



# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

### **COLEGIO DE INGENIERÍA GEOFÍSICA**

**VULNERABILIDAD POR CAÍDA DE CENIZA VOLCÁNICA  
EN LA COMUNIDAD DE SANTIAGO XALITZINTLA,  
PUEBLA.**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO GEOFÍSICO**

PRESENTA:

**JOSÉ RAFAEL MARTÍNEZ PONCE**

ASESOR:

**DR. JOSÉ LUIS GONZALEZ GUEVARA**

## Dedicatoria

A mi madre Dra. María Elena Ponce Castaneira por el esfuerzo, comprensión, bendiciones, consejos, confianza, apoyo y regaños durante mi formación como profesional, este trabajo es tuyo GRACIAS.

A mis hermanos por su apoyo, comprensión y consejos son un pilar en mi vida Rosa Elena Martínez Ponce, Fernando Martínez Ponce y Gerardo Martínez Ponce GRACIAS.

En memoria de mi padre Rafael Martínez Espinoza.

A mis amigos que en todo momento han compartido tiempos de alegrías y tristezas, Osman, Lino, Erick, Iván, Adrián, Daniel, Humberto muchas GRACIAS.



## Agradecimientos

Al Dr. José Luis González Guevara, asesor de este trabajo y mi docente en mi formación universitaria, sin duda un gran catedrático muchas GRACIAS.

A todos mis profesores de todos los niveles educativos, por dar lo mejor de sí mismos y compartir sus conocimientos, su trabajo es de gran valor para la sociedad.

Agradecimientos especiales a la Dra. Ivonne Silva Domínguez, Ant. Luis Miguel Martínez Ordaz, Lic. José Rubén Acevo Zarate e Ing. Octavio Efrén Vázquez López; por su confianza, consejos, conocimientos compartidos, paciencia, apoyo, amistad y ser mis mentores en la Protección Civil. MUCHAS GRACIAS.



In terra veritas

# ÍNDICE

Introducción.....	I
Planteamiento del Problema.....	II
Justificación.....	III
Objetivos.....	IV

## CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE VULCANOLOGÍA

1.1 Vulcanismo.....	1
1.2 Constitución Física de Volcanes.....	3
1.3 Tipos de Materiales Volcánicos.....	3
1.3.1 Gases.....	4
1.3.2 Lavas.....	4
1.3.3 Materiales Sólidos.....	6
1.4 Tipos de Volcanes.....	6
1.5 Riesgos Volcánicos.....	7
1.6 Formación de Aerosoles.....	9
1.7 Vulcanismo en México.....	9
1.8 Volcán Popocatepetl.....	11
1.9 Historia Eruptiva del Volcán Popocatepetl.....	12
1.10 Medidas Preventivas .....	13
1.10.1 Monitoreo Sísmico.....	13
1.10.2 Monitoreo Geodésico.....	13
1.10.3 Monitoreo Visual .....	13

## **CAPÍTULO 2. SANTIAGO XALITZINTLA**

2.1 Población de Estudio.....	15
2.2 Geología del Área De Investigación.....	16
2.3 Riesgo Volcánico en la Comunidad de Santiago Xalitzintla.....	16
2.4 Plan Operativo Popocatépetl.....	20
2.4.1 Estudios Realizados.....	26

## **CAPÍTULO 3. MODELOS DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA**

3.1 Clasificación General.....	29
3.2. Variables de Importancia.....	30
3.3. Modelos Gaussianos.....	32

## **CAPÍTULO 4. ESCENARIOS PROPUESTOS**

4.1 Análisis de Resultados.....	36
4.2. Consideraciones para Simular la Pluma Volcánica. ....	36

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>52</b>
--------------------------	-----------

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>54</b>
--------------------------	-----------

