

Mapa de Escenarios de Amenaza del Volcán de San Miguel

6.1. Definición de Amenaza o Peligro Volcánico

Amenaza o peligro volcánico es la probabilidad de que los materiales expulsados por un volcán en erupción afecten un área específica durante un período de tiempo determinado.

Existen diferentes tipos de amenazas o peligros volcánicos, por la variedad de productos que emiten los volcanes: flujos de lava, flujos piroclásticos, caída de piroclastos, etc. Cada uno de estos procesos tiene características y formas de desplazamiento y emplazamiento propias, por lo que, son distintos entre ellos, además de los daños que pueden llegar a provocar, es decir, es diferente el peligro que representan.

Para el caso del volcán de San Miguel, su historia eruptiva nos muestra como las erupciones han sido principalmente de tipo efusivo, con la producción de **flujos de lava** emitidos tanto desde el cráter central como desde fisuras. También se han presentado erupciones de tipo explosivo con moderado contenido en gas, lo que ha dado lugar a **depósitos de caída** de piroclastos (**balísticos**, lapilli y cenizas) y en menor medida a **flujos piroclásticos** que han producido depósitos de colada piroclástica en el interior del cráter.

Otro fenómeno frecuente en las laderas del volcán de San Miguel han sido los **flujos de escombros (lahares)** desencadenados principalmente por lluvias intensas durante la estación húmeda, por lo que es otro de los procesos que se han considerado en el momento de elaborar el mapa de escenarios de amenaza volcánica.

6.2. Mapa de escenarios de amenaza volcánica

Cada **Mapa de Escenarios de Amenaza** representa de forma gráfica las posibles zonas de distribución y los niveles de afectación para cada una de las diferentes futuras amenazas (diferentes procesos eruptivos) del volcán, en caso de actividad eruptiva.

Cada uno de los escenarios de amenaza representados resulta de la integración de la información histórica, la información geológica recopilada en trabajos de campo y la simulación por computadora de cada uno de los procesos volcánicos.

El propósito de los mapas es ser una herramienta útil para orientar las acciones de prevención y mitigación necesarias para reducir la posibilidad de pérdidas y daños dentro de la zona de influencia del volcán, en caso de una erupción. Las áreas representadas en cada mapa son el resultado de la aplicación de modelos numéricos y por tanto una aproximación a la realidad del fenómeno. **Los límites de las áreas delimitadas deben tomarse con precaución, considerándolos como referencias y no como absolutos.**

Los mapas de escenarios de amenaza se presentan en dos formatos, según el ambiente donde se encuentran:

a) En esta memoria técnica se presentan en formato individual: para cada proceso volcánico (exceptuando el colapso estructural), de manera que se presentan cuatro mapas, uno por cada uno de los tres escenarios simulados, más un cuarto que integra los tres escenarios..

b) En el afiche "Mapa de Escenarios de Amenaza. Volcán de San Miguel o Chaparrastique" se encuentran agrupados. Se presentan cuatro mapas correspondientes a los diferentes procesos volcánicos posibles.

En ocasiones se representan dos procesos en un solo mapa. Los tres escenarios para cada procesos se muestran en un mismo mapa.

Todos los escenarios de amenaza se representan sobre el modelo de elevación digital del edificio volcánico y su área de influencia, con información geográfica y administrativa básica para una mayor orientación de los usuarios. La leyenda general, en la parte inferior o derecha de cada mapa indica el significado de estos elementos.

Para cada mapa, el **escenario 1**, representado en rojo, señala las zonas relativamente cercanas al centro de emisión, que tienen una mayor probabilidad de ser impactadas por los productos de una erupción, aunque ésta sea de pequeña magnitud. Son áreas que pueden ser afectadas con mayor frecuencia.

El **escenario 2** representado en naranja señala zonas que pueden ser afectadas por erupciones de moderada magnitud. El **escenario 3**, representado en amarillo señala las zonas que pueden ser afectadas por erupciones de gran magnitud. Estos eventos tienen menor probabilidad de ocurrir que las erupciones pequeñas. Sin embargo, tienen capacidad de distribuir sus productos a mayor distancia y con un mayor impacto.

6.3. Mapa de Escenarios de Amenaza por Flujos de Lava

6.3.1. Los flujos de lava

La lava es el producto más familiar y conocido de la actividad volcánica. Los flujos o coladas de lava (Foto 12) son masas de roca fundida a temperaturas entre 1,000 a 1,200 ° C, generados en el interior de la tierra (magma) y emitidos a la superficie terrestre a través de los cráteres de los volcanes o bien a través de fisuras laterales en los edificios volcánicos. Se desplazan por las laderas del volcán a favor de la pendiente, buscando siempre las zonas bajas.

El tipo de erupciones que generan coladas de lava son las efusivas, es decir, la cantidad de gas involucrado en la erupción es pequeña o moderada. La lava, según su composición y la cantidad de sílice presente, puede tener diferentes características de temperatura, densidad y viscosidad. Una lava con menor cantidad de sílice, es menos viscosa y por tanto puede fluir a mayor velocidad.

El mayor peligro relacionado con flujos de lava es el daño parcial o destrucción total por enterramiento, trituración o incendio, de todo lo que éstas encuentran a su paso (Foto 13). Otra problemática es que flujos relativamente grandes pueden cubrir áreas de varios kilómetros cuadrados, dejándolas inhabilitadas para la agricultura. La mayoría de los flujos se mueven lentamente permitiendo que la gente pueda retirarse fácilmente y colocarse fuera de su alcance.



Foto 12: Colada de lava del Volcán Etna (Sicilia-Italia) en septiembre de 2004 (fuente www.ctinrh.it)



Foto núm.13: Incendios en infraestructuras y bosques provocados por el avance de una colada de lava (Volcán Kilauea- Hawaii)

6.3.2. Flujos de lava en el Volcán de San Miguel

Con base en los trabajos antes mencionados, se ha identificado las zonas más probables de dispersión de flujos de lava que pueden impactar áreas agrícolas y pobladas alrededor del volcán de San Miguel.

A partir de la cima pueden ocurrir emisiones de lava por el cráter central, las cuales debido a la morfología del cráter serían emitidas de manera preferencial hacia el noroeste-suroeste. No obstante, las lavas pueden en su momento, ser emitidas en forma radial al cono, proceso que ha hecho crecer al volcán de San Miguel desde sus inicios.

Por otra parte, coladas de lava podrían ser también emitidas a través de fisuras laterales que afectan el cono volcánico con orientaciones predominantes noroeste – sureste. Las bocas eruptivas a lo largo de estas fisuras se podrían situar a cualquier cota o nivel del volcán. Adicionalmente, podrían ser emitidas a partir de otras fisuras con disposición radial, siguiendo el sistema de drenaje del volcán.

Los alcances de las lavas producidas por el volcán de San Miguel son variables, pero con mayor frecuencia alcanzan las cotas entre 100-300 m.s.n.m., lo que supone una longitud media de los flujos de 8 kilómetros. Sin embargo, los flujos prehistóricos más voluminosos y de mayor alcance se desplazaron en dirección noreste – suroeste del cono hasta longitudes de 12 kilómetros , tal como lo muestra la figura 15.

6.3.3. Metodología de elaboración de escenarios de amenaza por flujos de lava

Las simulaciones de las probables rutas de movimiento de coladas de lava se realizaron con base a un modelo de aproximaciones de tipo probabilístico. Se asume que el flujo de lava es controlado básicamente por la topografía del terreno y el modelo introduce ciertos efectos que permiten al flujo no propagarse únicamente en la

dirección de máxima pendiente (Macedonio, 1998). Al tratarse de un flujo viscoso, la topografía juega un papel principal en la determinación del camino seguido por la lava. La viscosidad y la composición química de la lava son otros factores determinantes que también son tomados muy en cuenta en el modelo.

La simulación del proceso de emisión de flujos de lava se llevó a cabo sobre el Modelo de Elevación Digital con tamaño de celda de 10 metros x 10 metros. El valor de corrección empleado en todas las simulaciones fue de 3 metros.

Se tomó como punto de partida, para los eventos menos probables, la localización de algunas coladas de lava prehistóricas que se encuentran a distancias significativas máximas de 12 Kilómetros.

Cada escenario de amenaza que se presenta, fue diseñado utilizando el programa FLOW 3D (Kover, 1994). Las trayectorias y alcances de los flujos de lava simulados por computadora se calibraron con las observaciones de campo. Los escenarios representados en los mapas son:

-  **Escenario 1:** en color **rojo**, se muestran los alcances y distribución de flujos de lava que serían emitidos por la erupción **más probable**, pero de **menor magnitud** que puede ocurrir de acuerdo al resultado de las simulaciones. Se señalan las áreas que pueden ser afectadas por flujos de lava con un recorrido de hasta 2 kilómetros desde el centro de emisión, generalmente desde el cráter central. Estos flujos se canalizan por valles y quebradas, no tienen alcances grandes pero son los que tienen una mayor probabilidad de ocurrencia ya que se pueden producir por erupciones de pequeña magnitud (ver figura 20).
-  **Escenario 2:** en color **naranja** se muestran trayectorias y alcances de flujos de lava con **probabilidad moderada** de ocurrir. Están marcadas áreas que pueden ser afectadas por flujos de lava con longitudes entre 2 y 8 kilómetros. Se observa que las lavas fluyen por los cauces a partir del cráter, aunque algunas simulaciones fueron hechas considerando las fracturas existentes en el edificio volcánico. Este tipo de flujos pueden ser generados por erupciones de mediana magnitud, que tienen una menor probabilidad de ocurrencia que los flujos generados por erupciones más pequeñas (ver figura 21).
-  **Escenario 3:** representado en color **amarillo**, muestra los máximos alcances de flujos de lava, que pueden ser entre 8 y 12 kilómetros. Estos flujos serían generados por una erupción de **gran magnitud**, que tiene una **menor probabilidad de ocurrencia** (ver figura 22).

Es necesario señalar, que pueden producirse variaciones a estos escenarios, ya que puede producirse el caso que flujos de lava surjan por áreas no mostradas en la simulación, debido a lo impredecible del fenómeno y a las características de emplazamiento de algunos flujos (a través de tubos o túneles de lava por ejemplo), además de otras consideraciones técnicas que pudieran existir y que son imposibles de anticipar.

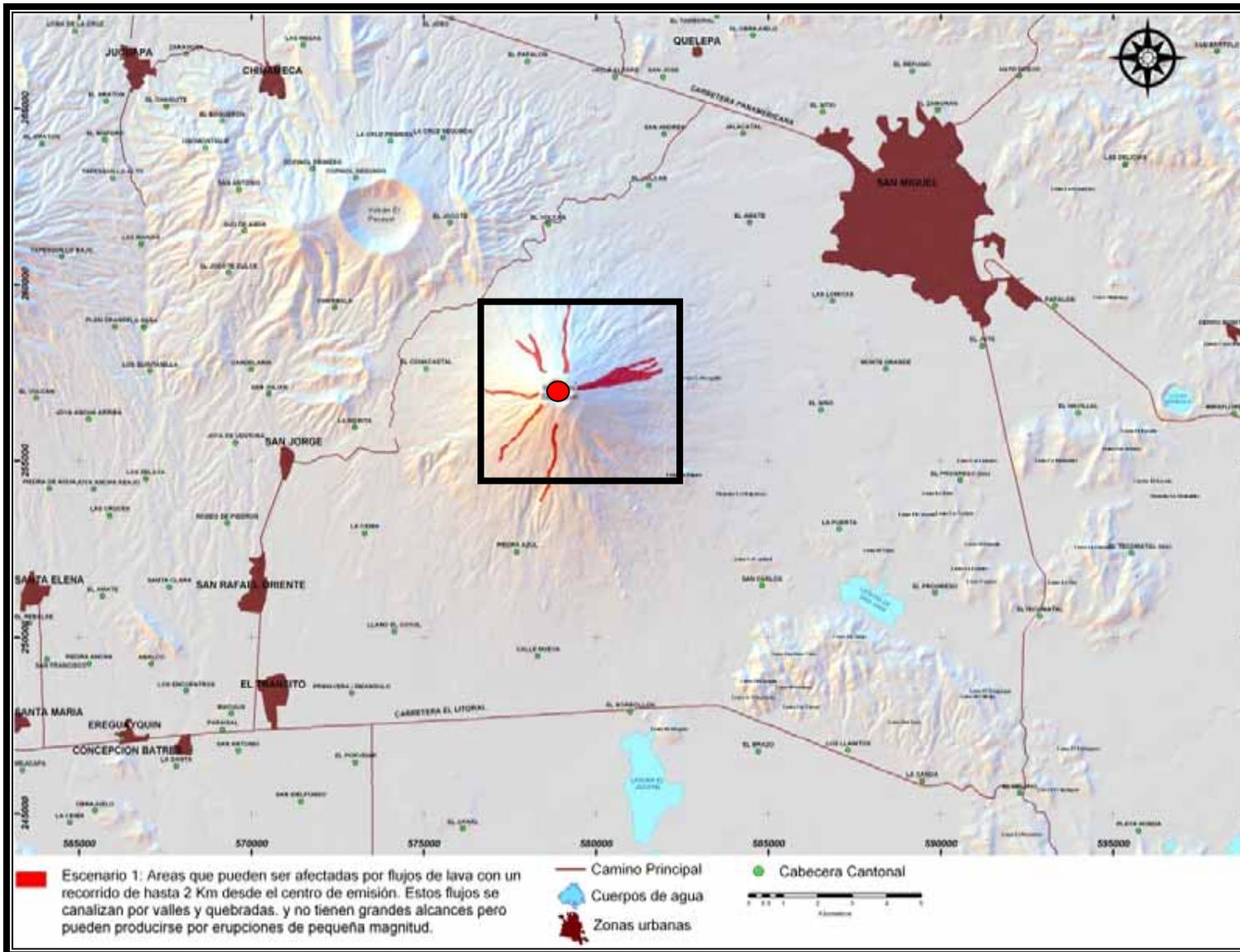


Figura 20: Escenario 1 de Amenaza Volcánica por Flujos de Lava. En rojo se señalan las áreas que pueden ser afectadas por flujos de lava pequeños pero con alta probabilidad de ocurrencia.

