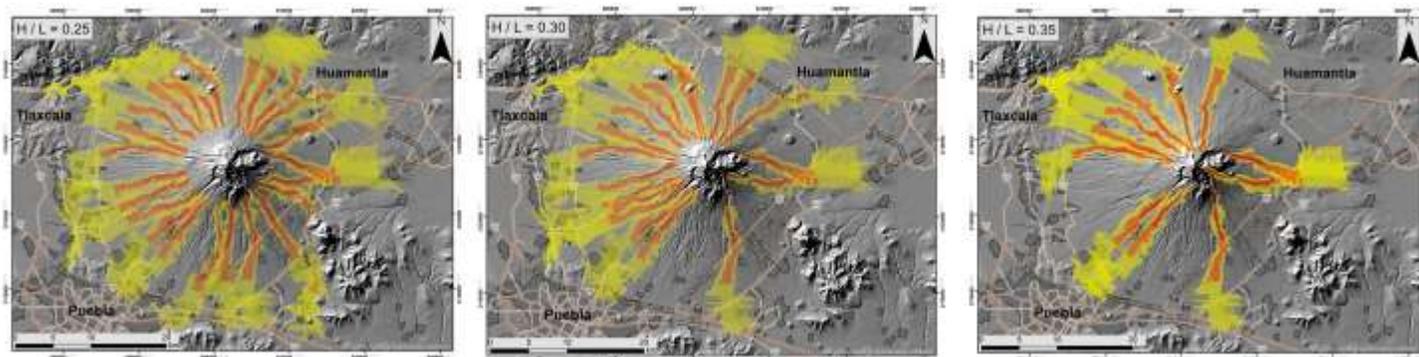


Figura 4.11) Simulaciones del peligro volcánico por lahares, con diferentes pedientes, asociados a La Malinche.

Para la simulación con pendiente $H/L=0.25$ (Fig. 4.12) se tienen lahares en casi todas direcciones, pues es donde más barrancas presentan eventos. Presenta 2 zonas significativas donde no se tienen lahares, la zona antes mencionada al SE de La Malinche y una menor área al N. Para el caso de la zona al SE las estructuras monogénéticas contribuyeron a la generación de barrancas profundas a sus alrededores, por lo que el único evento que se tenía dirigido hacia esta zona, se introduce en una gran barranca, cambiando su dirección hacia el S. Por otra parte, la zona descubierta al N, no tiene rasgos morfológicos que delaten cambio drástico de dirección del flujo, el cambio se da de manera gradual y se atribuye a la diferencia de elevaciones. Las ciudades de Puebla y Tlaxcala, se ven afectadas parcialmente solo por los eventos de bajo peligro; mientras que Huamantla, es afectado en su totalidad desde un evento de peligro medio.

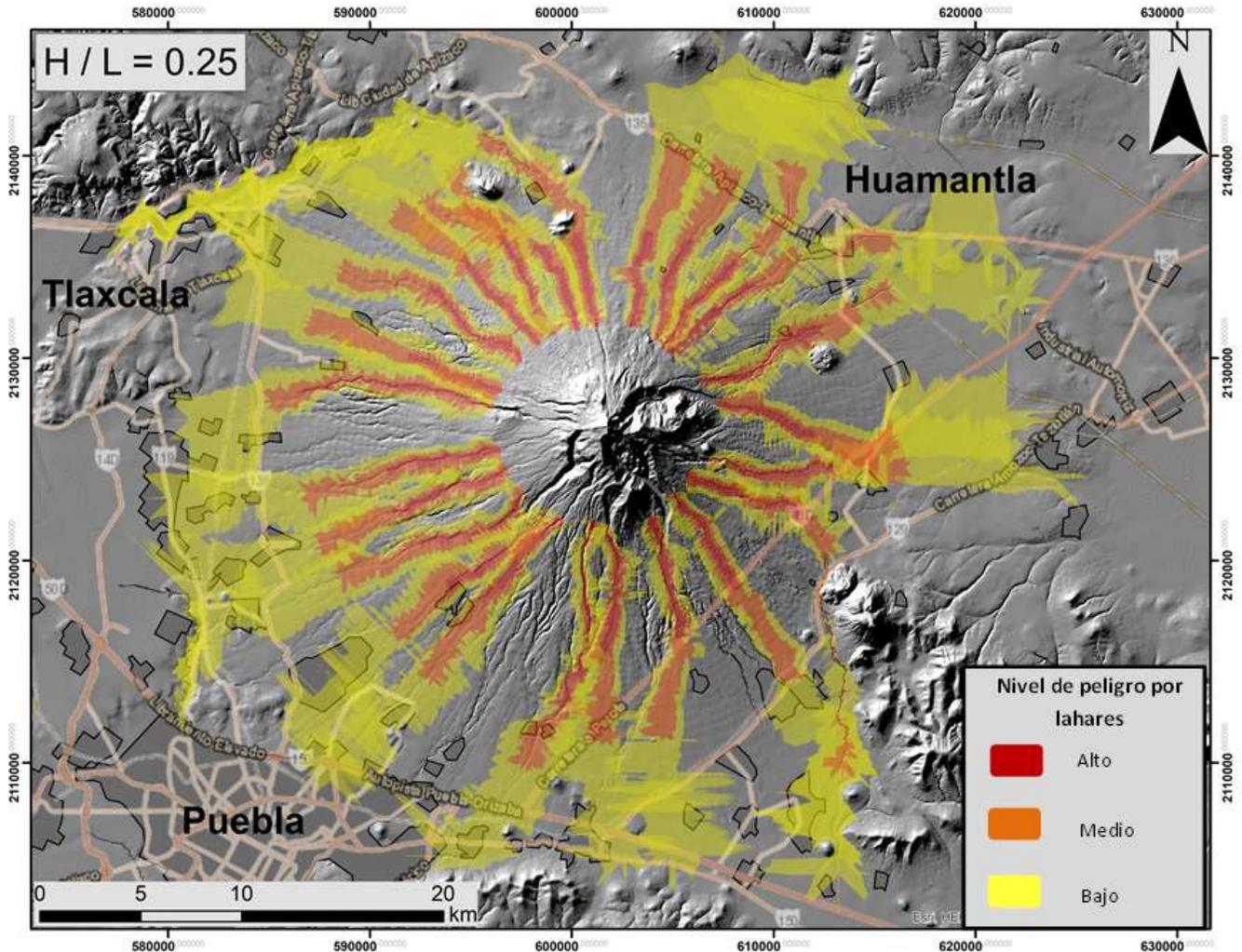


Figura 4.12) Simulación del peligro volcánico por lahares asociados a La Malinche en un cono de energía con pendiente $H/L=0.25$.