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1 Corrientes convectivas al aumentar su temperatura se desplazan hacia abajo, y al retomar su temperatura retornan hacia arriba, produciendo un ciclo, ocasionando el movimiento de las placas tectónicas.....	1
Figura 1.2. Tipos de materiales volcánicos, fuente: Propia.....	3
Figura 1.3 Cinturón de Fuego del pacifico, USGS (1987).....	10
Figura 1.4. Vista del volcán Popocatépetl desde Atlixco, Puebla, fuente: propia.....	11
Figura 1.5. Volcán Popocatépetl, Espinasa R. (2013).....	14
Figura 2.1. Municipio de San Nicolás de los Ranchos, fuente: Propia.....	15
Figura 2.2. Gráfico del riesgo en Santiago Xalitzintla, fuente: Propia.....	17
Figura 2.3. Mapa de riesgos del Volcán Popocatépetl (CENAPRED).....	22
Figura 2.4. Ruta de evacuación de Santiago Xalitzintla. (Plan Operativo Popocatépetl, Protección Civil del estado de Puebla).....	25
Figura 2.5. Diagrama de flujo vehicular. (Plan Operativo Popocatépetl, Protección Civil del Estado de Puebla).....	23
Figura 2.6. Predicciones de la dispersión de la ceniza volcánica mediante observaciones de satélite (VAAC).....	26
Figura 2.7. Simulación de dispersión de la ceniza del volcán Popocatépetl. (Instituto de Geofísica de la UNAM).....	27
Figura 2.8. Dispersión de ceniza volcán Popocatépetl del año 2012. (UNAM).....	28

Figura 4.1. Posibles escenarios de un volcán al incrementar su actividad. (CENAPRED, 2013).....	38
Figura 4.2. Santiago Xalitzintla, fuente: Propia.....	38
Figura 4.3. Prueba 4 y prueba 5, comparación de la temperatura del viento.....	42
Figura 4.4. Prueba 3 y prueba 5 respectivamente. Comparación de la temperatura del viento.....	43
Figura 4.5. Comparación de la temperatura en la prueba 3 y prueba 6 respectivamente...45	45
Figura 4.6. Aumento del flujo de salida. Pruebas 12 y 13 respectivamente.....	46
Figura 4.7. Pruebas 9 y 11 respectivamente, análisis del parámetro de Pasquill.....	48
Figura 4.8. Prueba 21, concentración de ceniza mínima para los diferentes escenarios.....	49
Figura 4.9. Vulnerabilidad de Santiago Xalitzintla, Puebla, fuente: Propia.....	50
Figura 4.10. Disposición gráfica de la vulnerabilidad de Santiago Xalitzintla, fuente: propia.....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 Índice de explosividad volcánica (CENAPRED).....	9
TABLA 2.1 Poblaciones en alto riesgo volcánico. (Plan Operativo Popocatepetl, Protección Civil del estado de Puebla).....	24
TABLA 2.2 Poblaciones en moderado riesgo volcánico. (Plan Operativo Popocatepetl, Protección Civil del estado de Puebla).....	24
TABLA 2.3 Capacidad de refugios temporales de comunidades de alto riesgo (Plan Operativo Popocatepetl, Protección Civil del Estado de Puebla).....	26
TABLA 4.1 Distribución de tamaño, densidad y velocidad terminal de ceniza, resultados parciales presentados por Amaro et al, en el primer Congreso Nacional de Riesgos, BUAP 2013.....	37
TABLA 4.2 Pruebas de escenarios por caída de ceniza volcánica del Popocatepetl.....	39
TABLA 4.3 Categorías de estabilidad atmosférica definidas por Pasquill (1962).....	41



## INTRODUCCIÓN

Desde su formación hasta la actualidad, la Tierra ha experimentado muchos cambios. Las primeras etapas, desde que empezó la solidificación de la masa incandescente hasta la aparición de una corteza permanente. La cual ha evolucionado por los fenómenos geológicos que han pasado a lo largo del tiempo. Un fenómeno geológico en particular que ha dejado huella en la historia del hombre es el vulcanismo. Ya que el hombre ha sido testigo de su grandeza y su poder destructivo a lo largo de su existencia. Un claro ejemplo es la erupción del volcán Vesubio en la ciudad de Pompeya a escasos kilómetros de la ciudad de Nápoles en el país de Roma, en donde una erupción pliniana devastó a la ciudad dejando cerca de 2000 víctimas carbonizadas por los flujos piroclásticos. Otro claro ejemplo suscitado en nuestro país, fue la erupción del Volcán Chichonal o también conocido como Chichón por su forma tan peculiar, esta erupción se originó alrededor de las 23:32 hrs. Un 28 de Enero de 1982 con una erupción pliniana, fue tan violenta que en cuarenta minutos la columna eruptiva abarcó 100 km de diámetro por casi 17 de alto.