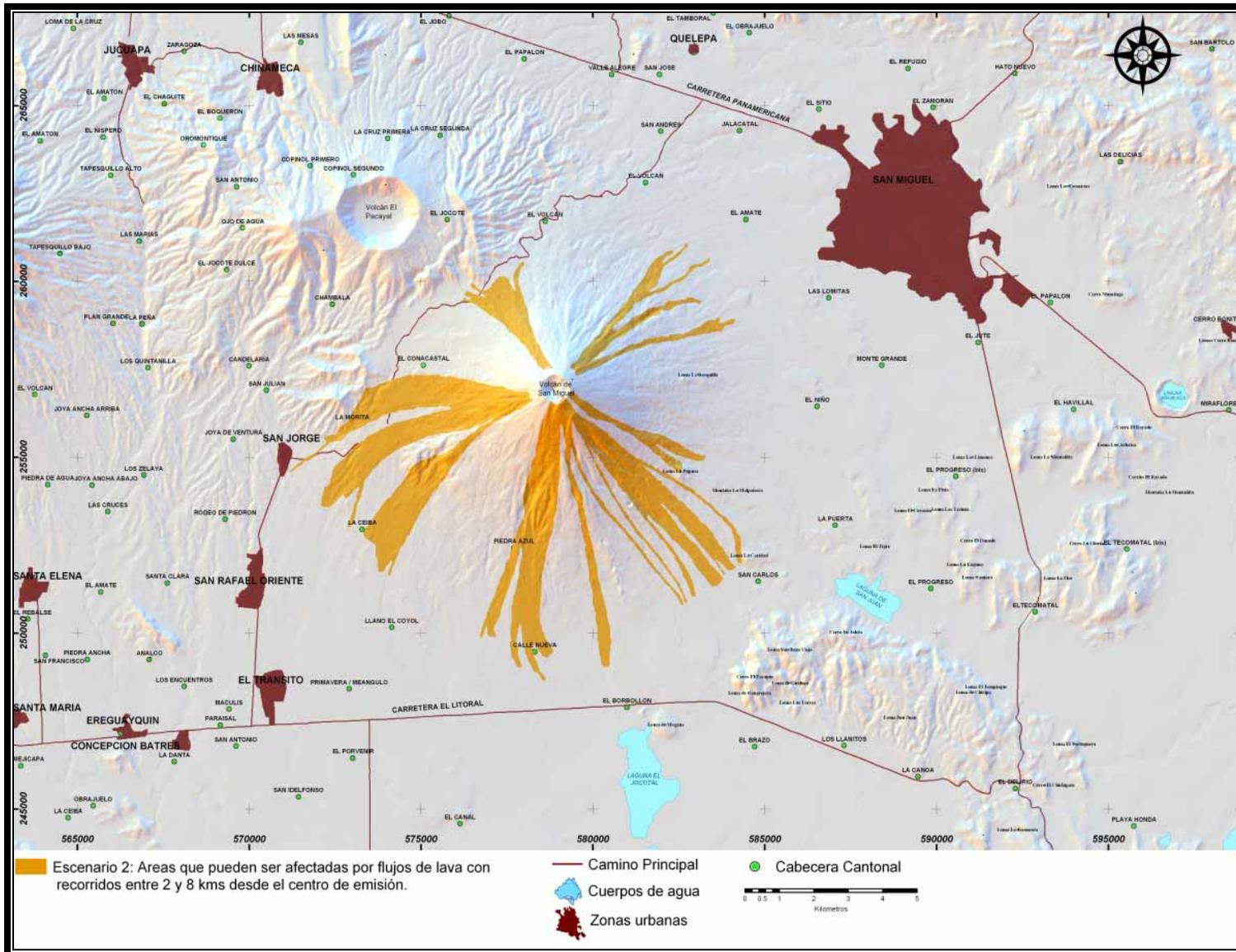


Figura 21: Escenario 2 de Amenaza Volcánica por Flujos de Lava. En naranja aparecen señaladas las áreas que pueden ser afectadas por flujos de lava originados en erupciones de moderada magnitud, con probabilidad de ocurrencia más baja que el escenario 1.

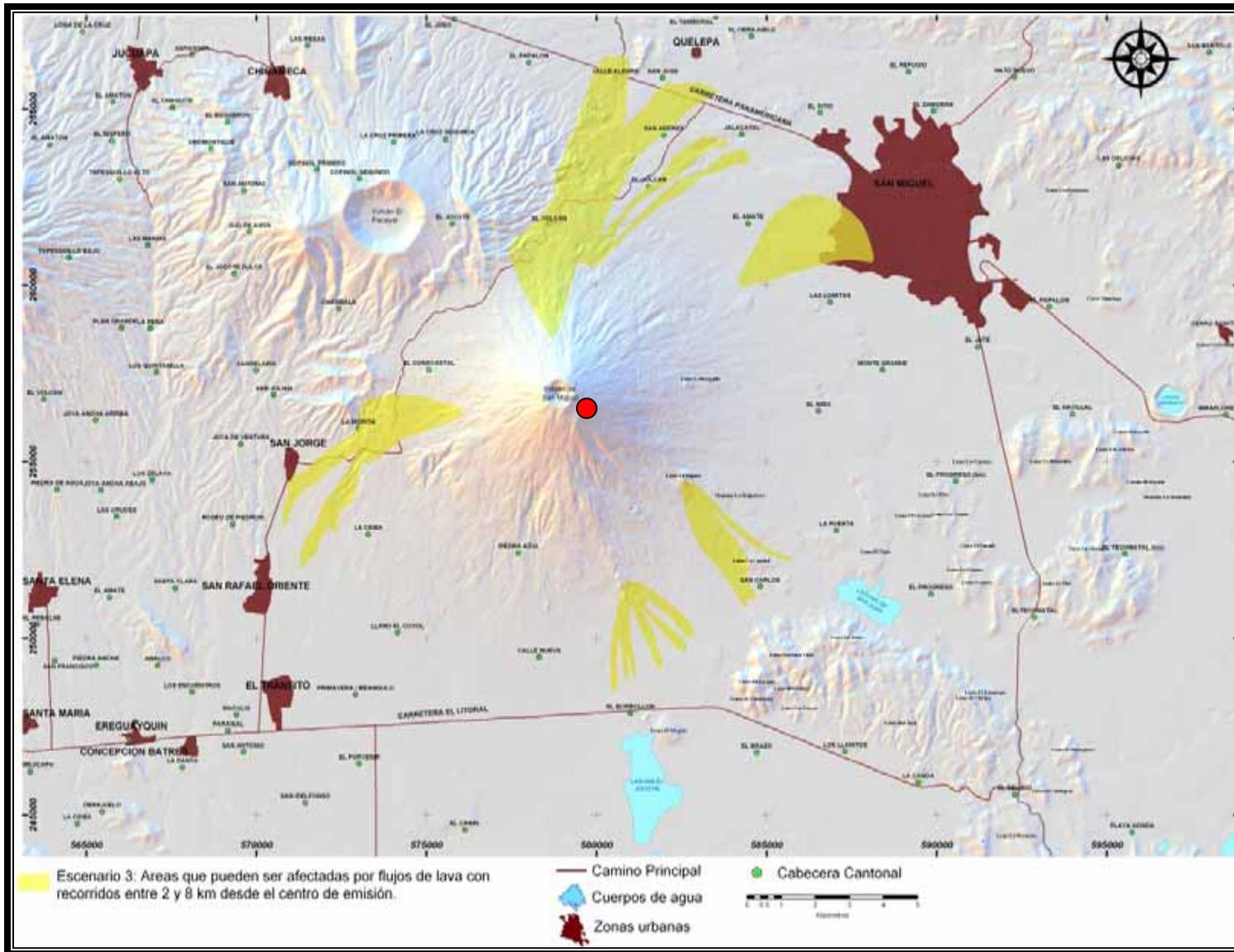


Figura 22: Escenario 3 de Amenaza Volcánica por Flujos de Lava. En amarillo aparecen señaladas las áreas que pueden ser afectadas por flujos de lava originados en erupciones de gran magnitud, que si bien tienen poca probabilidad de ocurrencia pueden tener un impacto mucho mayor que erupciones más pequeñas.

6.4. Mapa de Escenarios de Amenaza por Caída de Balísticos

6.4.1. Los balísticos

De manera genérica, balísticos o proyectiles balísticos, es el nombre que reciben los fragmentos de mayor tamaño (bloques y bombas volcánicas) expulsados durante una erupción. Los bloques son fragmentos de roca sólida arrancados por la fuerza del magma de las paredes del conducto volcánico. Las bombas volcánicas son fragmentos de roca fundida (magma) que se enfrían parcialmente en su recorrido por el aire. El tamaño de los balísticos varía entre los 6 y 50 cm, aunque algunos pueden presentar dimensiones mayores de hasta algunos metros de diámetro. Por su peso y densidad no pueden ser transportados por los vientos después de ser lanzados por el cráter o bocas eruptivas del volcán. Se trata de una lluvia de rocas de todo tamaño que luego de viajar por el aire caen entorno al cráter debido a su propio peso (ver Foto 14).

La mayoría de veces durante las erupciones explosivas, las partículas de magma y rocas del conducto son transportadas hacia arriba por medio de columnas eruptivas. Sin embargo, las partículas o fragmentos de mayor tamaño, son expulsadas siguiendo trayectorias balísticas debido a la fuerza de la gravedad, muy cercanas a las trayectorias de tiro parabólico pero modificadas por la fuerza de arrastre del aire, lo que disminuye el alcance de las partículas y provoca que el impacto sea más vertical.



Foto 14: Caída de balísticos de una erupción del volcán Stromboli, Italia (tomada de Delgado y otros, 2003)

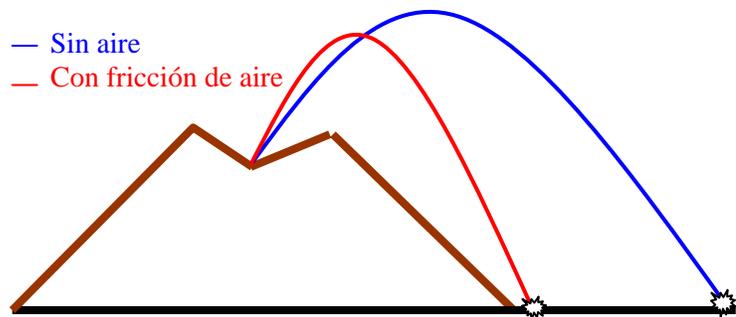


Figura 23: Ejemplo modelo de caída de un bloque balístico que es expulsado por el cráter hipotético de un volcán (Tomado de Delgado y otros, 2003)

Para calcular el efecto de esta fuerza hay que considerar la densidad del aire, la forma de la partícula, la altura del cono, la forma del cráter, entre otras. Los proyectiles balísticos abandonan el cráter a velocidades que varían de decenas a centenares de metros por segundo, y sus trayectorias no son afectadas por la dinámica de la columna eruptiva

En el área del cráter central y las fuentes eruptivas ubicadas en los cuatro flancos del volcán de San Miguel se ha encontrado numerosos bloques y bombas volcánicas de hasta 0.4 m de diámetro a distancias menores a 50 m de la fuente, bloques de menor tamaño se encontraron a menos de 1 Km. de las bocas eruptivas. Lo anterior es evidencia de que el alcance de estos productos para este volcán no es muy grande. La fuerza ejercida por el aire disminuye el alcance de las bombas y provoca que el impacto sea vertical (Figura 23).

El alcance de los proyectiles balísticos depende de la magnitud de la explosión que les dio origen, aunque difícilmente tienen un alcance superior a 5 Km. Sin embargo, éstos representan un peligro para la vida y las propiedades por la fuerza de impacto con la que caen y por sus elevadas temperaturas. El peligro de impacto por grandes fragmentos es máximo cerca del cráter y decrece al incrementarse la distancia desde el mismo.

Las velocidades típicas de impacto van desde 300 hasta 500 km/h. Esto implica que las personas pueden sobrevivir la caída de proyectiles pequeños (menores que 3 cm) en refugios especiales, pero no de balísticos grandes ya que pueden afectar incluso construcciones sólidas. Por ejemplo, un balístico de 30 centímetros de diámetro que cae a una velocidad de 500 Km/h tiene una energía de impacto igual a la del choque de un automóvil de una tonelada moviéndose a 100 Km/h (Delgado H., 2003).

Los balísticos al momento del impacto también representan un peligro debido a que su temperatura puede ser superior al punto de ignición de la vegetación, lo cual puede provocar incendios en regiones vecinas al volcán.

Además de los peligros antes mencionados, se encuentra la amenaza para la aeronavegación, pues las altas velocidades de los proyectiles hace que alcancen grandes alturas en muy pocos segundos, y su impacto con aeronaves puede ser de consecuencias fatales.

6.4.2. Caída de Balísticos en el Volcán de San Miguel

La distancia a la que caen los balísticos depende del tamaño y de la magnitud de la explosión que les dio origen. Para el caso de volcanes poco explosivos como el de San Miguel, difícilmente alcanzan distancias mayores a 5 kilómetros.

Es importante señalar que en el volcán de San Miguel se han identificado diferentes bocas eruptivas y conos de escorias situados en los diferentes flancos del volcán, alineados mayoritariamente sobre fisuras de dirección NNE-SSW y NW-SE. Algunas de estas bocas eruptivas, u otras nuevas sobre estas mismas fracturas, podrían activarse en caso de una futura erupción, dando lugar a la emisión de lava y balísticos.

6.4.3. Metodología de elaboración de escenarios de amenaza por caída de balísticos

El mapa de escenarios de amenaza por Caída de Balísticos muestra las áreas máximas aproximadas que pueden ser alcanzadas por proyectiles balísticos expulsados por el volcán de San Miguel durante erupciones explosivas de diversa magnitud. La simulación por computadora fue realizada usando el programa Ballistic Fall desarrollado en la UNAM, por Alatorre en 2003.

Cada escenario explosivo está basado en parámetros de energía calculados con el programa, en función del tamaño y alcance de los balísticos arrojados durante erupciones pasadas por el volcán. Para lograr simular cada escenario de amenaza, se tomó en cuenta la morfología del cráter, el ángulo de máximo alcance, un viento favorable de 20 m/s y el diámetro con el cual los balísticos tienen un mayor alcance en todas las direcciones. Además de tomar muy en cuenta la ubicación de la boca eruptiva en la base topografía [DEM].

El mayor alcance esperado considerando un viento favorable de 20 m/s resultó ser de aproximadamente 3 kilómetros.

Para el caso de actividad explosiva por bocas eruptivas laterales, se simuló la caída de balísticos para escenarios de magnitud moderada y alta solamente, porque son situaciones menos probables, pero que de ocurrir tal como lo indican los registros provocarían efectos y daños significativos.

El mapa de escenarios de amenaza por caída de proyectiles balísticos, ha sido construido de acuerdo al perfil obtenido de los alcances verticales máximos, para los tres escenarios de energía simulados a diferentes ángulos de salida (Figura 23):



Escenario 1: señala las áreas que podrían ser afectadas por caída de balísticos en caso de una erupción de pequeña magnitud y/o baja explosividad. Las dimensiones de esta área son de 1 kilómetro de diámetro entorno al cráter central. Simula el caso con **más probabilidad de ocurrir** (Figura 24).



Escenario 2: área afectada por caída de balísticos en caso de ocurrir una erupción de magnitud moderada,. Este tipo de actividad es poco probable pero tiene capacidad para lanzar balísticos a distancias de hasta 2 kilómetro del centro de emisión, sea este el cráter central o las bocas eruptivas laterales (Figura 25).



Escenario 3: representa el área que podía ser afectada por caída de balísticos correspondiente a un evento explosivo de alta explosividad. Esta área es de 3 kilómetros de diámetro alrededor de los centros de emisión. Simula el caso **menos probable** correspondiente a la erupción de mayor **magnitud**. Aunque la probabilidad de ocurrencia de una erupción de este tipo es muy baja, no se puede descartar (Figura 26).