Las simulaciones con pendiente $H/L=0.30$ (Fig. 4.13) permiten ver que el área donde se encuentran emplazados los abanicos aluviales Malinche (Castro-Govea, 2007) no tienen susceptibilidad a lahares, excepto para el abanico SW. Presenta menos simulaciones al S y al SE, que es la zona donde se tiene el emplazamiento de las 2 avalanchas. Igual que en la simulación de pendiente $H/L=0.25$, las ciudades de Tlaxcala y Puebla se ven afectadas parcialmente por los eventos de peligro bajo, mientras que Huamantla sigue siendo afectado por eventos desde peligro medio.

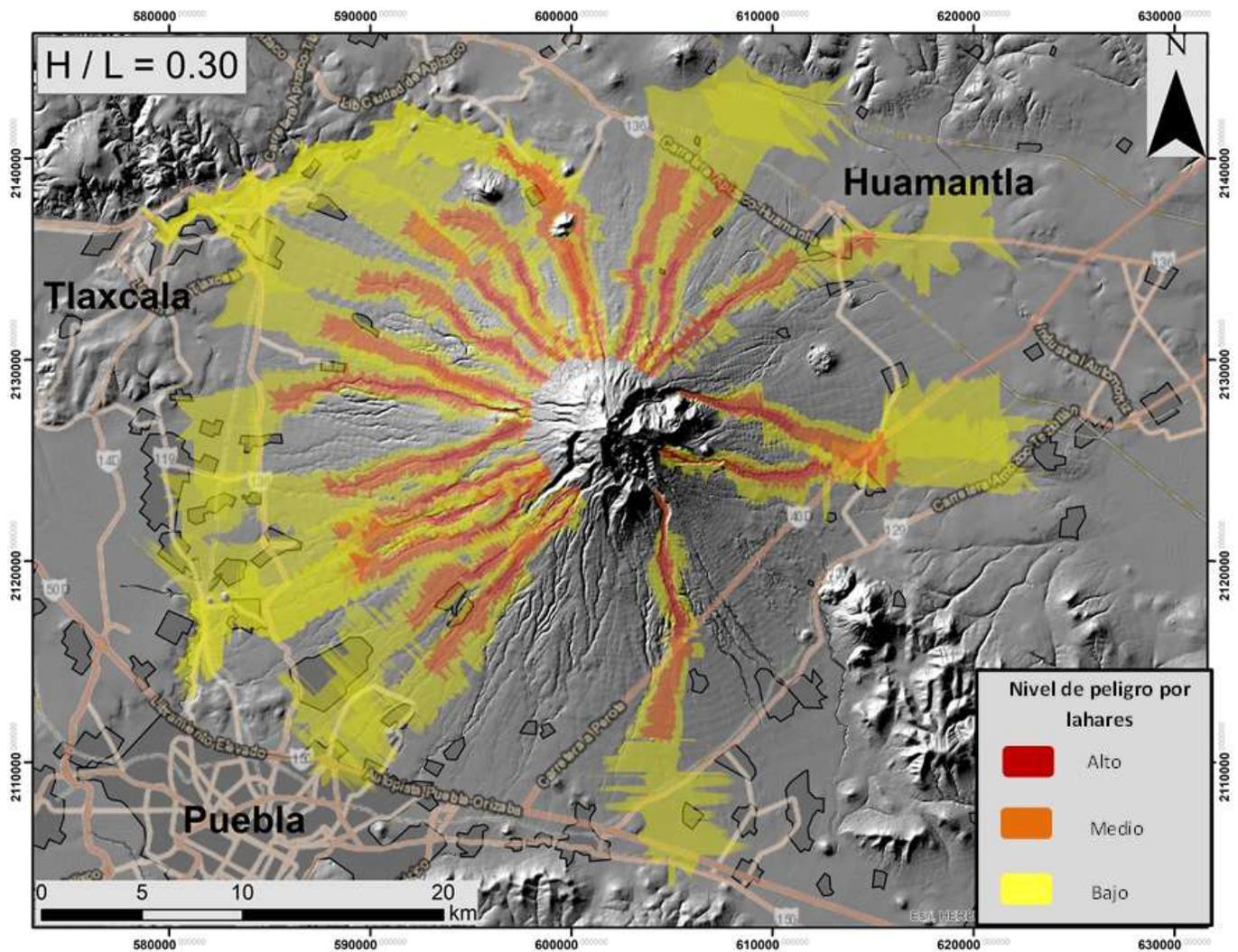


Figura 4.13) Simulación del peligro volcánico por lahares asociados a La Malinche en un cono de energía con pendiente $H/L=0.30$.

En el caso de la simulación de lahares con pendiente $H/L=0.35$ (Fig. 4.14) se tiene el menor número de barrancas simuladas. Las zonas con los abanicos aluviales no presentan simulaciones, excepto nuevamente por el abanico al SW, el cual presenta 2 eventos posiblemente dado que este abanico es el de menor dimensión de los 4. Igual que en las 2 simulaciones anteriores, las ciudades de Tlaxcala y Puebla se ven afectadas parcialmente por eventos de bajo peligro, sin embargo, la ciudad de Huamantla ahora no presenta ningún peligro.