Un volcán significativo del centro del país de México, es el volcán Popocatepetl, el cual desde tiempos inmemorables ha estado en constante actividad, tanto, que los antiguos pobladores presenciaron grandes erupciones y las han plasmado en pinturas. Los cortes de tierra que exhiben los flujos piroclásticos y caída de ceniza de 60 cm en zonas cercanas y 30 cm, nos indican erupciones agresivas y muy intensas. Es por ello que se requiere un análisis con simulaciones de caída de ceniza en zonas cercanas al volcán, para indagar el impacto que tendría en las poblaciones cercanas y sus afectaciones. Para ello, se requiere tener conocimiento de los techos de las viviendas más vulnerables de las poblaciones, y teniendo conocimiento de las propiedades físicas de la ceniza volcánica (densidad, porosidad, permeabilidad, etc.) podremos visualizar por medio de un mapa de riesgos las zonas con mayor afectación a causa de un evento eruptivo mayor.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

El volcán Popocatépetl por su situación geográfica inmediatamente se vuelve un peligro para la comunidad que se encuentra a su alrededor, como se verá en el desarrollo de este trabajo de tesis, las erupciones volcánicas no sólo emanan coladas de lava basáltica, pueden también desarrollar flujos piroclásticos, arrojar misiles balísticos, lahares e intensa caída de ceniza, que incrementan exponencialmente el riesgo volcánico.

Uno de los peligros volcánicos que se exponen los pobladores que habitan en las faldas de los volcanes, es la ceniza volcánica. Si bien no es toxica químicamente es altamente abrasiva, produciendo enfermedades en las vías respiratorias en seres humanos y animales; en situaciones de erupciones prolongadas se podrían colapsar techos de viviendas por la acumulaciones de la ceniza volcánica, padecer de abastecimiento de comida y agua por largos tiempos y la suspensión de redes de comunicación. Es por ello que este trabajo se dedicara específicamente a la creación de escenarios de caída de ceniza, para indagar el impacto que tendría sobre la población de Santiago Xalitzi una erupción mayor del volcán Popocatépetl.

## **JUSTIFICACIÓN**

Actualmente se ha incrementado el interés por el fenómeno volcánico con el desarrollo de proyectos, investigaciones, artículos etc. Sin embargo, las investigaciones que se han ido produciendo se crean a base de simulaciones o modelaciones matemáticas en un programa computacional; en donde se crean posibles escenarios de una erupción volcánica, se han creado simulaciones de flujos piroclásticos, lahares, dispersión de ceniza, coladas basálticas etc. Que determinan factores atmosféricos y del mismo edificio volcánico, contando de antemano los registros históricos que se exhiben en los alrededores del volcán y literatura antigua. Estas modelaciones matemáticas nos demuestran como impactará este fenómeno en las poblaciones cercanas al volcán y así poder tomar acciones de prevención, creación de programas de rehabilitación en la infraestructura de las comunidades, programas de pavimentación en rutas de evacuación, planes de contingencias, simulacros, capacitaciones, diagnósticos de riesgos etc.

## **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar escenarios eruptivos del volcán Popocatepetl y determinar cuáles podrían afectar a la localidad de Santiago Xalitzintla por caída de ceniza y analizar los factores que intervienen para que el riesgo volcánico aumente.