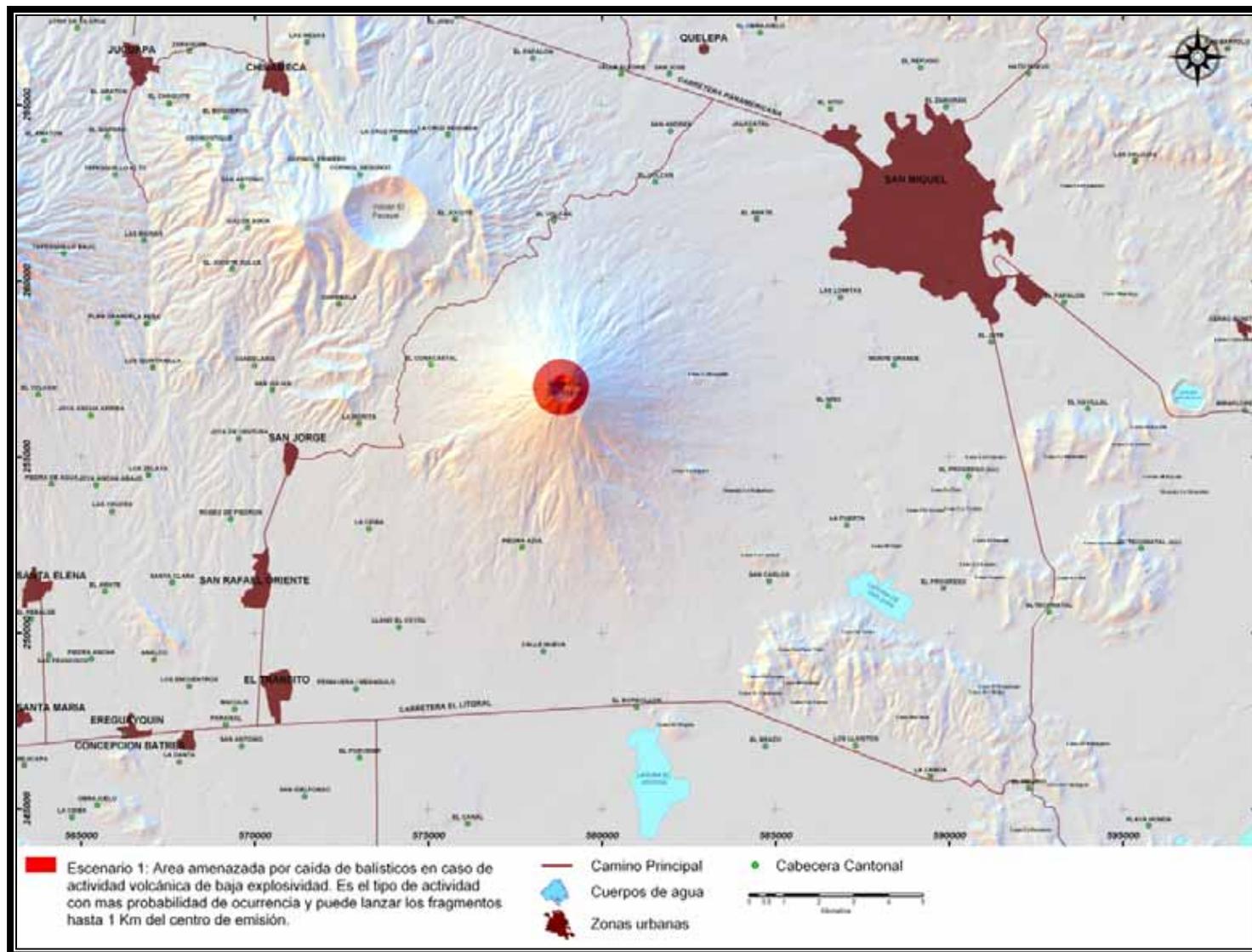


Figura 24: Escenario 1 de Amenaza Volcánica por Caída de Balísticos. En rojo se señalan las áreas que pueden ser afectadas por el impacto de bombas y bloques en caso de una erupción de pequeña magnitud.

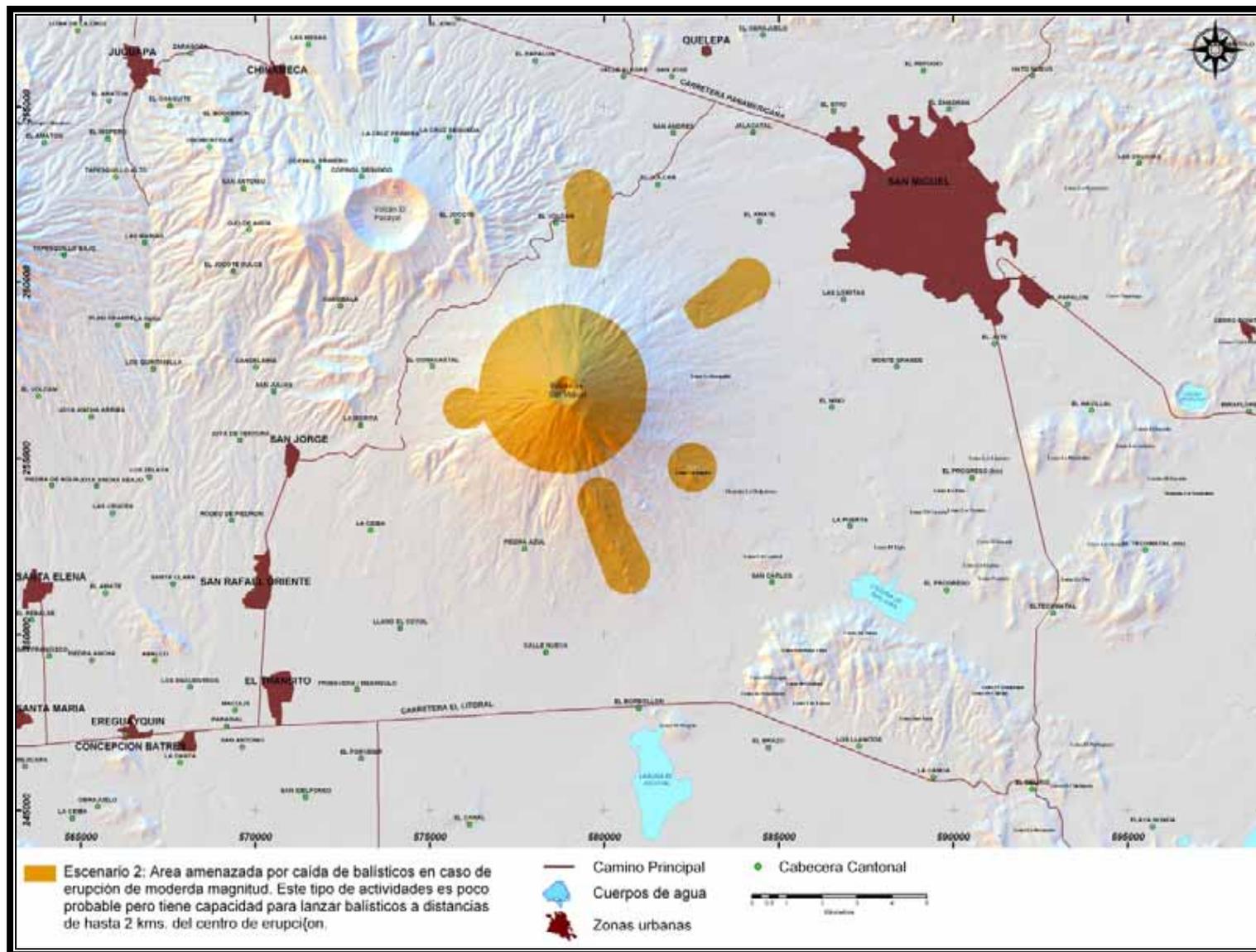


Figura 25: Escenario 2 de Amenaza Volcánica por Caída de Balísticos. En naranja están representadas las áreas de moderada peligrosidad por caída de balísticos e implica moderada probabilidad de ocurrencia

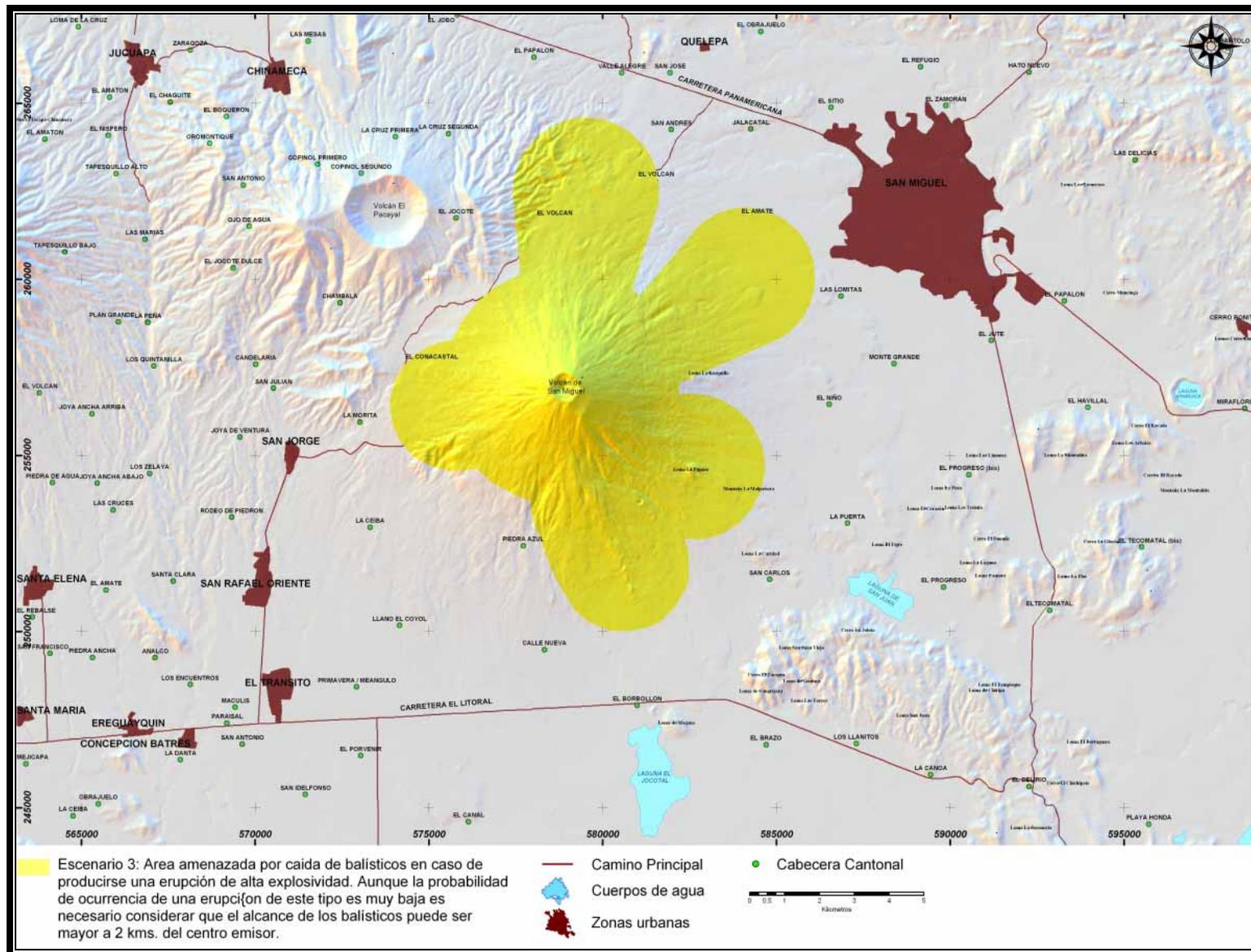


Figura 26: Escenario 3 de Amenaza Volcánica por Caída de Balísticos. En amarillo se señalan las áreas que podrían ser afectadas en caso de una erupción de alta explosividad

6.5. Mapa de Escenarios de Amenaza por Caída de Ceniza

6.5.1. Las cenizas

Las **cenizas volcánicas** son fragmentos de magma y partículas menores a 2 milímetros que se generan durante una erupción explosiva. En este tipo de erupciones, el magma es fragmentado por el gas que lleva disuelto en pequeñas porciones, denominadas genéricamente piroclastos o tefras. Las cenizas son los piroclastos de menor tamaño. Todos estos fragmentos son lanzados al aire por los gases y transportados hacia arriba formando las columnas eruptivas. En su recorrido por la atmósfera se enfrían hasta caer y depositarse en el terreno.

Una columna eruptiva se eleva hasta que su densidad es igual a la de la atmósfera circundante. Luego sufrirá una expansión lateral, pero también continuará ascendiendo debido a la inercia, y formará una amplia nube en forma de paraguas. En esta región, los vientos actúan sobre las partículas más finas y las transportan en la dirección en que soplan, transportándolas hasta varios kilómetros del centro de emisión (Foto 15?). Las partículas de mayores tamaños (hasta 6,4 centímetros), conocidos como lapilli, caen en áreas cercanas al centro emisor. Las cenizas más finas, con tamaños menores de 0.01 mm, pueden llegar a desplazarse hasta decenas de kilómetros del lugar donde fueron emitidas.



Foto 15: Dispersión de cenizas volcánicas en la columna eruptiva de la erupción de Cerro Negro, en Nicaragua, en 1995

Los depósitos de caída de piroclastos generalmente cubren uniformemente la superficie preexistente del terreno con una capa de espesor variable según la magnitud de la erupción, si el relieve es plano o moderadamente ondulado. En terrenos escarpados o con altas pendientes la remoción de los depósitos de piroclastos o tefras durante e inmediatamente después de la deposición puede conducir a cambios pronunciados en el espesor. Por otro lado, cambios en la energía de la columna eruptiva, la composición del material emitido, y la dirección y velocidad del viento pueden producir variaciones en los espesores de las sucesivas capas que se depositan.

La caída de piroclastos, especialmente la caída de cenizas, es el peligro volcánico directo de mayor alcance y más molesto derivado de una erupción volcánica, ya que sus efectos pueden producirse en zonas alejadas del volcán y perdurar por largos periodos de tiempo. Los principales efectos por caída de piroclastos y cenizas son:

- Enterramiento parcial o total de vehículos, vías de comunicación e infraestructuras
- Colapso de infraestructuras y viviendas por acumulación de ceniza en los techos
- Daños intensos en la vegetación y cobertura vegetal en general.
- Disminución o pérdida de la visibilidad por la suspensión de partículas de grano fino en el aire
- Dificultades para la respiración por la presencia en suspensión de partículas de grano fino
- Contaminación de reservorios de agua
- Daños a motores de maquinaria, industria y aviación civil

La acumulación de cenizas puede provocar el colapso de los techos de edificios, destruir líneas de transmisión de energía y comunicaciones, y dañar la vegetación. Los depósitos de caída de piroclastos (o tefra) secos y no compactados tienen densidades que varían entre 0.4-0.7 g/cm³, mientras que la ceniza húmeda y compactada alcanza valores de densidad de hasta 1 g/cm³. De esta manera, la carga transmitida por una capa de caída de piroclastos de 10 centímetros de espesor puede variar entre 40-70 kg/m², si está seca, hasta 100-125 kg/m² si se encuentra húmeda.

Los efectos de la caída de ceniza sobre la vegetación son muy variables dependiendo de las especies vegetales, la época del año y de la etapa de crecimiento de la planta.

La caída de piroclastos y cenizas puede causar incendios, tanto por rayos generados en las nubes eruptivas, como por la presencia de fragmentos de lava todavía incandescentes que no lograron enfriar en su recorrido por el aire. En ciertos casos, incluso a varios kilómetros del cráter, los depósitos de caída de piroclastos pueden ser tan calientes que los fragmentos pueden quedar soldados entre sí.

Por otra parte, los depósitos de caída pueden generar efectos importantes en la dinámica precipitación/escorrentía dentro de cuencas hidrográficas. Depósitos de cenizas finas con una baja permeabilidad llevan a un aumento en la escorrentía, a una erosión acelerada y a un ajuste en los canales de los ríos. Por el contrario, depósitos potentes de piroclastos, de tamaño lapilli (2 a 64 mm) pueden incrementar la capacidad de infiltración y prácticamente eliminar la escorrentía.

La suspensión de partículas de grano fino en el aire afecta la visibilidad y puede llegar a producir oscuridad, persistiendo hasta varios días. Además de los problemas evidentes para la movilidad este fenómeno puede causar pánico y/o generar problemas de angustia. También son importantes los problemas de afectación a la salud (especialmente a personas con problemas respiratorios) y los efectos contaminantes en el agua.