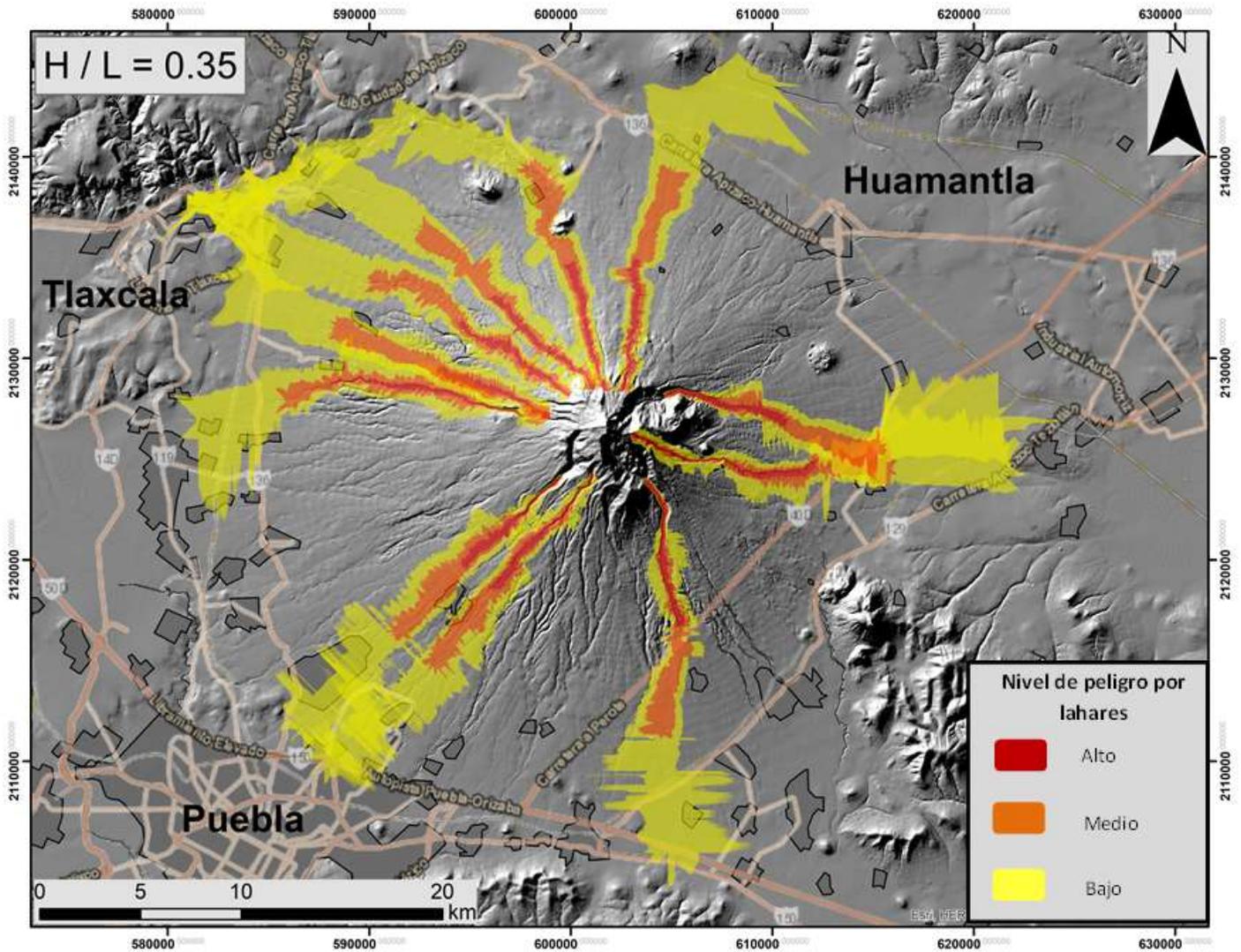


Figura 4.14) Simulación del peligro volcánico por lahares asociados a La Malinche en un cono de energía con pendiente $H/L=0.30$.

5. Discusión

Las simulaciones no abarcan gran parte de las laderas N, NE y SE. Esto se debe a que muchas de las barrancas en estas laderas no son lo suficientemente grandes para ser mapeadas, o detectadas dentro del DEM.

Hacia la ladera occidental de La Malinche, todas las simulaciones concordaron con lo esperado, al toparse con la topografía generada por los depósitos del Iztaccihuatl y abrirse en forma de abanicos asimétricos, con tendencia hacia el sur. En contraste con los lahares de la ladera oriental, donde los abanicos se abren de manera asimétrica hacia el norte, dada la presencia de los Carbonatos al SE y la Secuencia San Fermín.

Debido a las avalanchas presentes en el volcán La Malinche en la ladera S y E, para la simulación de lahares era de esperarse que en estas zonas no se tengan muchos eventos, sin embargo, la Figura 4.12, muestra varios lahares que corren dentro de estas direcciones, algunos lahares ya se han generado y pudieron encontrarse depósitos en campo. No obstante, dadas las avalanchas en el volcán es muy poco probable que se genere removilización de material, donde el volcán ya ha perdido grandes volúmenes de masa, de forma tal, que la simulación obtenida en la Figura 4.12 no se ajusta totalmente a las condiciones actuales del volcán.

Mientras tanto, la Figura 4.13 y la Figura 4.14, tienen una menor cantidad de lahares simulados, sin incluir eventos dentro de las áreas circundantes al volcán donde ya haya sido removilizada gran cantidad de material; dejando el espacio de las avalanchas al S y al E con pocos lahares, los cuales son generados desde barrancas profundas que llegan cerca de la cima del volcán.

Aunque el peligro volcánico mas posible en La Malinche es el de lahres Angúlo-Carrillo et al. (2013), plantean la posible reactivación de La Malinche, principalmente por sismos volcanotectónicos en la ladera norte del volcán; incluidos un par de sismos de tornillo, que suelen ser precursores a explosiones volcánicas.