## **OBJETIVOS PARTICULARES.**

1. Generar escenarios de erupciones volcánicas en donde se pueda analizar las concentraciones máximas de ceniza que caerían en la población de Santiago Xalitzintla.
2. Determinar los parámetros que intervienen en una erupción volcánica para que esta represente un riesgo para la comunidad.
3. Contribuir con el análisis de la dispersión de ceniza volcánica y así las autoridades correspondientes tomen medidas preventivas ante una contingencia de esta naturaleza.

# CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE VULCANOLOGÍA

## 1.1 VULCANISMO

Los procesos volcánicos están estrechamente relacionados con el movimiento de las placas tectónicas que constituyen la superficie terrestre; dichas placas tectónicas descansan sobre la capa superior del manto, cuyas rocas se comportan como un fluido, lo que genera la formación de corrientes convectivas, dicha capa es llamada astenosfera (Espindola, 2006). Las corrientes convectivas, Figura 1.1, producen que las placas tectónicas convergen entre sí o se fragmenten, las placas en el fondo del océano se separan o divergen creando nueva corteza terrestre por el ascenso del magma incandescente. El material fundido de la astenósfera, o magma, sube, mientras que la materia fría y endurecida se hunde cada vez más hacia al fondo, dentro del manto. La roca que se hunde finalmente alcanza las elevadas temperaturas de la astenósfera inferior, se calienta y comienza a ascender otra vez (Espindola, 2006).

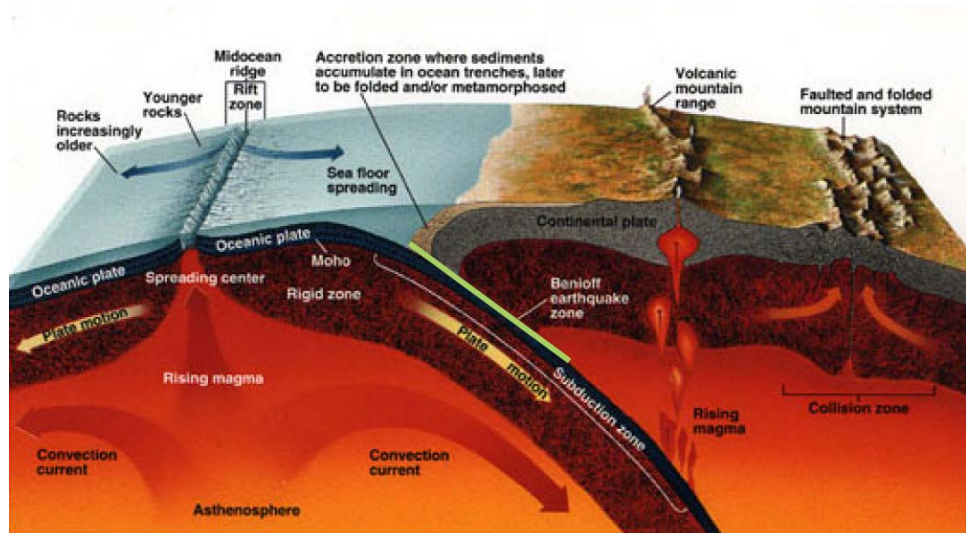


Figura 1.1. Ilustra las corrientes convectivas, las corrientes de magma, al aumentar su temperatura se desplazan hacia abajo, y al retomar su temperatura retornan hacia arriba, produciendo un ciclo, ocasionando el movimiento de las placas tectónicas, tomada de: <http://cuicatlali.wordpress.com/2011/03/>

El vulcanismo se produce cuando el material fundido del interior de la Tierra sale a la superficie a través de grietas, fisuras y orificios; a este material que sale se lo denomina lava, se caracteriza porque se enfría rápidamente y libera sus gases disueltos. Por otra parte, algunos de los minerales de alta temperatura de consolidación se forman y se separan del magma; de acuerdo a la viscosidad del material, varían las características de la erupción volcánica (De la Cruz, 2008).

Un volcán es una fisura de la corteza terrestre sobre la cual se acumula un cono de materia fundida y sólida que es lanzada a través de la chimenea desde el interior de la Tierra; en la cima de este cono hay una formación cóncava llamada cráter, cuando se produce actividad en un volcán se dice que está en erupción.