La ceniza además puede estropear maquinaria desprotegida (especialmente motores de combustión interna). El transporte aéreo, ferroviario y especialmente carreteras son especialmente vulnerables. Depósitos finos de ceniza pueden causar graves daños a servicios comunitarios críticos como centrales de generación eléctrica, plantas de bombeo, sistemas de drenaje y plantas de tratamiento de agua. Además puede producir cortocircuitos en las líneas

de transmisión. Adicionalmente, las comunicaciones se pueden ver afectadas por daños en las líneas telefónicas y estaciones transmisoras de radio y televisión, y por desórdenes de tipo eléctrico causado por rayos. Finalmente, la aeronavegación puede ser afectada seriamente debido al peligro de paro de turbinas al incursionar una nave en medio de una nube de cenizas, las cuales son indetectables por medio de radar, por su similitud a la distancia con nubes meteorológicas y a la capacidad de viajar por miles de kilómetros.

6.5.2. Caída de cenizas en el volcán de San Miguel

Los patrones de vientos gobiernan la distribución y emplazamiento de depósitos de piroclastos y cenizas. En el volcán de San Miguel, mientras las lavas aparecen en todos los flancos, los depósitos de caída lo hacen principalmente en el sector noroccidental, ya que han sido influenciados por los vientos dominantes del este. Las emisiones de ceniza ocurridas durante los últimos 2 mil años han cubierto áreas de hasta 117 km², llegando a registrarse incluso en la ciudad de Usulután a 20 kilómetros del cráter.

Los depósitos de caída piroclásticos que se encontraron y estudiaron en los flancos del volcán de San Miguel dan idea de que en el pasado se presentaron explosiones de pequeña a moderada magnitud.. Tomando como referencia la **Tefra Alpina**, los espesores máximos esperados con un eje de dispersión hacia el occidente, hasta 12 Km. de distancia al cráter serían de 30 cm.

No existe evidencia de erupciones con magmas dacíticos. Se esperaría que los eventos explosivos del futuro fuesen similares a los que han ocurrido recientemente. Es decir, pequeñas a moderadas explosiones que produzcan materiales de composición basáltico-andesítico. Estas explosiones podrían presentarse tanto en el conducto central como en fisuras laterales. Los trabajos de campo y la cartografía geológica muestran que se puede desarrollar nuevos conos de escorias en zonas cercanas a las zonas de fractura norte-sur y noroeste – sureste.

6.5.3. Metodología de elaboración de escenarios de amenaza por caída de cenizas

El mapa de escenarios de amenaza por caída de ceniza del volcán de San Miguel, se ha construido a partir de un modelo de distribución de cenizas adaptado a un programa de computadora denominado ASHFALL (Hurst, 2002).

Este software permite calcular la trayectoria de las partículas de cenizas y por tanto, determinar su posición final en la superficie del terreno. El resultado de la superposición de todas las partículas de diferente tamaño, forma y densidad, da como resultado la simulación en superficie de los diferentes espesores de ceniza acumulados según diferentes magnitudes de la erupción. Este tipo de programa constituye una herramienta fundamental, tanto para la mitigación del riesgo en zonas que pueden ser afectadas por caída de ceniza, como por la definición de alertas de tráfico aéreo en caso de una erupción altamente explosiva.

Para la simulación se emplearon los siguientes parámetros de entrada en el programa: altitud del volcán, altura de columna eruptiva, velocidad y dirección de vientos, volumen de material emitido y tamaño medio de partícula. La simulación de tres escenarios distintos se obtiene de introducir variaciones en algunos de estos parámetros.

Muchos de los parámetros de entrada se obtuvieron del estudio geológico de los depósitos. Además, se realizó un estudio de los patrones de viento utilizando los datos meteorológicos disponibles, por mes y por año, para diferentes altitudes (ver anexo 2 y 3), con el fin de conocer mejor las áreas de influencia de las nubes de cenizas del volcán de San Miguel.

Parámetros como la altura de la columna eruptiva y el volumen de material emitido, que dependen de la magnitud de la erupción, fueron adoptados de erupciones de volcanes similares al de San Miguel, como el Cerro Negro de Nicaragua, entre otros; de acuerdo a criterios geológicos basados en la similitud de historias, estilos y mecanismos eruptivos.

Las zonas de caída de ceniza que se obtienen con el programa, resultan de simular con el modelo una erupción hipotética con diferentes datos para los parámetros de altura y velocidad de viento, altura de columna eruptiva y volumen de material emitido. Si los parámetros antes mencionados cambian por circunstancias naturales, la distribución de la caída de ceniza sería un poco diferente y por lo tanto difícil de predecir.

Se simularon tres diferentes escenarios de amenaza, para cada uno de los cuales se obtuvieron dos áreas posibles de afectación: la de los piroclastos (tefras) de mayor tamaño, que se dibujó con color y la de las cenizas más finas que se marcó con una línea punteada.



Escenario 1: área afectada por la caída de ceniza en caso de actividad volcánica explosiva de pequeña magnitud, que es la más probable. Considera una altura de columna eruptiva de 3 Km. y un volumen de ceniza emitida de 0.02 km³. Las cenizas podrían llegar a acumularse con grosores de 5 centímetros en la época seca y de 3 centímetros en la época de lluvias. En el área marcada dentro de la línea punteada, la ceniza se acumularía con espesores de hasta 5 milímetros.



Escenario 2: área afectada por caída de ceniza en caso de actividad volcánica explosiva de moderada magnitud. Considera una altura de columna eruptiva de 6 Km. y un volumen de ceniza emitida igual a 0.07 km³. Este escenario es menos probable que el anterior, pero en caso de ocurrir podrían acumularse, en el área en color, espesores entre 5 metros (en la zona más cercana al volcán) y de 30 a 40 centímetros, según la época del año (en la zona más alejada del edificio volcánico) y dentro de la línea punteada de color naranja grosores de hasta de 5 milímetros.



Escenario 3: área afectada por caída de ceniza en caso de actividad volcánica de alta explosividad, tiene una baja probabilidad de ocurrencia, aunque no debe descartarse. Considera una altura de columna eruptiva de 16 kilómetros y un volumen de ceniza igual a 0.6 km³. El área en color indica que puede acumularse de 3 a 4 centímetros de grosor de piroclastos, según la época del año y en el área dentro de la línea punteada podrían acumularse hasta 3 milímetros. En este escenario, continúa siendo la zona occidental la más afectada por la caída de ceniza, sin embargo debido a la variabilidad de los vientos de altura y los índices de explosividad volcánica, todos los sectores alrededor del volcán podrían resultar impactados por caída de ceniza.

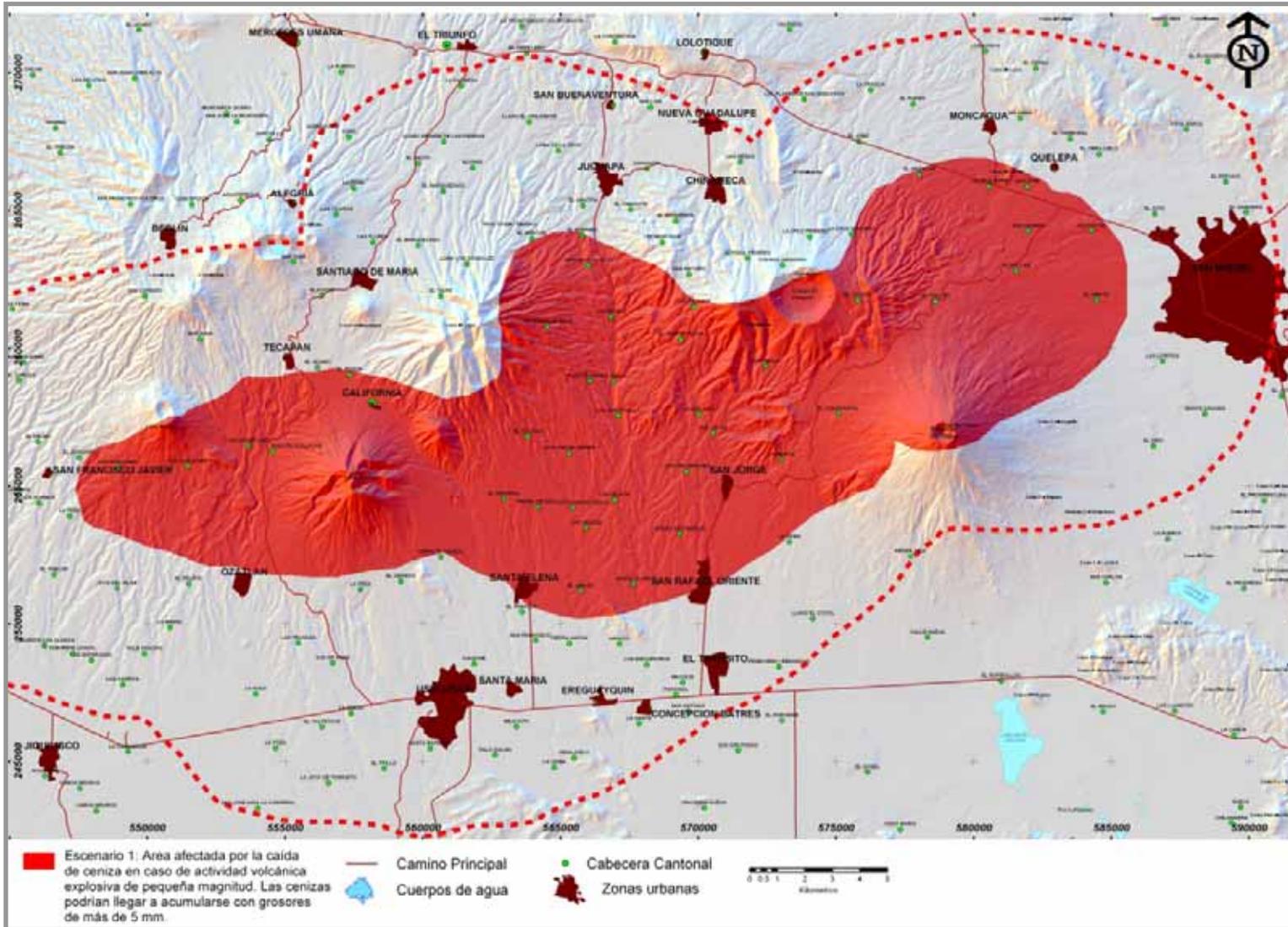


Figura 27: Escenario 1 de Amenaza Volcánica por Caída de Cenizas. En rojo opaco se señala el área que podría ser afectada por una acumulación de piroclastos de hasta 5 centímetros. La línea punteada delimita el área que podría ser afectada por la dispersión de cenizas y acumular depósitos de más de 5 milímetros.

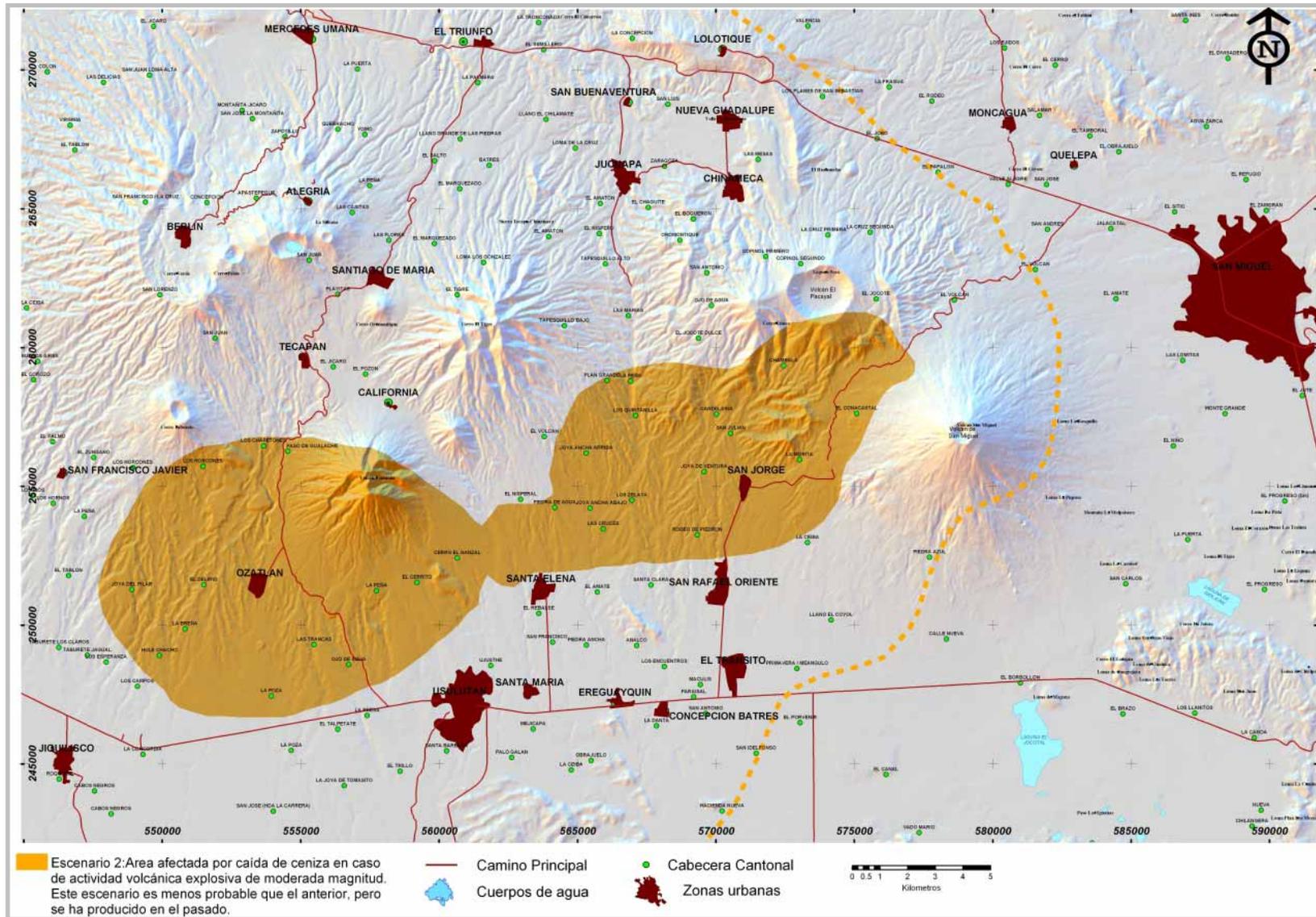


Figura 28: Escenario 2 de Amenaza Volcánica por Caída de Cenizas. En naranja opaco se señala el área que podría ser afectada por una acumulación de piroclastos de hasta 30 centímetros. La línea punteada delimita el área que podría ser afectada por la dispersión de cenizas y acumular depósitos de hasta 5 milímetros.