Por otra parte, con la información recolectada en campo, se pudo encontrar que los lahares en la ladera sur se limitan principalmente a las barrancas, por lo que se esperaría que las simulaciones de los lahares se asemejen a lo presentado por Castillo-Rodríguez et al. (2010) como valles. Sin embargo las simulaciones se emplazan cientos de metros alrededor de éstos.

La Figura 4.12 deja ver el espacio correspondiente a los abanicos aluviales SSE y E, sin embargo presenta lahares dentro de los abanicos W y SW. Esto se debe principalmente a que en la historia del volcán no se han presentado grandes removilizaciones de masa hacia estas laderas del volcán. Esto mismo sucede en la Figura 4.13, donde el único abanico aluvial donde corren simulaciones de lahares es en el abanico al SW. Este rasgo distintivo entre la Figura 4.12 y la Figura 4.13 se debe a la diferencia entre los abanicos aluviales al SW y al W, ya que, como se puede ver en la Figura 3.3, hacia el W existe mayor cantidad de depósitos secundarios asociados al volcán, los cuales Castro-Govea (2007) clasificó como lahares de La Malinche, sin embargo se encuentran mapeados de manera general.

Hacia la ladera sur del volcán, fueron pocos los lahares que alcanzan a contactar con los carbonatos en esta zona. Sin embargo, contrario a lo que se esperaba por lo visto en campo, los lahares solamente se encañonan dentro de las barrancas para el escenario de peligro alto, mientras que el para los escenarios de medio y bajo peligro, los eventos exceden las barrancas por cientos de metros. Esto puede haberse generado por la precisión del DEM utilizado, ya que muchas de las barrancas encontradas al sur del volcán son menores a 15 m, que es la resolución del archivo utilizado.

El abanico aluvial al SW, es el único de los 4 principales abanicos aluviales de La Malinche, que queda cubierto totalmente por las simulaciones de los lahares, en todas las pendientes. Al analizar los tamaños de los 4 abanicos, se nota que éste, es el de menor tamaño; es decir, donde menos material se ha desplazado; por lo cual se justifica que en esta dirección sea constante la presencia de lahares, aún sobre el abanico.

Tomando en cuenta las erupciones del volcán, se observó que los depósitos eruptivos más recientes de La Malinche se emplazaron preferencialmente hacia el NW, N, NE, E y ESE; por lo que dentro de todas las simulaciones existen lahares en estas direcciones.

Las estructuras monogenéticas que se encuentran dentro del camino de los lahares simulados, representan barreras topográficas, desviando así la dirección de los lahares. Esto se puede apreciar principalmente al norte del volcán, donde los lahares son desviados al NE y al NW. Sin embargo, en campo no se encontró evidencia de depósitos de lahares emplazados en este sector del volcán (Fig. 4.11).

En el mapeo de las grandes localidades alrededor de La Malinche de Castro-Govea (2007), no se delimitan todas las localidades que se encuentran actualmente. Por lo que en la Figura 4.15, se muestra la simulación de los lahares que se decidió más representativa del peligro, la de pendiente $H/L = 30$, junto con las localidades actuales alrededor del volcán, obtenidas del sitio web Beta del INEGI (2017).