Los volcanes son por lo general estructuras compuestas de material fragmentado y corrientes de lava; a través de la chimenea sale la lava que escurre por las laderas del cono, que se va formando por sucesivas capas solidificadas, todas inclinadas hacia el exterior de la chimenea. El material rocoso expulsado se encuentra desde 4 hasta 200 kilómetros de profundidad, donde pueden alcanzar temperaturas superiores a los 1,000° C. Habitualmente la lava recién emitida bordea temperaturas entre 700° C y 1,200° C, dependiendo de su composición química (Saénz, R. 1998).

Las rocas que se forman a partir del enfriamiento del magma se denominan rocas ígneas; si el enfriamiento tuvo lugar en el interior de la tierra, y las rocas fundidas no llegaron a emerger a la superficie, se llaman rocas ígneas intrusivas. Cuando la roca se ha formado a partir del enfriamiento de lava en la superficie, se denomina roca ígnea extrusiva. También existen rocas ígneas enfriadas a gran profundidad llamadas plutónicas.

Los volcanes que se forman por la acumulación de materiales emitidos por varias erupciones a lo largo del tiempo geológico se le llaman poligenéticos, o volcanes centrales; un ejemplo claro es el volcán Popocatepetl. Existe otro tipo de volcanes que nacen, desarrollan una erupción que puede durar algunos años y se extinguen sin volver a tener otra actividad; en lugar de ocurrir otra erupción en ese volcán, puede nacer otro volcán similar en la misma región. A este tipo de volcán se le denomina monogenético y es muy abundante en México, un ejemplo de este tipo de volcanes es el Parícutín. Generalmente los volcanes de este tipo son más

pequeños que los volcanes centrales y en su proceso de nacimiento y formación producen erupciones menos intensas pero que pueden prolongarse años (De la Cruz, 2008).

## 1.2 CONSTITUCIÓN FÍSICA DE VOLCANES

Todas las erupciones se producen a través de grietas en la superficie a partir de las que se originan los volcanes. Las partes más importantes de un volcán son:

- **CÁMARA MÁGMATICA:** Es la cavidad bajo la superficie en el que está contenido todo el magma, pueda alcanzar dimensiones de hasta 100 km<sup>2</sup>.
- **CHIMENEA:** Es el conducto vertical por el cual el magma asciende desde la cámara magmática hasta la superficie.
- **CRÁTER:** Es la abertura en la superficie en la cual aflora la chimenea y por la que el material magmático sale al exterior.
- **LAVA:** Es el material magmático que sale al exterior por el cráter.
- **CONO:** Es la estructura que se forma en la superficie por la acumulación y solidificación de los materiales que expulsa el volcán. a menudo, tiene forma de montaña cónica.

A pesar de que las características generales de todos los volcanes son las mismas, existen distintos tipos de erupciones; como consecuencia la estructura y morfología de los volcanes también es variable.

## 1.3 TIPOS DE MATERIALES VOLCÁNICOS

En las erupciones volcánicas se expulsan diferentes materiales al exterior; estos materiales son muy diversos y pueden clasificarse por su estado físico, ver esquema 1.1.