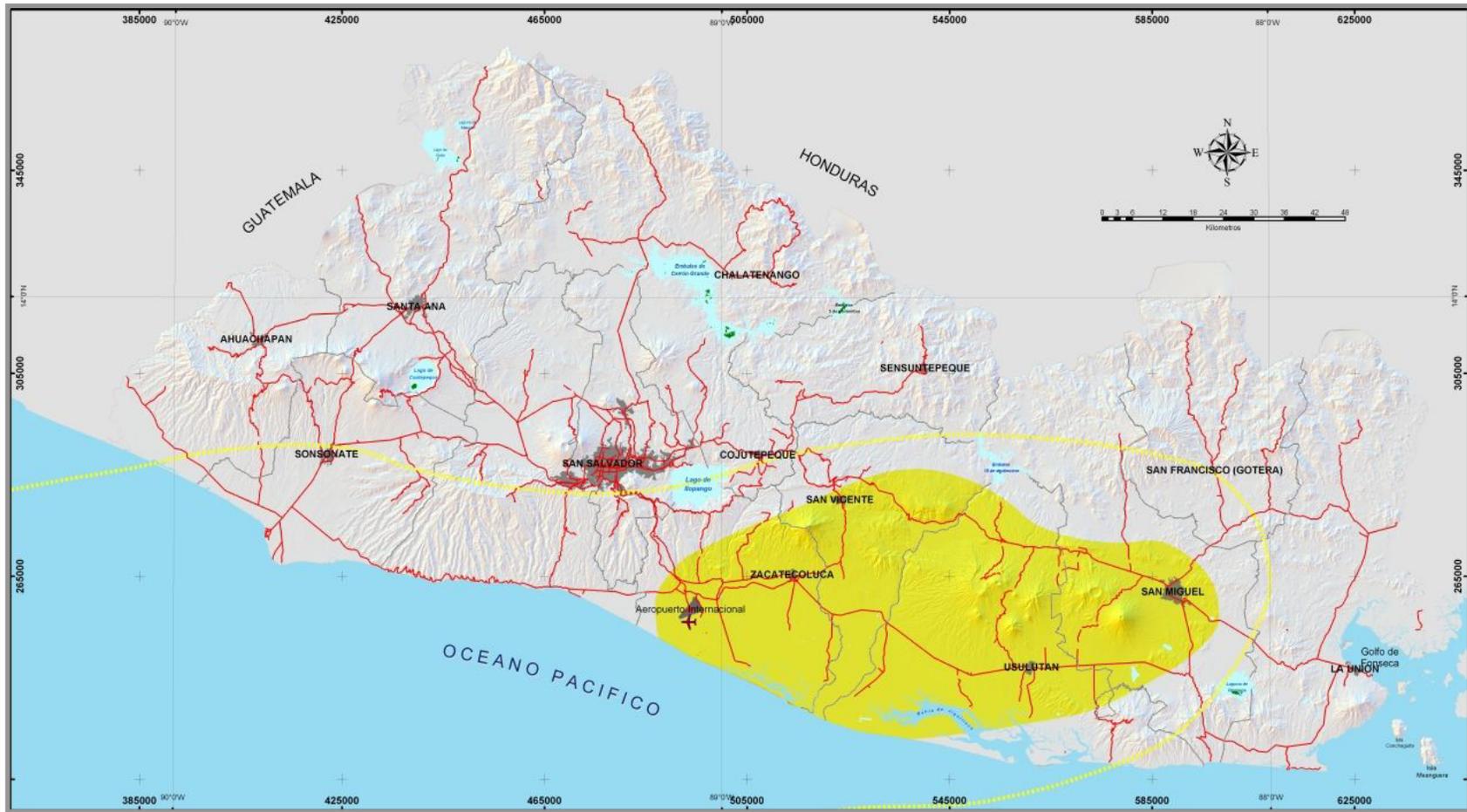


Figura 29: Escenario 3 de Amenaza Volcánica por Caída de Cenizas. La afectación en este escenario sería de ámbito nacional, ya que la dispersión de cenizas podría llegar a afectar zonas muy alejadas del volcán de San Miguel como es el aeropuerto de Comalapa.

6.6. Mapa de Escenarios de Amenaza por Flujos de Escombros (Lahares)

6.6.1. Los flujos de escombros (lahares)

Los flujos de escombros, llamados también lahares, son mezclas de lodo, sedimentos y escombros volcánicos movilizadas por agua lluvia. Estos materiales se acumulan en las partes altas del volcán y con frecuencia se encuentran inestables. Los flujos de escombros pueden desencadenarse por reactivación del volcán, aunque de forma más frecuente se generan por lluvias intensas. Al mezclarse con agua, los escombros fluyen rápidamente por las quebradas y se depositan posteriormente en las partes bajas de los volcanes, donde la pendiente se suaviza.

Las propiedades físicas de los lahares están controladas por el tamaño de los materiales volcánicos y el contenido de agua. Un flujo de escombros volcánicos puede transportar partículas desde el tamaño grava hasta bloques de más de un metro de diámetro. La concentración de partículas sólidas es de 75 a 80% en peso o 55 a 60% en volumen. Las áreas de inundación y alcance de los lahares dependen en gran medida de su volumen, tamaño de las rocas y la topografía del terreno.



Foto 16: Efectos de soterramiento de un lahar producido en Plymouth (Montserrat, West Indies), en 1995, por la erupción del volcán Soufrière Hills

Las velocidades de movimiento de los lahares varían y dependen de los factores siguientes: cantidad de agua lluvia, tiempo de duración de la tormenta, pendiente y dimensiones del cauce, volumen y distribución del tamaño de los materiales depositados en el cauce. Por ejemplo, los lahares del Monte Santa Helena en 1980, en Estados Unidos, viajaron a velocidades de 1.3 m/s en zonas de suave pendiente, pero en las zonas con pendientes fuertes llegaban a 40 m/s (USGS, 2001).

Los principales efectos de los lahares (foto 16) es el soterramiento de vías de comunicación y de viviendas. Si son de grandes dimensiones pueden arrastrar personas y animales. Los flujos pueden transportar bolos de gran tamaño que pueden provocar impactos en infraestructuras y heridas en las personas.

6.6.2. Los flujos de escombros (lahares) en el volcán de San Miguel

Históricamente el volcán de San Miguel ha tenido actividad de flujos de escombros generados principalmente por lluvias intensas que movilizaron rocas volcánicas (escorias y lapilli) desde la zona alta del cono volcánico que tiene pendientes mayores a 40 grados en el flanco Noroeste.

Pequeños flujos de escombros han descendido del volcán por la **Quebrada La Arenera** (foto 17), en el sector norte del volcán, en dirección NNW afectando viviendas de los caseríos Los Carretos (cantón El Volcán, municipio de San Miguel), Las Placitas (cantón Conacastal, municipio de Chinameca) y la carretera que une la Panamericana y la Litoral pasando por San Jorge (ver figura 30). El evento más significativo ocurrió en mayo de 1975, causando la muerte de una niña. Posteriormente, se han documentado en esta quebrada la ocurrencia de otros flujos durante los años 1985, 1988, 1992, 1994, 1999, 2000 y 2001, todos directamente asociados a la acción de lluvias intensas (tabla 6).

Tabla 6: Datos descriptivos de lahares históricos de el Volcán de San Miguel (tomado del "Estudio de Caracterización de Amenaza por Lahares en el Volcán de San Miguel". Geólogos del Mundo, 2001. Proyecto DIPECHO II)

Fecha	Quebrada	Origen	Sedimentos (potencia)	Desborde	Daños
19/06/1945	Quebradona	Fuerte tormenta en año de incendios	¿?	Si	Casa y calles aterradas
06/05/1951	La Silva y M ^a Chavez	Lluvia fuerte	Arena y lodo (1 m)	Si	Ateramiento de calle
05/1965	La Arenera	Lluvia muy fuerte	Bloques y Lapilli (2 m)	Si	Casa y calles aterradas
15/09/1965	La Arenera	Lluvia fuerte en el cerro	¿? (1 m)	¿?	¿?
08/05/1975	La Piedrita	Lluvia	Arenas, material fino (1 m)	No	Niña muerta
07/05/1985	La Placita	Lluvia	Gravas arenas y algún bloque (1,5 m)	Si	Casa aterrada, corte de carretera
28/09/1992	La Arenera	Lluvia	Estación 5000 pies (1,5 m)	Si	Corte de calle y casas soterradas
26/08/2000	La Arenera	Lluvia fuerte en el cerro	Gravas, arena, palos y algún bloque (1,5 m)	2 – 3 Madrugada	Corte de calle y casas soterradas
06/09/2001	La Arenera	Lluvias	Arenas y gravas	No	Relleno de borda de contención



Foto 17: Pequeño flujo de escombros generado en la zona de cabecera de la Quebrada La Arenera, en el sector norte del volcán de San Miguel, en octubre de 2003. Las flechas indican la dirección del flujo.

En los cauces principales de los cuatro flancos del volcán existen depósitos de lahares de pequeña y moderada magnitud.

De acuerdo a observaciones de campo, se ha determinado que algunos drenajes del sector poniente y surponiente del volcán, son bastante propensos a transportar flujos de escombros, entre ellos: La Quebradona, La Piedra, La Piedrona, La Ceiba, El Clavo y El Llano. En todas las quebradas antes mencionadas existen depósitos de lahares endurecidos con espesores máximos de 1,5 metros, a distancias que varían de 3,5 a 10 kilómetros del cráter.

Se observó también que los flancos sureste y noreste del volcán son menos susceptibles a producir lahares, debido a que no existe una gran acumulación de escorias y rocas sueltas en estos sectores. Sin embargo, es posible la ocurrencia de algunas inundaciones en la ciudad de San Miguel ocasionadas por crecidas que bajan por las quebradas del flanco oriental del volcán, durante inviernos copiosos como fue el de 2004.

Ninguno de los flujos de escombros de los que se tiene conocimiento ha estado asociado con actividad eruptiva. El principal factor desencadenante de los lahares son lluvias fuertes e intensas.

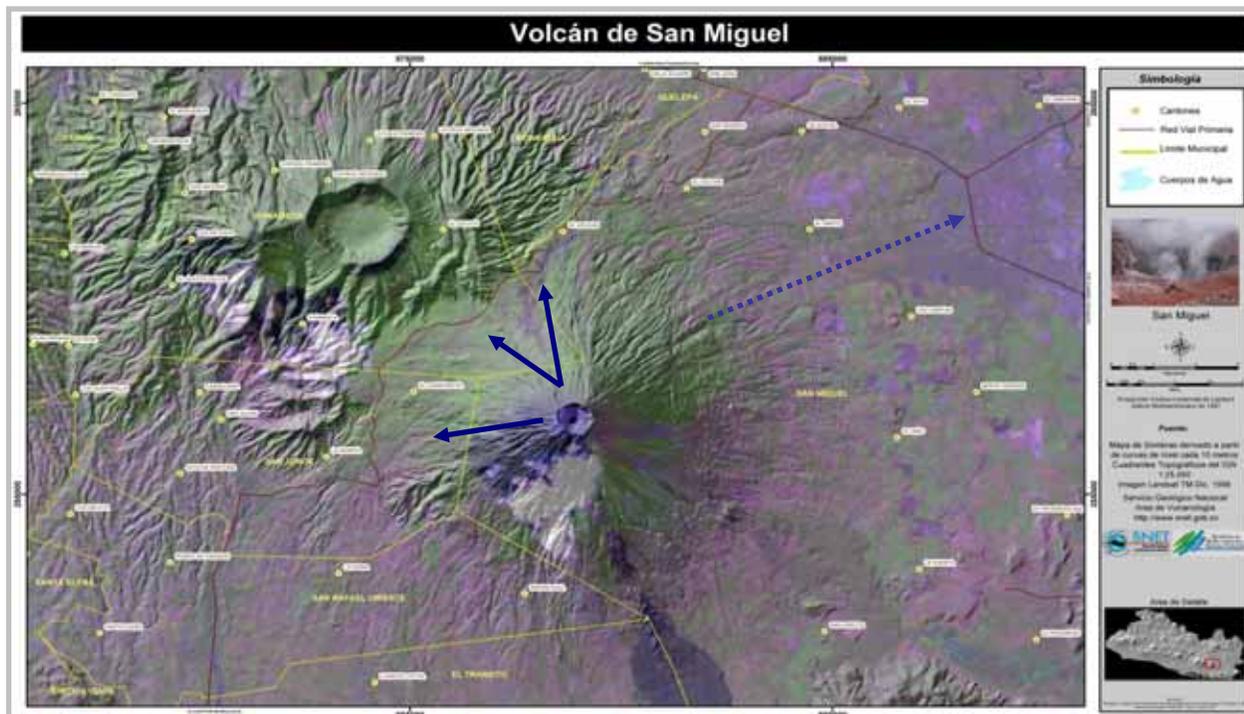


Figura 30: Mapa en relieve del volcán de San Miguel, donde se señalan con flechas azules la direcciones preferenciales de los flujos de escombros históricos. La flecha punteada indica la zona potencialmente amenazada por futuras inundaciones.

Las lluvias generadas por el Huracán Mitch, por ejemplo, produjeron un tirante de agua de 1,9 metros en octubre de 1998. Aún así, no se produjeron lahares en la zona, probablemente, porque las lluvias fueron duraderas y de moderada intensidad y distribuidas en el tiempo.

Aunque no ha sido posible disponer de datos de intensidad de lluvia, sí se contó con datos de precipitación en el volcán de San Miguel gracias a la red de pluviómetros en fincas cafetaleras. Se obtuvieron registros de lluvia mensual y anual, por un periodo de 40 años, desde 1961 a 2003, colectados por los pluviómetros situados en las fincas de café del sector norte del volcán de San Miguel, específicamente del pluviómetro ubicado en la Finca Santa Isabel (Figura 22).

También se utilizaron datos de 5 pluviómetros adicionales (tabla 7) ubicados a diferentes altitudes del volcán, los cuales nos muestran gran dependencia entre las cantidades de lluvia caída y la altitud. De hecho, ello permitió evaluar la incidencia de las lluvias que disparan lahares usando datos históricos durante un periodo de aproximadamente 40 años. Durante este tiempo, tal y como se citaba en el apartado anterior, se registró la ocurrencia de 9 pequeños lahares, cada uno de ellos disparado por lluvias torrenciales (ver figura 31 y tabla 6).