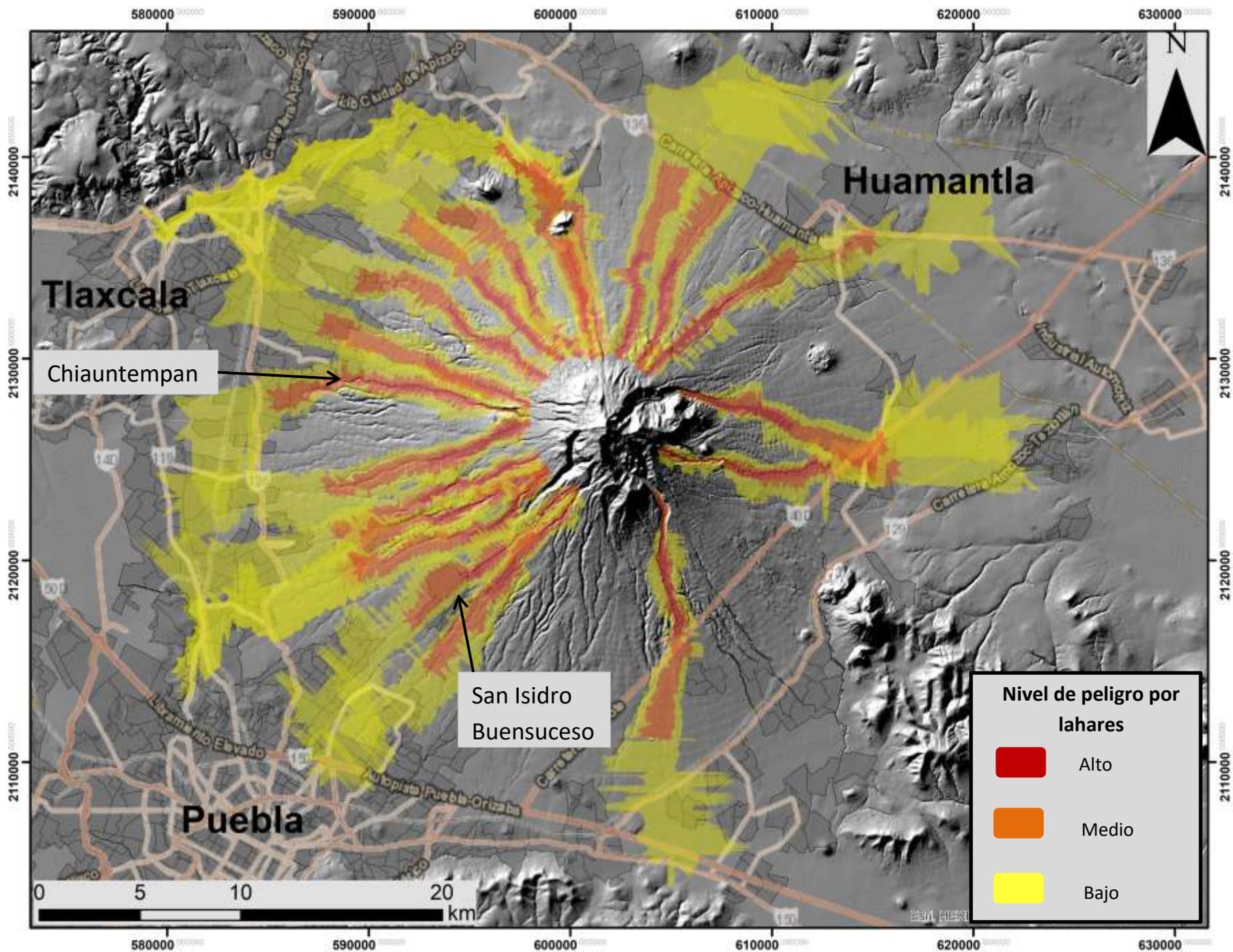


Figura 4.15) Evaluación del peligro volcánico por lahares para el volcán La Malinche. Se señalan poblados expuestos a alto peligro por lahares.

Cabe destacar, que existen 2 áreas urbanizadas que se ubican dentro de las zonas de alto peligro por lahares alrededor de La Malinche (Fig. 4.15). Estas localidades son 1) el poblado de San Isidro Buensuceso, 10 km al SW del volcán, entre Puebla y La Malinche y; 2) el poblado de Chiautempan, 13 km al W del volcán, entre Tlaxcala y La Malinche. Dichos poblados no poseen un gran desarrollo urbano, pero sí la presencia de infraestructura y vidas cuya pérdida puede prevenirse; por lo cual es importante estudiar más la probabilidad de ocurrencia de lahares, y en dado caso, desarrollar proyectos de obras para el desvío de lahares y/o brindar educación a los habitantes en estos poblados para tener capacidad de respuesta en caso de emergencia. Ambos estudios son temas para desarrollo de nuevas investigaciones.

Para el escenario de peligro medio, únicamente la ciudad de Puebla no parece estar exenta del posible impacto de lahares, mientras que Tlaxcala es impactado por varios lahares, los cuales no alcanzan más de 2 km dentro de la ciudad, y Huamantla que con 1 solo lahar puede ser afectada en su totalidad.

Finalmente el escenario de bajo peligro por lahares, cruza en todas direcciones poblados alrededor de La Malinche. Aunque este escenario es el menos probable de ocurrir, no se puede descartar dada la presencia histórica de eventos de estas magnitudes, y en la actualidad, alcanzarían a cruzar parcial o totalmente las ciudades de Puebla, Huamantla y Tlaxcala.

Se encontró con la información de campo, que los lahares de bajo peligro tendrían espesores de alrededor de 50 cm, en las zonas más alejadas de la cima del volcán. Mientras que en los lahares de alto peligro, en la zona cercana a la cima del volcán, los lahares en promedio tienen 1 m de espesor y presentan clastos de hasta 30 cm de diámetro. Estas dimensiones son el escenario más probable, por lo que las medidas preventivas tienen pueden tomarse en torno a estos datos.

En cuanto al análisis de los depósitos secundarios, queda abierta también la investigación detallada de las laderas N, E y W, siguiendo una metodología similar a la usada en este trabajo para detallar la ladera S.

En el área de estudio existe información abundante sobre los depósitos primarios de La Malinche (Castro-Govea, 2007), sin embargo lo estudiado para los depósitos secundarios es muy pobre. Por esta razón en este trabajo se delimitaron los depósitos secundarios de la ladera sur, concretamente los depósitos clasificados como “Lahares Malinche” por Castro-Govea (2007). Se encontró que en su mayoría eran depósito de la avalancha que menciona este autor pero que no presenta en los mapas y; los lahares de La Malinche se limitan a las barrancas.

El DEM utilizado para este trabajo no tiene una resolución suficiente para modelar correctamente la ubicación de los lahares, principalmente en las laderas al sur y al este, donde a pesar de tener muchas barrancas, la mayoría de ellas no son lo suficientemente anchas para que las simulaciones corran correctamente dentro de ellas. Por ello, es recomendable realizar también más estudios de las barrancas angostas alrededor del volcán, principalmente las que llegan a ascender sobre las laderas de La Malinche y, estudiar el posible emplazamiento de lahares dentro de ellas.

Conclusiones

Con la información de este trabajo se confirma que el peligro volcánico de más factible ocurrencia para La Malinche, en un tiempo próximo, es el de Lahares.

La distribución de los depósitos secundarios en la ladera sur de La Malinche, es diferente a lo propuesto por Castro-Govea (2007). La avalancha al S, tiene un alcance de 22 km hasta las calizas de la formación Maltrata y cubre la mayor parte de la ladera. Los lahares, por otra parte, se reducen a menores áreas, ocupando predominantemente las barrancas.

El alcance de los flujos piroclásticos hacia el sur, es mayor al previamente identificado.

El escenario de peligro alto, con lahares de 500,000 m³ impactan los poblados de San Isidro Buensuceso y Chiauntepan, al SW y W del volcán. Mientras que para el volumen de 1,000,000 m³ los lahares impactarían las ciudades, Huamantla y Tlaxcala, ambas con un mayor desarrollo de infraestructura. Finalmente el escenario de 10,000,000 m³ afecta también a la ciudad de Puebla, y a pesar de ser el escenario de peligro bajo, existe evidencia de campo con eventos de dichas magnitudes.