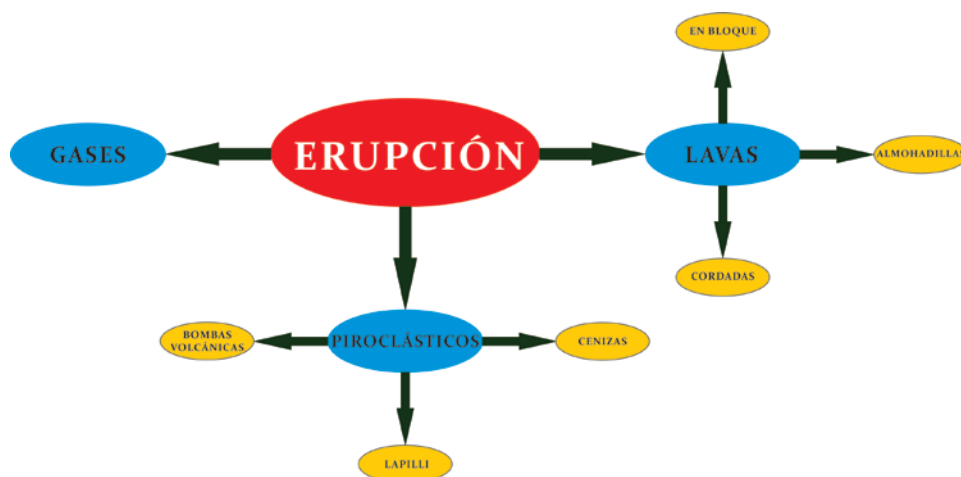


Figura 1.2. Tipos de materiales volcánicos, fuente: Propia.

### **1.3.1 GASES**

Los gases son el principal vehículo de transporte hacia superficie, además, condicionan la viscosidad e influyen en la violencia de las erupciones; se emiten como consecuencia de la desgasificación de la cámara magmática (después de la erupción) o por la desgasificación de los materiales volcánicos. Suelen ser los primeros productos volcánicos que alcanzan la superficie, predominando en las etapas iniciales de la erupción. Las emanaciones gaseosas poseen alta temperatura (100-300 C) y tienen un alto contenido en óxidos de azufre.

La proporción y naturaleza de los gases que llevan en disolución los magmas naturales es muy variable, en general, los magmas considerados primitivos, es decir, los formados por fusión de rocas del manto, suelen tener menores proporciones de gases en disolución, mientras que los que se consideran derivados, muchas veces formados por evolución de los anteriores, suelen tener mayores proporciones. En los magmas naturales, el porcentaje en peso de los productos volátiles no suele superar el 1 %, mientras que en los magmas derivados o evolucionados pueden alcanzar unas pocas unidades porcentuales, aunque raramente se supere el 5 %. La composición de la fracción volátil de los magmas también varía notablemente, aunque predomina en general el H<sub>2</sub>O sobre otros gases como el CO<sub>2</sub> y el SO<sub>2</sub>, unas cifras aproximadas (porcentaje en moles) de la proporción de estos gases, que son los principales, serían las siguientes:

**H<sub>2</sub>O-35-90% mol.**

**CO<sub>2</sub>-5-50% mol.**

**SO<sub>2</sub>-2-30% mol.**

El dióxido de azufre, aunque su contenido en los magmas sea relativamente reducido, es el gas con mayor impacto sobre las variaciones climáticas. Su abundancia es relativamente elevada en los magmas basálticos, aunque sus proporciones de unas a otras erupciones pueden variar (Fúster, 2004).

### **1.3.2 LAVAS**

Son magmas parcialmente desgasificados que fluyen por el cráter y se derraman sobre la superficie; la extensión, velocidad y fluidez de las coladas dependen de su composición,



temperatura y volumen de gases, así como de la topografía por la cual se desliza. Al igual que con las rocas, podemos establecer una clasificación para las lavas en ácidas, intermedias y básicas, se diferencian por su viscosidad, y ésta depende de la composición química del fundido y en concreto de la cantidad de sílice. Cuanto más sílice, más viscosa es la lava. Existen componentes que disminuyen la viscosidad de la lava como son los álcalis y el agua. La explosividad está relacionada con la presencia de gases en la lava, cuanto más se encuentren disueltos más explosiva será la lava.

Las lavas básicas son las lavas más fluidas y avanzan con gran rapidez y recorren largas distancias; no suelen presentar un comportamiento explosivo. Los tres principales tipos de lavas son: riolitas, con alto contenido de sílice (más del 60%) y un bajo contenido de minerales ferro-magnesianos; andesita, con un contenido intermedio de sílice (aproximadamente 60%) y de ferro-magnesianos; y basaltos, con bajo contenido de sílice (menor de 50%) y un alto contenido de ferro-magnesianos. Debido a que los materiales ferro-magnesianos son generalmente de color oscuro, las rocas más claras serán las de composición riolítica y las más oscuras son las basálticas (Navarrete, 2005).