Tabla 7: Nombre y ubicación de pluviómetros instalados en el flanco noroeste del volcán de San Miguel (Proyecto DIPECHO II, Geólogos del Mundo, 2002)

Nº	Nombre	Long	Lat	Altitud	Lat N	Lon W
5	San Isidro	575300	262000	1000	13° 28 35	88° 17 58
8	La Placita	575500	258900	810	13° 27 14	88° 17 45
9	Tres mil pies	575800	256600	860	13° 27 00	88° 17 38
10	Cuatro mil pies	578200	255000	1155	13° 24 28	88° 16 58
11	Cinco mil pies	578300	255400	1322	13° 24 41	88° 16 52

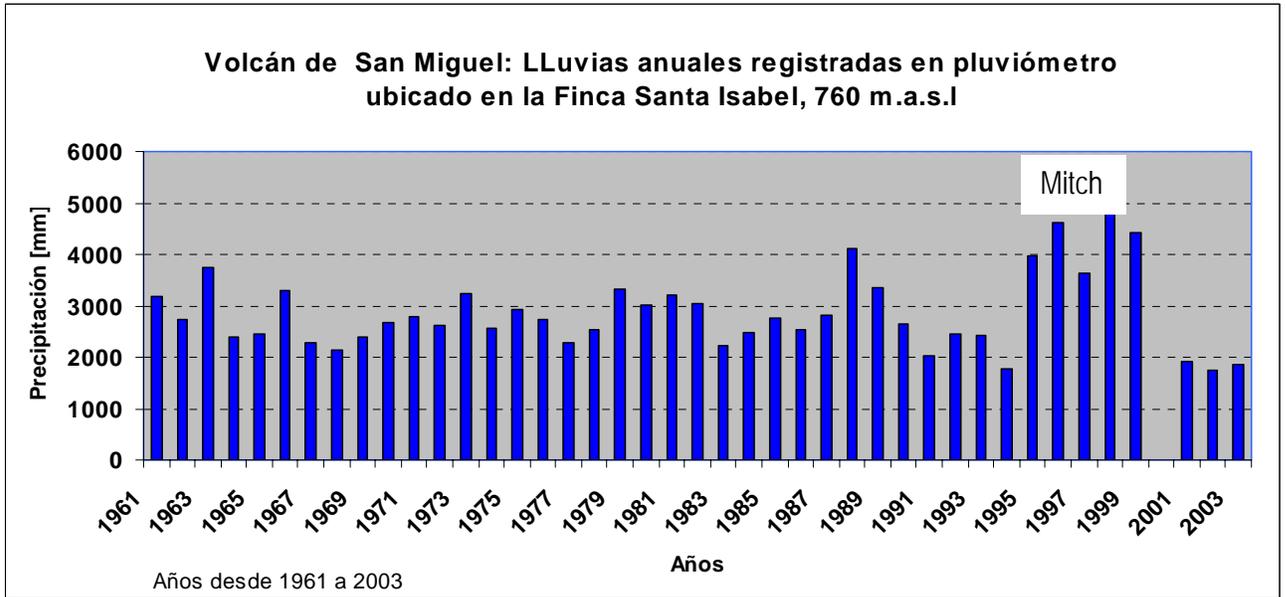


Figura 31: Precipitaciones anuales registradas desde 1961 a 2003 en el pluviómetro de la Finca Santa Isabel, en el sector norte del volcán de San Miguel. Las flechas indican años en los cuales se generaron lahares (tabla 6) que han afectado a poblados y estructuras ubicadas en las comunidades del flanco norte del volcán

6.6.3. Metodología para la construcción de los escenarios de amenaza volcánica por flujos de escombros

El mapa de escenarios de amenaza por flujos de escombros que pueden circular por los cauces principales del volcán de San Miguel, fue construido con base al trabajo preparado por Major y otros en 2001 usando el programa LAHAR –Z (Iverson et al., 1998).

En este trabajo se realizaron simulaciones para volúmenes de escombros de 100,000; 300,000; 500,000 y 1,000,000 de metros cúbicos de material. Para cada volumen de material estimado, se representaron en el mapa (figura 32) las zonas afectadas por la dispersión y sedimentación de los flujos de escombros en las diferentes quebradas de el volcán.

A partir de este trabajo y de la validación del mismo con los trabajos de campo, se consideró pertinente simplificarlo, de forma que se consideraron como posibles volúmenes a movilizar, las cantidades de 100,000, 500,000 y 1,000,000 de m³. De manera que, de los cuatro volúmenes antes descritos y de acuerdo a las observaciones de campo, se considero reducir la distribución a tres volúmenes, manteniendo invariable el área y alcance definido por el modelo aplicado por Major y colaboradores (2001).

Los tres escenarios que se obtuvieron de esta modificación son los siguientes:

- Escenario 1:** Área de alta probabilidad de alcance y distribución de flujos de escombros con un volumen de 100,000 m³. Estos flujos pueden alcanzar hasta 6 kilómetros desde el cráter del volcán por las diferentes quebradas donde pueden generarse, a partir de un umbral de lluvia de 40 mm en una hora (Figura 33).

 **Escenario 2:** área de probabilidad media de alcance y distribución de flujos de escombros con un volumen de 500,000 m³. Estos flujos pueden recorrer distancias hasta de 8 kilómetros del cráter y pueden producirse a partir de un umbral de lluvia de 60 mm en una hora (Figura 34)

 **Escenario 3:** área de alcance y distribución de flujos de escombros con un volumen de hasta 1,000,000 m³. Son flujos que tienen una baja probabilidad de ocurrencia, pero que no deben descartarse. Pueden recorrer distancias de 10 kilómetros desde el cráter y pueden generarse en caso de superar ampliamente los umbrales de lluvia de 60 mm (Figura 35).

Final de la sección

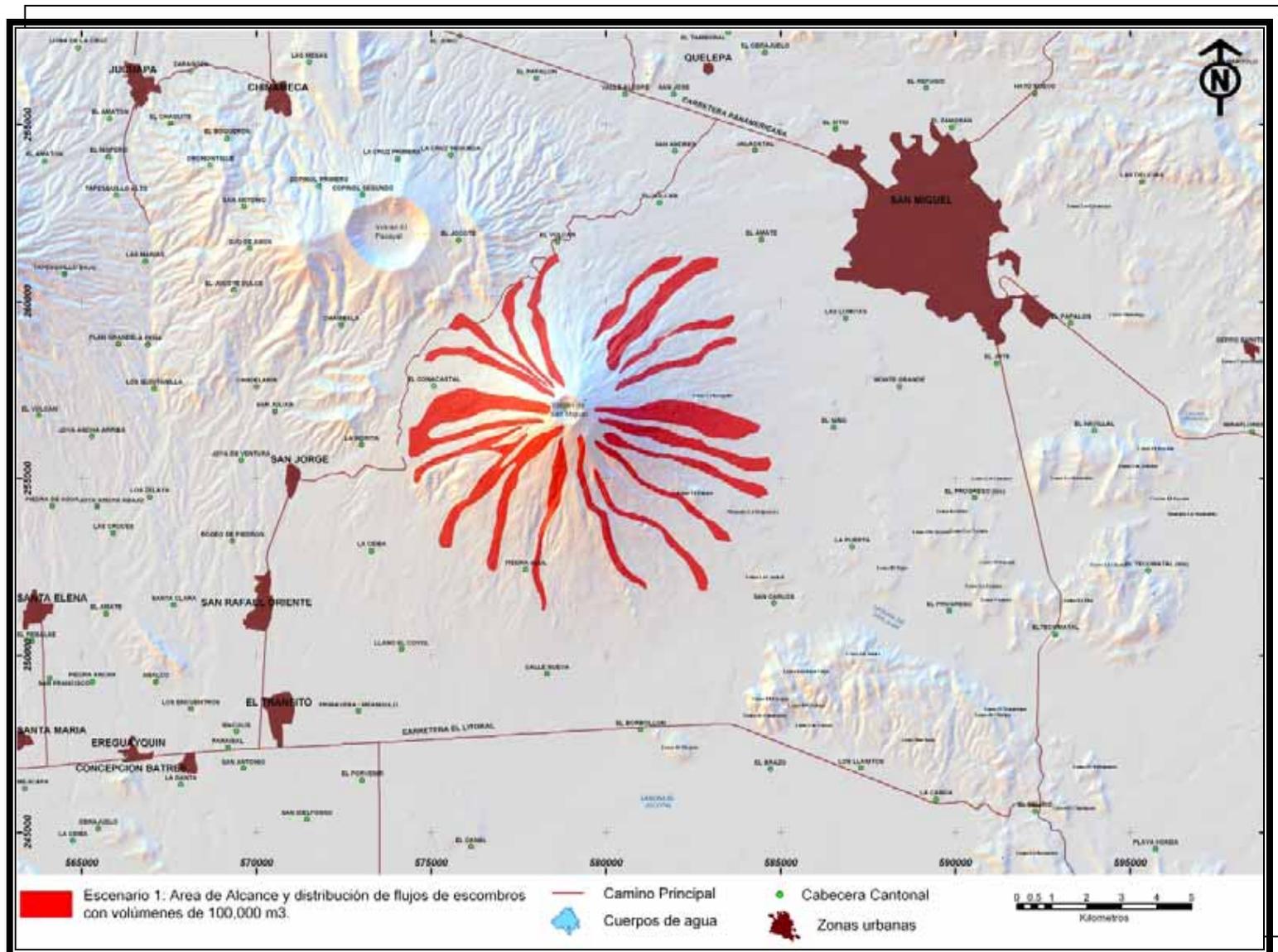


Figura 32.: Mapa de zonas de amenaza por Lahar para el volcán de San Miguel construido a partir del modelo propuesto en el software Lahar-Z (Major et al., 2001).

Figura 33: Escenario 1 de amenaza por flujos de escombros en el volcán de San Miguel, correspondiente a volúmenes de 100,000 m³ de escombros

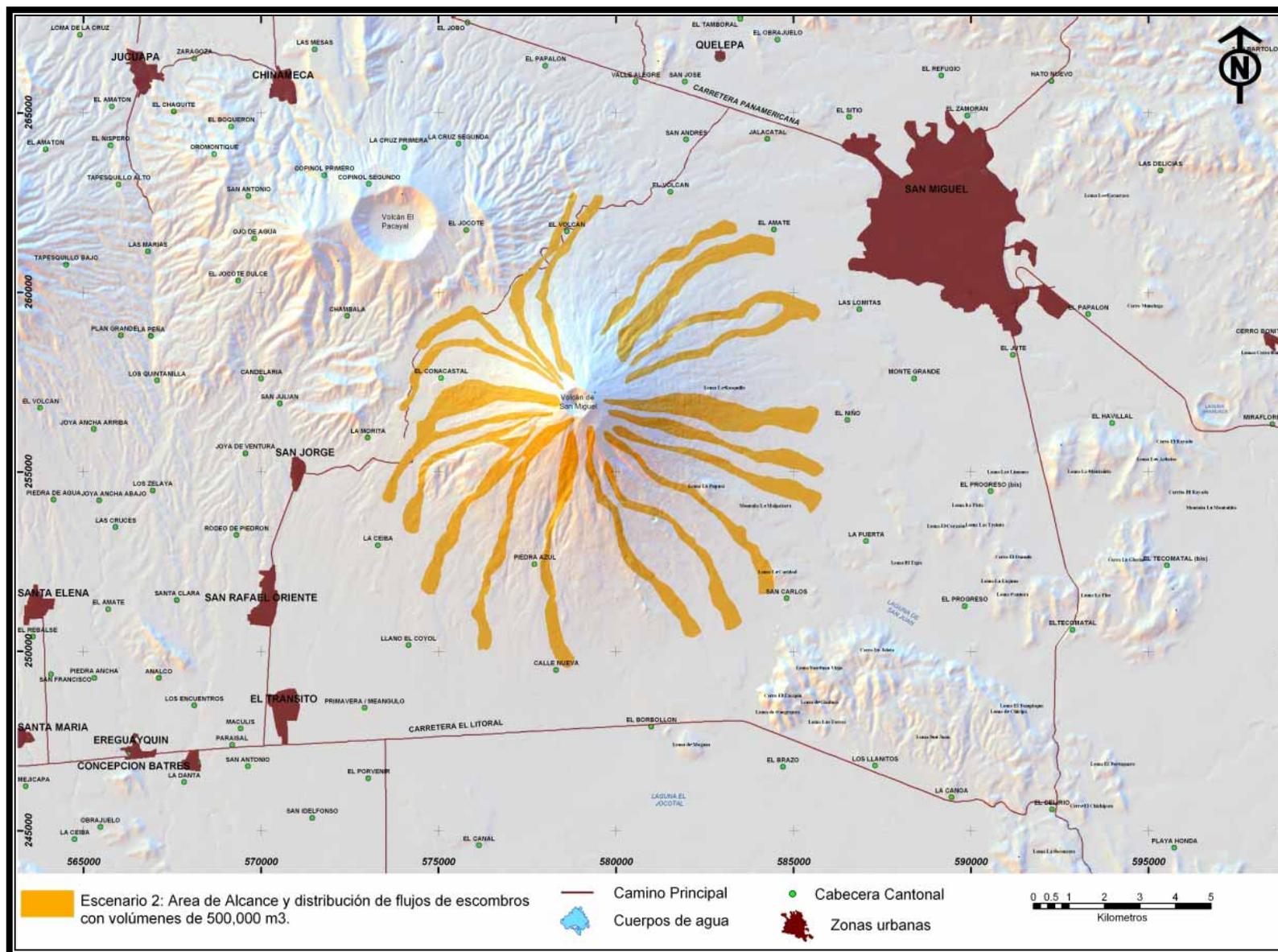


Figura 34: Escenario 2 de amenaza por flujos de escombros en el volcán de San Miguel, correspondiente a volúmenes de 500,000 m³ de escombros

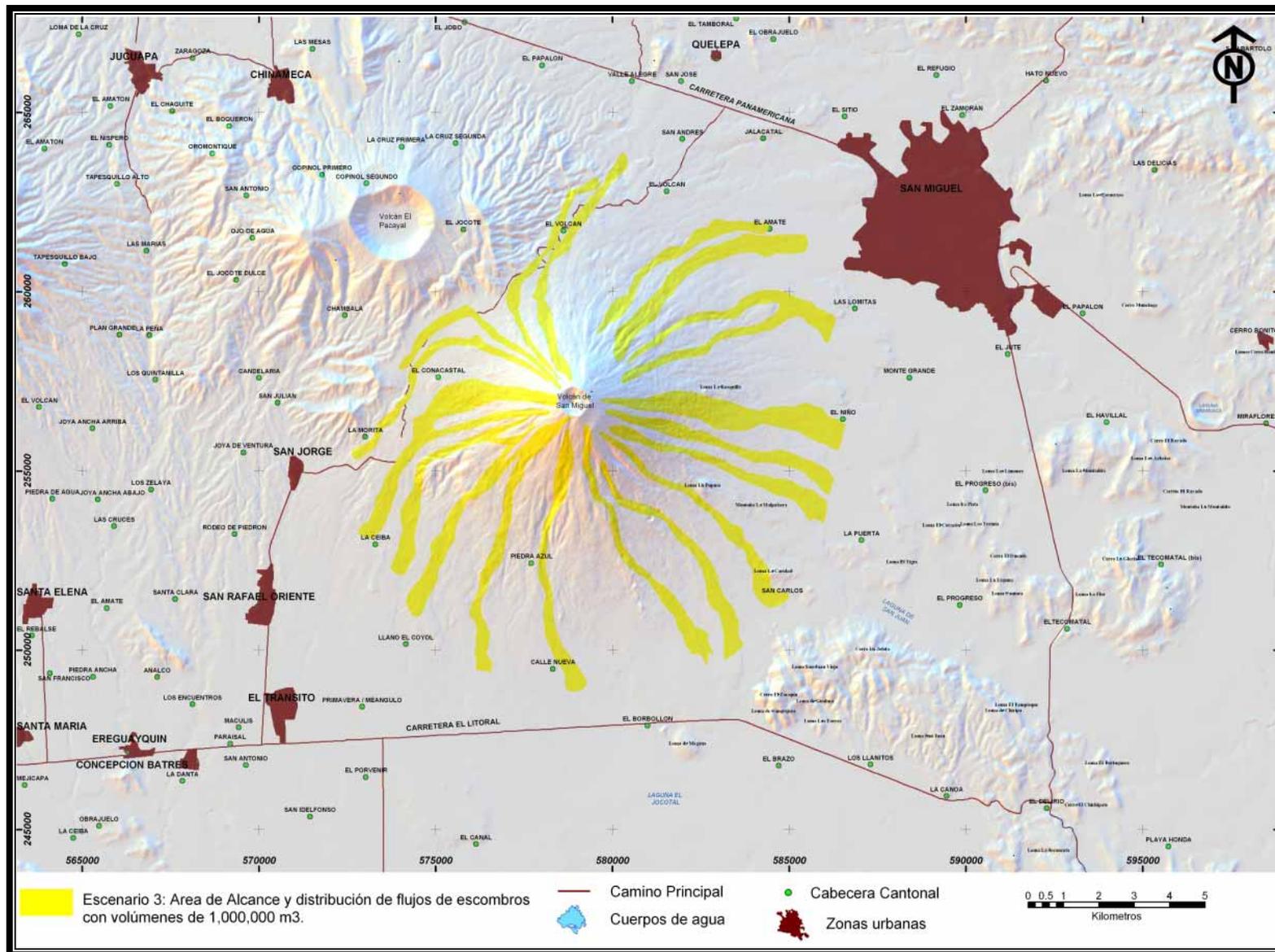


Figura 35: Escenario 3 de amenaza por flujos de escombros en el volcán de San Miguel, correspondiente a volúmenes de 1,000,000 m³ de escombros

6.7. Mapa de Escenarios de Amenaza por Flujos Piroclásticos

6.7.1. Flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos son mezclas turbulentas de gases, cenizas y fragmentos volcánicos a temperaturas entre 300°C y 800°C que se movilizan por los flancos del volcán a altas velocidades, que pueden superar los 100 km/hora (foto 18). Los flujos piroclásticos se componen de dos partes: una parte basal, densa y ceñida al piso y una oleada de gas caliente en forma de nube que precede o cabalga sobre el flujo, a la que frecuentemente se ha denominado nube ardiente.