Los lahares causan grandes impactos en el país en promedio una vez cada cinco años, de los cuales, el 50% se presentan en estratovolcanes (Tabla 1.1), actualmente La Malinche, es el único estratovolcán que al parecer no ha presentado lahares que dañen a los poblados de sus alrededores, sin embargo es un peligro latente dadas las dimensiones del volcán y los pocos estudios realizados sobre los peligros asociados a este volcán.

Esta investigación puede detallarse mejor, complementándolo con más estudios en la zona y más visitas a campo, principalmente en las laderas N y W, siguiendo una metodología similar a la presentada en este trabajo.

Referencias

- Alaníz, S.A., Nieto A.F., Tolson, G., 2004. LGM: Léxico Geológico Mexicano. Sociedad Geológica Mexicana, A. C., México, p. 130.
- Alcántara-Ayala, I., 2010. Disasters in Mexico and Central America: A Little Bit More Than a Century of Natural Hazards. Cap. 4, p. 75-97. En Latrubesse, E., 2010. Natural Hazards and Human-Exacerbated Disasters in Latin America. Special Volumes of Geomorphology. Developments in Earth Surface Processes, Elsevier. Gran Bretaña, vol. 13, p. 510.
- Angulo-Carrillo, J., Lermo-Samaniego, J. F., Martínez-González, J. A., Valseca, R. 2013. La Malinche un Volcán potencialmente Activo. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica XIX.
- Ávila-Pérez, E., 2003, martes 10 de junio.. Aún Hay 30 Desaparecidos en Veracruz. El Universal. Sec. Estados.
- Blong, R. J., 1984. Volcanic Hazards. A Sourcebook on the Effects of Eruptions. Academic Press, Australia, p. 424.
- Bitrán-Bitrán, D., 2001. Características del Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en México en el Periodo 1980-99. Secretaría de Gobernación., Centro Nacional de Prevención de Desastres. México, p. 107.
- Bitrán-Bitrán, D., Jiménez-Espinosa, M., Eslava-Morales, H., Salas-Salinas, M. A., Vázquez-Conde, M. T., Matías-Ramírez, L. G., Camacho-Quintana, K. S., Acosta-Colsa, L., 2001. Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el Año 2000. Secretaría de Gobernación., Centro Nacional de Prevención de Desastres. México, p. 99.
- Bitrán-Bitrán, D., Domínguez-Morales, L., Durán-Hernández, R., Fuentes-Mariles, O., García-Arróliga, N., Jiménez-Espinosa, M., López-Bátiz, O., Matías-Ramírez, L. G., Reyes-Salinas, C., Salas-Salinas, M. A., Zepéda-Ramos, O. 2003. Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana

en el Año 2002. Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Prevención de Desastres. México, p. 173.

- Burgisser, A., Bergantz, G. W. 2002. Reconciling Pyroclastic Flow and Surge: The Multiphase Physics of Pyroclastic Density Currents. *Earth and Planetary Science Letters*. No. 202. P. 405-418.
- Caballero, L., Macías, J.L., García-Palomo, A., Saucedo, G.R., Borselli, L., Sarochi, D., Sánchez, J.M. 2006. The September 8-9, 1998 Rain-Triggered Flood Events at Motozintla, Chiapas, Mexico. *Natural Hazards*. No. 39. P. 103-126.
- Camiz, S., Poscolieri, M., Roverato, M., 2017. Geomorphometric comparative analysis of Latin-America volcanoes. *Journal of South American Earth Sciences*. Elsevier, v. 76, p. 47-52.
- Capra, L., Macías, J.L., Cortés, A., Dávila, N., Saucedo, R., Osorio-Ocampo, S., Arce, J.L., Gavilanez-Ruiz, J.C., Corona-Chávez, P., García-Sánchez, L., Sosa-Ceballos, G., Vázquez, R. 2016. Preliminary report of the July 10-11, 2015 eruption at Volcán de Colima: Pyroclastic Density Currents with exceptional runouts and volume. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. N. 310. P. 39-49.
- Carrasco-Núñez, G., Gómez-Tuena, A., Lozano, V. 1997. Geological map of Cerro Grande volcano and surrounding area, central Mexico. *Geological Society of America-Map and chart series MCH081*, Boulder Co. USA. P. 11.
- Cas, R.A.F., Wright, J.V. 1988. *Volcanic Successions: Modern and Ancient*. Chapman & Hall, London. P. 528.
- Castillo-Rodríguez, M., López-Blanco, J., Muñoz-Salinas, E., 2010. A Geomorphologic GIS-multivariate analysis approach to delineate environmental units, a case study of La Malinche volcano (central Mexico). *Applied Geography*, Elsevier, v. 30, p. 629-638.
- Castro-Govea, R., 1999. *Historia Eruptiva del volcán La Malinche*. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Tesis de maestría, p. 129.

- Castro-Govea, R., 2007. Historia eruptiva del volcán La Malinche y estudio del emplazamiento del flujo piroclástico Pilares Superior. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de La Tierra. Tesis de doctorado, p. 158.
- Castro-Govea, R., Siebe, C., 2007. Late Pleistocene-Holocene stratigraphic and radiocarbon dating of La Malinche volcano, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 162, p. 20-42.
- CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres; Secretaría de Gobernación; Cordinación Nacional de Protección Civil. 2013. Actividad del Volcán Popocatépetl 2013. Subdirección de Riesgos Volcánicos. Dirección de Investigación, México, p. 65.
- Dávila, N., Capra, L., Gavilanes-Ruiz, J.C., Varley, N., Norini, G., Gómez-Vázquez, A. 2007. Recent Lahars at Volcán de Colima (México): Drainage variation and spectral classification. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*. No. 165, p. 127-141.
- Delgado, H. 2001. Efectos de las Cenizas del Volcán Popocatépetl en la Aeronavegación. Cap. 10, p. 128-140. En Centro Nacional de Prevencion de Desastres e Instituto de Geofísica, UNAM; 2001. Las Cenizas Volcánicas del Popocatépetl y sus Efectos para la Aeronavegación e Infraestructura Aeroportuaria. CENAPRED e Instituto de Geofísica, UNAM. México, p. 157.
- Demant, A. 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación. Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México. Revista vol. 2 núm. 2. P. 172-187.
- Espinasa-Pereña, R., 2012. Historia de la Actividad del Volcán Popocatépetl: 17 Años de Erupciones. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, p. 65.
- Espinasa-Pereña, R., Martín-Del Pozzo, A. L. 2006. Morphostratigraphic evolution of Popocatépetl volcano, México. En Siebe, C., Macías, J.L., Aguirre-Díaz, G.J. 2006. Neogene-Quaternary continental margin volcanism: A perspective from Mexico. *Geological Society of America Special Papper*, no. 402. P. 101-123.