Los flujos piroclásticos se pueden producir por dos mecanismos: el derrumbe del frente de un flujo de lava saliendo del cráter central, por la inestabilidad de la masa de lava en terrenos con pendientes fuertes y b) el colapso de columnas eruptivas sobre el borde del cráter generadas por actividad freática o freatomagmática, cuando el gas ya no puede sustentar todo el peso de la ceniza que arrastra hacia el arriba.

La actividad eruptiva freática se produce cuando un cuerpo de agua subterránea es calentado hasta el punto de ebullición por magma en su ascenso hacia la superficie. Se genera una explosión que tiene capacidad para fragmentar las rocas de la capa que contiene el agua y las depositadas encima de esta. La actividad eruptiva freatomagmática se produce cuando el magma se mezcla con el agua subterránea provocando un efecto similar. El resultado de esta actividad es una gran producción de gas y fragmentos de rocas, que son lanzados al aire a través de las columnas eruptivas. El colapso de las columnas eruptivas se produce cuando la velocidad de ascenso del gas no es suficiente para soportar el peso de la carga sólida, entonces se produce la deposición de flujos o coladas piroclásticas y también de oleadas piroclásticas. En estas últimas, la explosión es más dirigida y el flujo es laminar, de manera que en los depósitos pueden encontrarse estructuras de sedimentación y estratificación cruzada.



Foto 18: Flujo piroclástico en el Mt. St. Helens, Estados Unidos, mayo de 1980

Generalmente, en el cono volcánico los flujos piroclásticos se desplazan por las zonas deprimidas y/o quebradas, pero en zonas de pendientes más suaves se esparcen afectando una zona mucho más amplia de terreno. Los elementos topográficos no son obstáculo para el avance de estos flujos, que provocan la destrucción de todo lo que encuentran a su paso.

6.7.2. Flujos piroclásticos en el Volcán de San Miguel

Los flujos piroclásticos no son comunes en el volcán de San Miguel. Por la composición del magma y por el historial eruptivo del volcán, se puede afirmar que la probabilidad de generarse es baja, sin embargo, debido a que son muy destructivos y arrasaron con todo a su paso es importante considerarlos.

En el volcán de San Miguel se han encontrado algunos depósitos freatomagmáticos prehistóricos en los flancos este y oeste del cono, que han alcanzado distancias de hasta 10 kilómetros del cráter. Sin embargo, no se conocen este tipo de depósitos en época histórica. Estos flujos son del tipo bloques y cenizas, producidos probablemente por el colapso de frentes de coladas de lava, y se han reconocido al menos en cuatro ocasiones.

Dos de los depósitos de bloques y cenizas se localizaron al este del cráter en dirección a la ciudad de San Miguel (foto 19). Los otros dos se dirigieron al oeste y suroeste del cráter, en dirección a las ciudades de San Jorge y San Rafael Oriente y presentan espesores de más de 50 centímetros.

Además, existen depósitos de oleadas piroclásticas bien expuestos, de casi dos metros de espesor, en el interior del cráter del volcán (foto 20). La presencia de estratificación cruzada y laminar del depósito hace pensar que pudiera estar asociado a la existencia de una laguna en el interior del cráter del volcán. El hecho de no tener agua superficial actualmente en el cráter, hace disminuir la posibilidad de ocurrencia de este tipo de actividad. Sin embargo, no se debe descartar una erupción freatomagmática en el volcán de San Miguel.

La morfología actual del cráter del volcán de San Miguel presenta dos puntos más deprimidos: uno en el borde oriental y el segundo en la zona erosionada del sector noroeste. Ambas pueden actuar como camino preferencial por donde los flujos de lava y el colapso de los mismos se desplacen en dirección este-sureste, y nor-noroeste.

En resumen, las evidencias de campo sugieren que los flujos piroclásticos no constituyen eventos eruptivos comunes para este volcán. Pero, flujos de bloques y ceniza por colapso de frente de lava son altamente probables, cuando son emitidos por el cráter central, ya que la pendiente es fuerte y las lavas en su movimiento ladera abajo se fragmentan formando bloques y ceniza.

Es menos probable que los flujos piroclásticos se generen por colapso de columnas eruptivas de gran altura resultado de actividad explosiva vulcaniana o subpliniana, es decir, por erupciones similares a las del volcán Fuego, en Guatemala, que también tiene carácter basáltico.



Foto 19: Depósito de flujo de bloques y ceniza encontrado en la Finca Santa Lucía, en el flanco oriental del volcán y a 5 Km. al oeste de la ciudad de San Miguel.



Foto 20: Depósitos de oleada piroclástica en la planicie occidental del interior del cráter del volcán de San Miguel.

6.7.3. Metodología para la construcción de escenarios de amenaza por flujos piroclásticos

De acuerdo a la información disponible y a las observaciones de campo, la distribución de flujos piroclásticos es uno de los escenarios menos probables en el Volcán de San Miguel. No existen depósitos históricos, pero sí depósitos prehistóricos en los flancos este y oeste del cono. Aún siendo la probabilidad de ocurrencia baja, la evidencia de estos eventos prehistóricos hace pensar en la importancia de contar con un mapa de escenarios de amenaza por flujos piroclásticos.

Para poder elaborar un mapa de amenazas cuando se cuenta con escasos afloramientos en el volcán, es necesario utilizar un programa de computadora que permita llevar a cabo simulaciones de estos procesos bajo diferentes escenarios de magnitud eruptiva.

En primera instancia, se seleccionó el programa Flow3D (diseñado por Thomas P. Kover, de la Universidad Estatal de Nueva York en Búfalo, EUA) que se utilizó con la autorización del Dr. Michael F. Sheridan. Este programa permite simular procesos geológicos gobernados por la gravedad, como son los flujos piroclásticos, en un sistema geográfico que represente la superficie del terreno, denominado modelo digital de elevación (MDE). El MDE que representa la superficie del volcán de San Miguel fue construido por la Unidad de Servicios Informáticos del Servicio Nacional de Estudios Territoriales y se adaptó para su uso en la simulación de flujos piroclásticos para este volcán.

Debido a que no se conocen las condiciones futuras de la magnitud eruptiva, se utilizó el catálogo eruptivo, consistente en la información obtenida durante el trabajo de campo respecto a las distancias máximas alcanzadas por los flujos piroclásticos en el pasado. Las distancias máximas permitieron distinguir los alcances máximos posibles de los flujos piroclásticos en ciertas partes alrededor del volcán. Se diferenciaron los eventos que tuvieron un menor alcance y se atribuyen a flujos piroclásticos generados por erupciones de menor magnitud y por tanto la mayor probabilidad de ocurrencia. También se identificaron las distancias que caracterizan a los eventos menos probables, pero que podrían alcanzar mayores distancias respecto al cráter. Asimismo se identifican las distancias de escenarios de frecuencia o magnitud eruptiva intermedia entre los dos escenarios descritos. Las distancias máximas de cada escenario son el elemento de calibración fundamental para continuar con el proceso de simulación.

En la siguiente etapa del proceso, a través de la computadora, se simulan flujos piroclásticos que alcancen las distancias máximas identificadas para cada escenario mediante un proceso de ensayo y error. Los parámetros de simulación se van modificando hasta llegar al alcance (más una distancia adicional de seguridad) y distribución de los flujos piroclásticos que mejor representan a cada escenario, bajo las condiciones morfológicas actuales del edificio volcánico.

Los parámetros de simulación que permiten reproducir cada escenario son anotados y usados para llevar a cabo simulaciones alrededor del cono volcánico: en el caso de los flujos del escenario 1, éstos se llevaron a cabo utilizando un coeficiente de fricción (CF) de 0.035 y un factor de turbulencia (FT) de 0.000150, mientras que en el caso del escenario 2 el CF utilizado fue de 0.03 y el FT de 0.000150, y en el escenario 3, el CF fue de 0.0275 y el FT de 0.000150.

Los diferentes alcances de los flujos piroclásticos fueron unidos por líneas de igual alcance. Se obtuvieron diferentes patrones de distribución y alcance de flujos piroclásticos en el volcán de San Miguel para cada escenario:

-  **Escenario 1:** área que puede ser afectada por flujos piroclásticos muy pequeños asociados a derrumbes del frente de flujos de lava del cráter o a colapsos de pequeñas columnas eruptivas. Es el escenario con mayor probabilidad de ocurrencia (Figura 36).

-  **Escenario 2:** área que puede ser afectada por flujos piroclásticos provocados por erupciones explosivas de moderada magnitud. Se producen por colapso de los frentes de flujos de lava o de las columnas eruptivas de moderada magnitud. Ambos escenarios, tienen una baja probabilidad de ocurrencia pero podrían presentarse ante una reactivación del volcán de San Miguel (Figura 37).

-  **Escenario 3:** área que puede ser invadida por grandes flujos piroclásticos, asociados a eventos eruptivos altamente explosivos. Este tipo de actividad tiene una muy baja probabilidad de ocurrencia en el volcán de San Miguel, sin embargo no se descarta. (Figura 38)

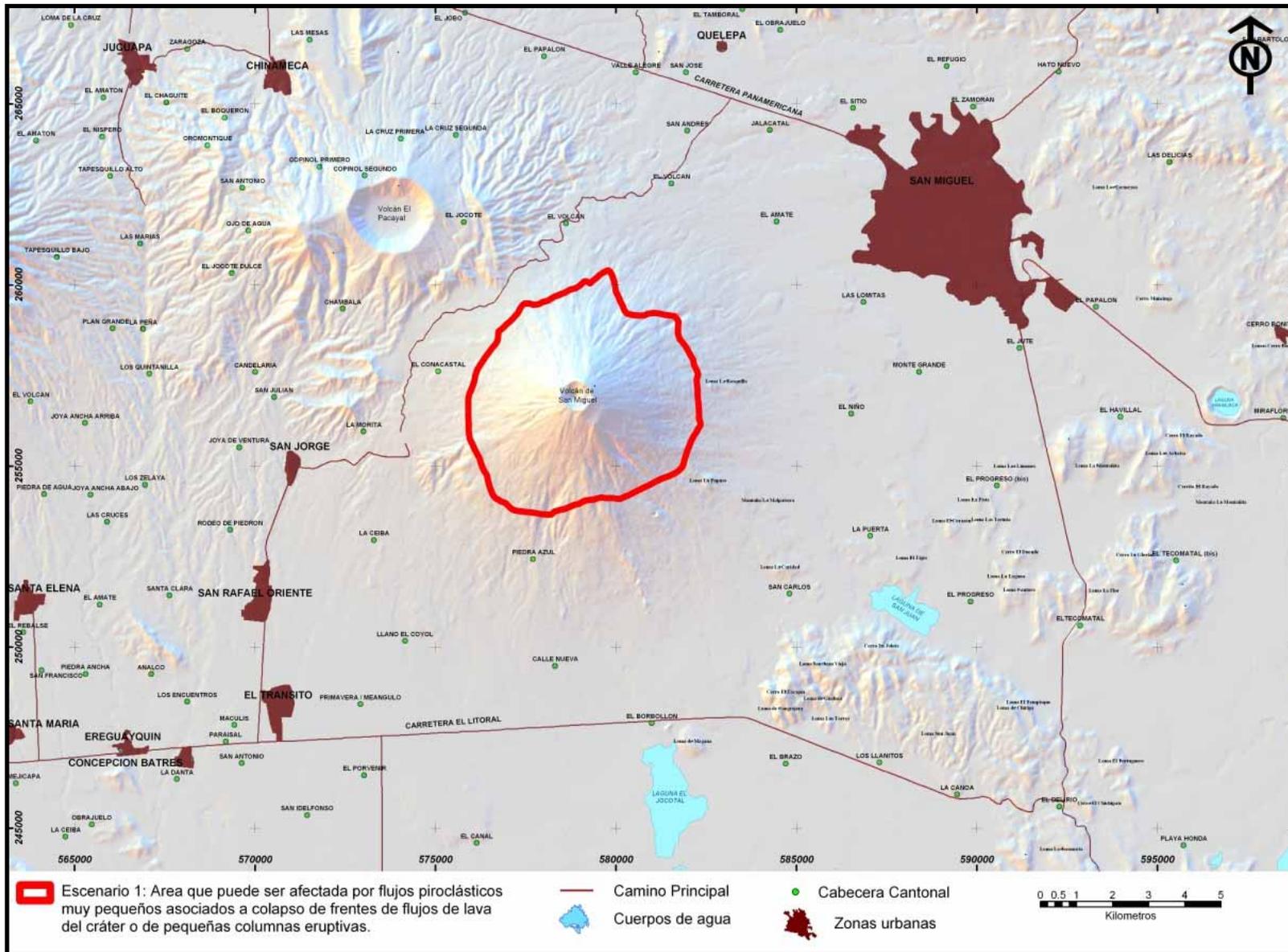


Figura 36: Escenario 1 de amenaza por flujos piroclásticos asociados a colapso de frentes de coladas de lava en el volcán de San Miguel, correspondiente a eventos de pequeña magnitud pero de mayor probabilidad.

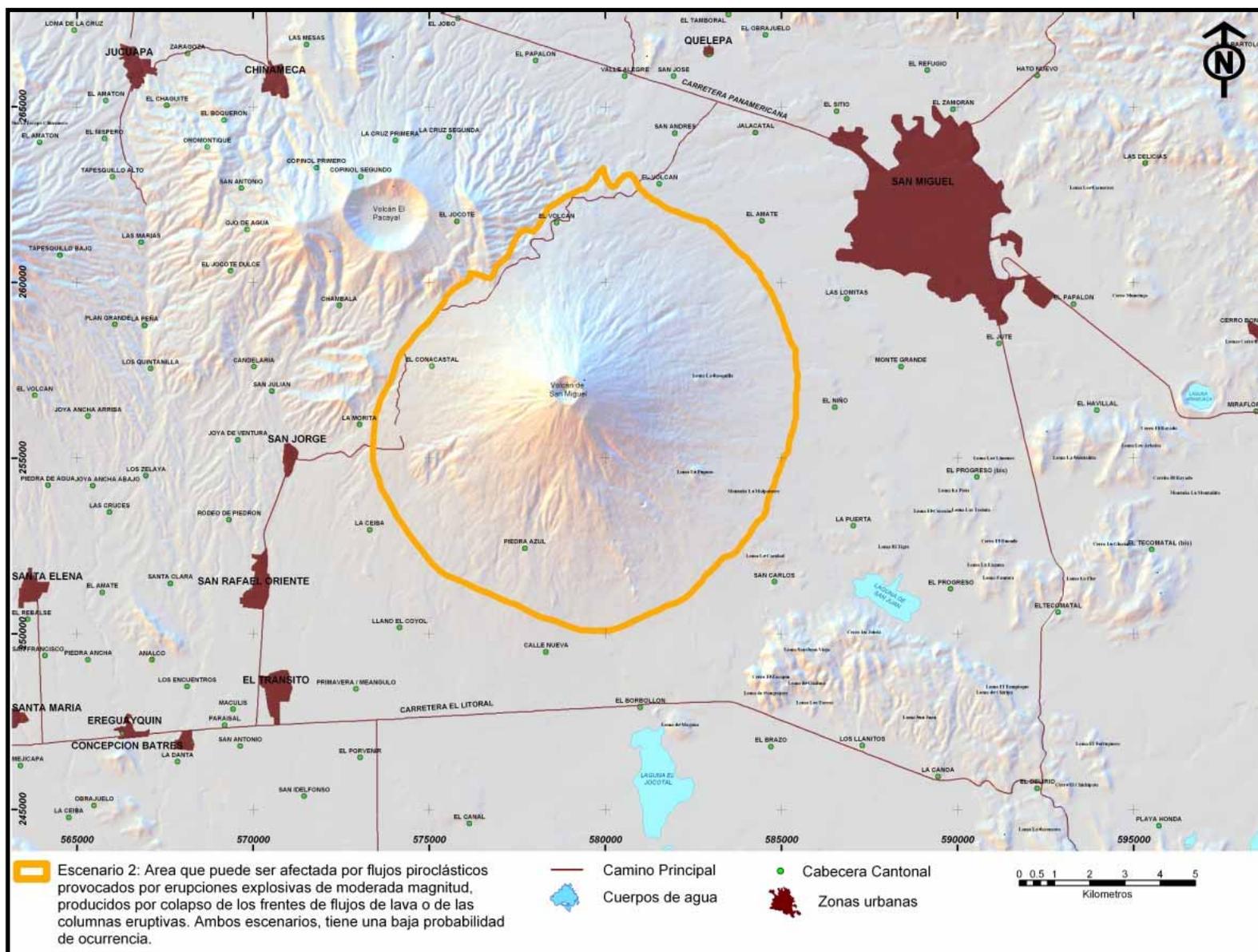


Figura 37: Escenario 2 de amenaza por flujos piroclásticos asociados a colapso de frentes de coladas de lava en el volcán de San Miguel, correspondiente a eventos de magnitud y probabilidad intermedia

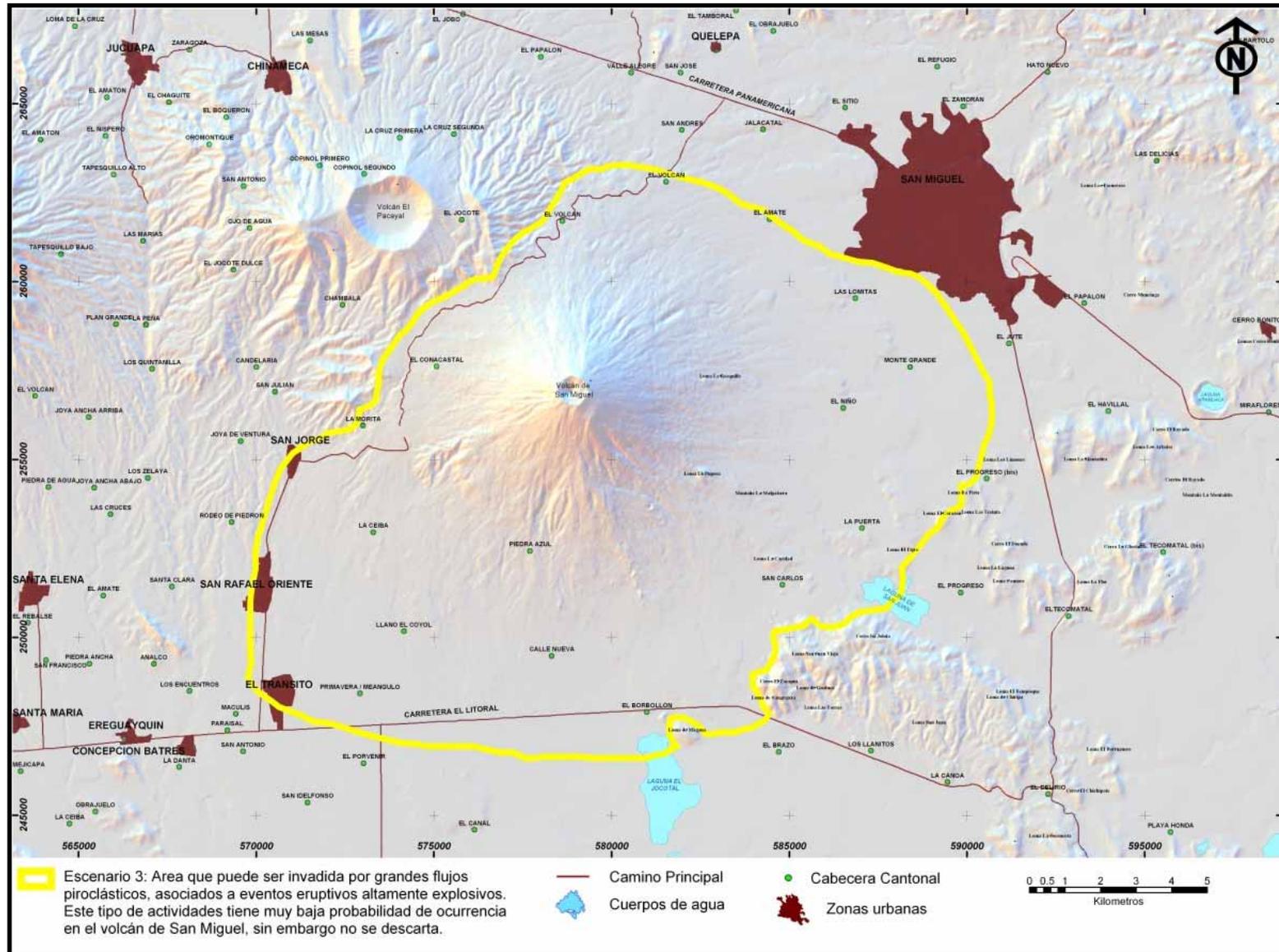


Figura 38: Escenario 3 de amenaza por flujos piroclásticos asociados a colapso de frentes de coladas de lava en el volcán de San Miguel, correspondiente a eventos de gran magnitud pero poco probables.

6.8. Mapa de Amenaza por Colapso Estructural

6.8.1. El Colapso Estructural

El **Colapso estructural**, también es llamado deslizamiento volcánico o deslizamiento gigante de un volcán. Consiste en el desprendimiento súbito de una parte del edificio volcánico, asociado a factores estructurales dinámicos. Generalmente ocurre en volcanes altos con pendientes fuertes, afectados por fallas y con rocas muy alteradas. También puede producirse por la deformación originada por intrusiones magmáticas (Siebert y otros. 1994).

El colapso estructural de grandes edificios volcánicos está fuertemente influenciado por el campo de esfuerzos existente en la región donde se encuentra el volcán. Las zonas más propensas a derrumbarse son aquellas que están en la dirección de la traza horizontal del esfuerzo mínimo.

El campo de esfuerzos, es decir, la distribución que tienen los esfuerzos de tensión, compresión e intermedio entre ambos, es fundamental para reconocer los sistemas de fracturamiento y fallas regionales. En particular, en las regiones volcánicas, el reconocimiento de los patrones del campo de esfuerzos permite identificar los patrones de migración magmática o volcánica y, en volcanes tales como el volcán San Miguel, permite identificar las zonas de debilidad. La posición y orientación del esfuerzo tensional es el más importante cuando se trata de colapsos estructurales en volcanes.

Las zonas de debilidad son aprovechadas por los volcanes para colapsar cuando las condiciones son las adecuadas para ello. Los factores que favorecen el colapso son: que el edificio se encuentre inestable, es decir, que las rocas que lo componen muestren fuerte alteración hidrotermal, fallas y fracturas de carácter regional que atraviesen al edificio volcánico. Inclusive, a menudo grandes terremotos disparan el colapso estructural, entre otros. La combinación de un edificio muy alto con sus rocas muy alteradas es quizá la condición que hace más probable el disparo del proceso.

El producto de los colapsos estructurales son enormes avalanchas de rocas (debris-avalanche). Estos flujos de escombros de grandes dimensiones (de hasta 10 km³) tienen una gran movilidad, mucho más alta que los flujos de pequeños dimensiones (Siebert y otros 1994). El impulso adquirido por los materiales en movimiento les permite sobrepasar barreras topográficas de hasta centenares de metros de altura.

Los efectos directos del colapso estructural son el sepultamiento y la destrucción de todo lo que encuentran a su paso y además alteran enormemente la topografía del terreno. Otro efecto directo es el inicio de la actividad volcánica, al cambiar el régimen de presiones sobre las cámaras magmáticas por la pérdida de un volumen importante de materiales del cono volcánico.

Por otra parte, hay que tener en cuenta los efectos indirectos, como son la formación y ocurrencia de flujos de escombros (lahares) en períodos de lluvia posteriores al evento, por movilización de los materiales deslizados. Así como el cambio en el recorrido de quebradas y flujos de agua, lo que puede generar algunas crecidas, avenidas o inundaciones.

6.8.2. Escenario de Amenaza por Colapso Estructural en el Volcán de San Miguel

El trabajo de campo en la zona del volcán, incluyendo la interpretación de fotos aéreas sugieren que posiblemente, la parte superior de un antiguo volcán mucho más alto, colapsó hace unos miles de años.

Dos evidencias sustentan la aseveración anterior:

- 1) Una morfológica: dos salientes en la morfología del cono localizados en lo alto de los flancos noreste y sureste entre las cotas 1800 y 1900 m de altitud (foto 4). La porción del volcán debajo de los salientes tiene diferencias en pendiente y morfología con respecto al cono superior. También las fotos aéreas muestran trazas que sugieren un posible colapso del volcán y la formación en la parte más alta del volcán de un cono de escorias y lavas desarrollado dentro de un viejo cráter.
- 2) Una geológica: depósitos típicos de avalancha de escombros asociados a colapso se encuentran en San Rafael Oriente, a 11 kilómetros al suroeste del cráter del volcán (foto 8). Los escombros del colapso aparecen mezclados con un flujo de bloques y ceniza de color gris y de composición basáltica, lo que da idea que su fuente es el volcán de San Miguel. El hecho de no ver contacto entre el flujo de bloques y ceniza con el depósito de escombros, sugiere que se trata de un mismo escenario eruptivo (Escobar, 2003)

Actualmente, el edificio no se nota afectado por una fuerte alteración hidrotermal de las rocas, lo que hace poco probable la ocurrencia de un colapso, pero en este trabajo se reconstruyó el campo de esfuerzos con el fin de identificar las áreas de mayor debilidad.

De acuerdo a las condiciones actuales del volcán, en caso de producirse en el futuro otro colapso, existe más alta probabilidad de que fuera el flanco occidental el que se desprendiera (flecha en color rojo) y como segunda opción el flanco este (flecha en color naranja) (Figura 39).

Este tipo de proceso tienen muy baja probabilidad de ocurrencia en el volcán de San Miguel, pero por ser sus efectos muy grandes y tener un gran impacto es importante considerarlo.

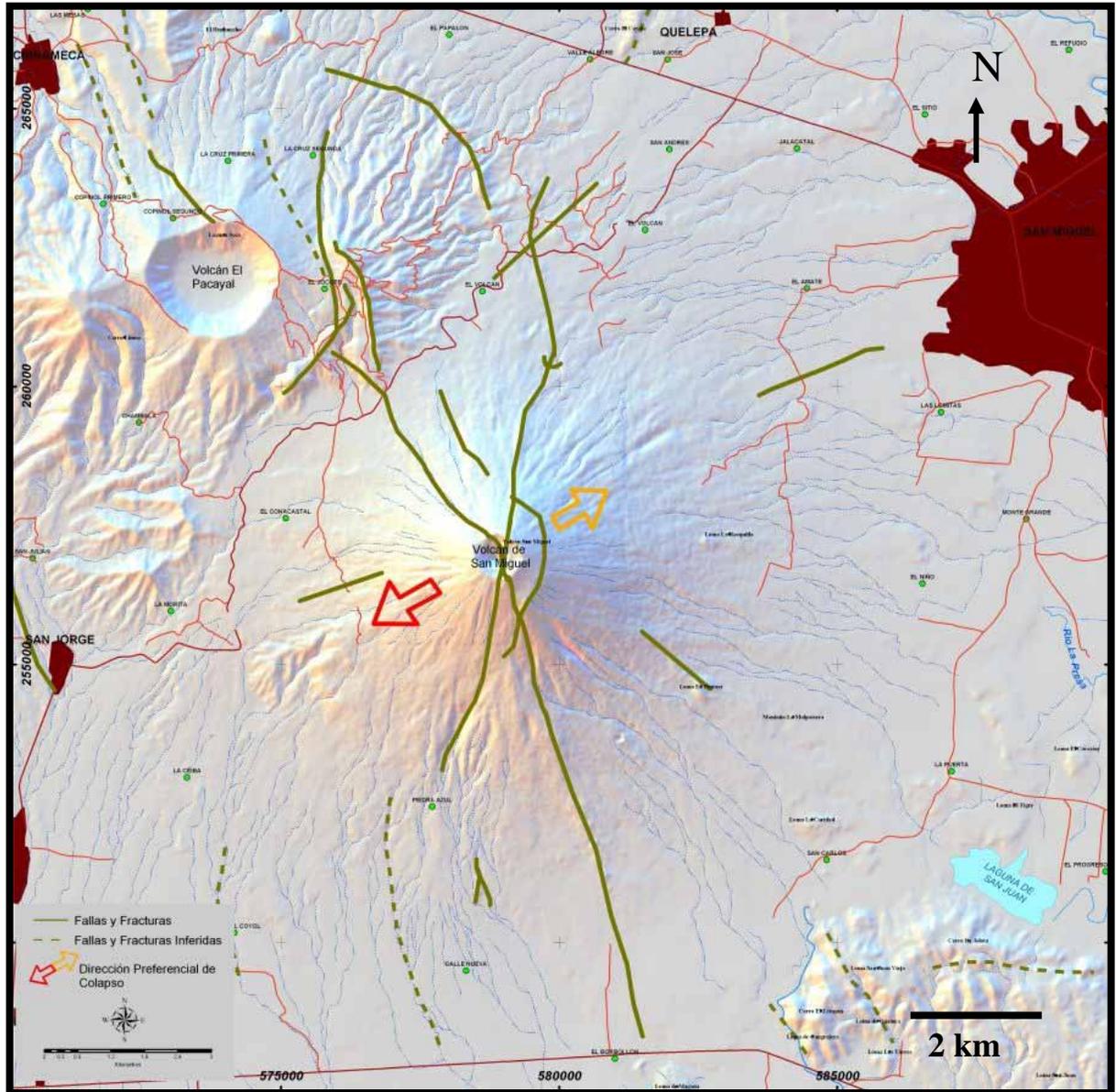


Figura 39: Posible escenario de colapso estructural: la flecha roja indica que el colapso estructural puede ocurrir como primera opción hacia el occidente del volcán; flecha anaranjada indica que también podría ocurrir hacia el oriente. Las líneas verdes señalan las fallas principales que afectan al volcán (SNET, 2004).