- Ferrari, L. 2000. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. V. 53, n. 1, p. 84-92.
- Fay, J.A., 1988. Modeling the Lake Nyos Gas Disaster. Short Communications. Atmospheric Environment, Great Britain. v. 22, p. 417-418.
- Ferrés-López, M.D., 2014. Estratigrafía, Geología y Evaluación de Peligros Volcánicos del Complejo Volcánico de San Salvador (El Salvador). Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Tesis de Doctorado, p. 296.
- Franco, R., 2017. Composiciones Landsat en ArcGis. Guía básica. Bogotá, Colombia, p. 45.
- Galas, A. 2016. Impact of Volcanic Eruptions on the Environment and Climatic Conditions in the Area of Poland. Earth-Science Reviews. No. 162, p. 58-64.
- Gavilanes-Ruíz, J.C. 2004. Simulación de Escenarios Eruptivos del Volcán de Colima y Aportaciones al Plan de Contingencias del Estado de Colima. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Tesis de Maestría. P. 122.
- Gavilanes-Ruíz, J.C., Cuevas-Muñiz, A., Varley, N., Gwynne, G., Stevenson, J., Saucedo-Girón, R., Pérez-Pérez, A., Aboukhalil, M., Cortés-Cortés, A. 2009. Exploring the factors that influence the perception of risk: The case of Volcán de Colima, México. Journal of Volcanology and Geothermal Research. No. 186. P. 238-252.
- Gill, R. 2010. Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide. Willey-Blackwell. Malasia, p. 428.
- Gómez-Tuena, A., Carrasco-Núñez, G., 2000. Cerro Grande volcano: the evolution of a Miocene stratocone in the early Trans-Mexican Volcanic Belt. Tectonophysics, 318. P. 249-280.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., Luca, F. 2005. Petrogénesis Ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.

Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas Selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVII. No. 3, p. 227-283.

- González-Alvarado, J. 1976. Resultados Obtenidos en la Exploración de la Plataforma de Córdoba y Principales Campos Productores. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volúmen 37. No. 2, p. 53-59.
- Google Earth Pro. S.F. (Mapa del volcán La Malinche). Recuperado el 1 de septiembre, 2017.
- Guha-Sapir, D., Hoyois, P, Below, R. 2013. Annual Disaster Statistical Review 2012: The Number and Trends. Université Catholique de Louvain collaborating of Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Bélgica, p. 42.
- Gutiérrez-Elorza, M. 2008. Geomorfología. PEARSON Prentice Hall, p. 898. España.
- Heine, K., 1988. Late Quaternary glacial chronology of the Mexican volcanoes. Die Geowissenschaften, v. 7, p. 197-205.
- Hoffer, J.M., Gomez, P.F., Muela, P. 1982. Eruption of El Chichón volcano, Chiapas, Mexico, 28 Marck to 7 April 1982. Science V. 218 p. 1307-1308.
- Imsland, P. 1989. Study Models for Volcanic Hazards in Iceland. Cap. 3. P. 36-56. En Latter, J. H., 1989. Volcanic Hazards: Assesment and Monitoring. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, p. 625.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2016. Carta Uso del Suelo y Vegetación "Ciudad de México" E14-2. México.
- Keller, E., 2005. Introduction to Environmental Geology. Third edition. Pearson, Prentice-Hall. New Jersey, E.E.U.U., p. 583.
- Lermo-Samaniego, J., Bernal-Esquia, I. 2006. Zonificación Sísmica del Estado de Tlaxcala, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Número especial de Geología Urbana. Tomo 58. No. 2, p. 215,221.
- Macías-Vázquez, J. L., Capra-Pedol, L., 2005. Los Volcanes y sus Amenazas. Primera edición. La Ciencia Para Todos, n. 210. Fondo Cultural de Economía. México, p. 159.

- Macías, J.L., Arce, J.L., Layer, P.W., Saucedo, R., Mora, J. C. 2015. Eruptive History of the Tacaná Volcanic Complex. Cap. 6, p. 115-138. En Scolamachia, T., Macías, J.L. 2015. Active Volcanoes of Chiapas (México): El Chichón and Tacaná. Active Volcanoes of the World. IAVCEI. Springer, p. 180.
- Manan, S. 2014. Leess' Process Safety Essentials: Hazzard Identification, Assasment and Control. First Edition. Butterword-Heinemann. E.E.U.U.A.A. p. 570.
- Martin-Del Pozzo, A.L., Alatorre-Ibargüengoitia, M., Arana-Salinas, L., Bonasia, R., Capra-Pedol, L., Cassata, W., Cordoba, G., Cortes-Ramos, J., Delgado-Granados, H., Ferrés-López, M.D., Fonseca-Álvarez, R., García-Reynoso, J.A., Gisbert, G., Guerrero-López, D.A., Jaimes-Viera, M.C., Macías-Vázquez, J.L., Nieto-Obregón, J., Nieto-Torres, A., Paredes-Ruíz, P.A., Portocarrero-Martínez, J., Renne, P., Rodríguez-Espinosa, D.M., Salinas-Sánchez, S., Siebe-Grabach, C., Tellez-Ugalde, E. 2016. Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del volcán Popocatépetl: Memoria técnica del mapa de peligros del volcán Popocatépetl. Monografías Instituto de Geofísica. P. 160.
- Mendoza-Margaín, C.E., 2010. Cartografía Geomorfológica del Complejo Volcánico Tacaná, México-Guatemala. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. Tesis de Licenciatura, p. 119.
- Mooser, F., Ramírez, M. T. 1987. Faja Volcánica Transmexicana: Morfoestructura Tectópnic y Vulcanotectónica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo XLVIII. No. 2.p. 75-80.
- Murcia, H.F., Macías, J.L. 2009. Registro Geológico de Inundaciones Recurrentes e Inhundación del 4 de octubre de 2005 en la Ciudad de Tapachula, Chiapas, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 26, num. 1. P. 1-17.
- Navarro-Moreno, C. L., 2011. Cálculo de Tefras Emitidas por el Volcán Parícutín Mediante la Comparación de Modelos Digitales de Elevación. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. Tesis de Licenciatura, p. 131.

- Nieto-Torres, A., 2015. Evaluación de los efectos a la salud asociados a la caída de ceniza del volcán Popocatepetl (1994-2008). Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Tesis de Maestría, p. 110.
- Nieto-Torres, A., Ferrés, D., Reyes-Pimentel, T. A., Espinasa-Pereña, R., Flores-Soto, X., Gonzáles-Huesca, A. E., Ramírez-Soto, A. 2013. Informe del Proyecto: Actividad del Volcán Popocatepetl Año 2012. Sistema Nacional de Protección Civil. Centro Nacional de Prevención de Desastres. P. 81.
- Niño-Estrada, L., 2016. Evaluación del peligro asociado a lahares en el volcán Nevado de Toluca, en el sector noreste. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Tesis de Licenciatura, p. 118.
- Paulin, G. L., Bursik, M., Ramírez-Herrera, M. T., Contreras, T., Polenz, M., Lugo-Hubp, J., Paredes-Mejía, L. M., Arana-Salinas, L. 2013. Landslide Inventory Mapping and Landslide Suceptibility Modeling Assessment on the SW Flank of Pico de Orizaba Volcano, Puebla-Veracruz, Mexico. Zeitschrift für Geomorphologie. Vol. 57,3. p. 371-385.
- Paulin, G.L., Bursik, M., Solene, P., Hubp, J.L., Paredes-Mejía, L.M., Aceves-Quesada, F. 2014. Inventario Multitemporal, Análisis de Susceptibilidad y Estimación de Volúmen de Deslizamientos en el Flanco SW del Volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 66, num. 2. P. 343-354.
- Pérez-Pérez, A. 2011. Evaluación de Peligro por Lahares en la Ladera SW del Volcán de Colima. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Tesis de Maestría, p. 95.
- Pioli, L., Erlund, E., Johnson, E., Cashman, K., Wallace, O., Rosi, M., Delgado-Granados, H., 2008. Explosive Dynamics of Violent Strombolian Eruptions: The Eruption of Parícutín Volcano 1943-1952 (México). Earth and Planetary Science Letters, vol. 271. p. 359-368.
- Rodríguez, S.R., Mora-Gonzalez, I., Murrieta-Hernández, J.L. 2006. Flujos de Baja Concentración Asociados con Lluvias de Intensidad Extraordinaria en el Flanco Sur

- del Volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Número Especial de Geología Urbana. Tomo LVIII. Num. 2. P. 223-236.
- Saucedo, R., Macías, J.L., Sarocchi, D., Bursik, M., Rupp, B., 2008. The Rain-Triggered Atenquique Volcaniclastic Debris Flow of October 16, 1955 at Nevado de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* vol. 172, p. 69-83.
 - Schilling, S. P., 1998. Laharz: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones, USGS, Open-File Report 98-638. Vancouver, Washington, E.E.U.U., p. 80.
 - Schilling, S. P., 2014. Laharz_py: GIS tool for Automated Mapping of Lahar Inundation Hazard Zones, USGS, Open-File Report 2014-1073. Reston, Virginia, E.E.U.U., p.78.
 - Schmincke, H.U., 2004. *Volcanism*. Springer-Verlag Berlin, Alemania, p. 324.
 - SGM. Servicio Geológico Mexicano. 2002. Carta Geológico-Minera “Ciudad de México” E14 – 2. México.
 - Siebe, C., Macías-Vázquez, J.L., Abrams, M., Obenholzner, J. 1966. La Destrucción de Cacaxtla y Cholula: Un Suceso en la Historia Eruptiva Popocatépetl. *Ciencias*. No. 41. P. 36-45.
 - Smith, G., Fritz, W., 1978. Volcanic influences on terrestrial sedimentation, *Geology*, Penrose conference report, v. 17 n. 4, p. 375-376.
 - Tarbuck, E., Lutgens, F., 2013. *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. 10ª edición. Pearson Educación S.A., Madrid, España, p. 880.
 - Tilling, R., 1993. *Los Peligros Volcánicos*. Apuntes para un curso breve. Organización Mundial de Observatorios vulcanológicos, New Mexico, E.E.U.U., p. 125.
 - Voight, V., 1990. The 1985 Nevado del Ruíz volcano catastrophe: anatomy and retrospection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. No. 44, pag. 349-386.

- Weyl, R., 1974. Determinación y clasificación de las rocas volcánicas en la región Puebla-Tlaxcala. Comunicaciones 10, p. 69-71.
- White, J.D.L., Houghton, B.F., 2006. Primary Volcaniclastic Rocks. Geological Society of America. Geology v. 34, p. 667-680.

Páginas web

- Instituto Nacional de Estadística (INEGI), 2017. Sitio Beta. Espacio y Datos de México: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2008. División Política Estatal 1:250,000. Ciudad de México, México. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/destdv250k_2gw.xml? xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl& indent=no