Podemos distinguir varios tipos de lavas (Navarrete, 2005):

- LAVA CORDADA: Son lavas fluidas que recorren largas distancias, solidificándose lentamente. La superficie lisa de estas lavas en contacto con el aire desarrolla una costra fina y muy plástica, por debajo de la cual continua el desplazamiento de la lava, lo que produce la formación de rugosidades en la costra superior. El resultado es una superficie con un aspecto de cuerdas alineadas.
- LAVA EN BLOQUE: Son lavas viscosas que solidifican rápidamente; se forma una costra superior rígida y de gran espesor mientras que el interior es fluido. Debido a la desgasificación de la lava de un modo brusco y explosivo la colada se fragmenta y se ocasiona la formación de bloques, que tienden a amontonarse por el empuje del avance de la lava aún fundida. También son conocidas como "malpais" debido a la dificultad que supone andar por encima de ella.
- LAVA EN ALMOHADILLA: Cuando la lava entra en contacto con el agua se desprenden fragmentos de lava que se enfrían rápidamente, adquiriendo un aspecto de pequeñas

almohadillas. La solidificación se extiende progresivamente hacia el interior de la almohadilla.

### **1.3.3 MATERIALES SOLIDOS**

Los materiales sólidos emitidos durante una erupción volcánica se conocen con el nombre de piroclastos; están compuestos por diversos materiales que son lanzados a la atmósfera en las explosiones volcánicas y caen sobre la superficie conservando su forma, dimensión y mineralogía original. Dependiendo del tamaño que alcanzan, diferenciamos los siguientes tipos (Navarrete, 2005):

- **BOMBAS VOLCÁNICAS:** Son materiales cuyo tamaño oscila entre 3 y 30 cm, aunque las hay más grandes; tienen una forma sub redondeada, o la adquieren al girar y se aplastan ligeramente al caer.
- **LAPILLI:** Son materiales cuyo tamaño oscila entre 3 y 30 mm, presentan numerosos poros que hacen que sean muy ligeros y floten en el agua.
- **CENIZAS:** Son materiales muy finos procedentes de la pulverización de la lava, constituidas por diminutos fragmentos de vidrio volcánico. Las cenizas de grano grueso logran caer en las faldas del cono volcánico, y las cenizas más finas logran recorrer grandes distancias en dirección del viento predominante.

### **1.4 TIPOS DE VOLCANES**

Dependiendo de la temperatura de los magmas, de la cantidad de productos volátiles que acompañan a las lavas y de su fluidez o viscosidad, los tipos de erupciones pueden ser (Navarrete, 2005):

- **HAWAIIANO:** Este volcán es de lavas muy fluidas y sin desprendimientos gaseosos explosivos; la lava se desborda cuando rebasa el cráter y se desliza con facilidad, formando verdaderas corrientes a grandes distancias.
- **ESTROBOLIANA:** La lava es fluida, con desprendimientos gaseosos abundantes y violentos; debido a que los gases pueden desprenderse con facilidad, no se producen pulverizaciones o cenizas. Cuando la lava rebasa los bordes del cráter, desciende por sus

laderas y barrancos, pero no alcanza tanta extensión como en las erupciones de tipo hawaiano.

- **VULCANIANO:** Este tipo de volcán desprende grandes cantidades de gases de un magma poco fluido que se consolida con rapidez; las explosiones son muy fuertes y pulverizan la lava, produciendo gran cantidad de cenizas que son lanzadas al aire acompañadas de otros materiales. Cuando la lava sale al exterior se consolida rápidamente, pero los gases que se desprenden rompen y resquebrajan su superficie, que por ello resulta áspera e irregular.
- **PELEANA:** Su nombre se debe a la erupción que sufrió el Monte Pelé en la isla de la Martinica; se caracteriza por la emisión de magmas ácidos, casi siempre andesíticos y extremadamente viscosos. Son erupciones muy explosivas, la lava se solidifica en la parte alta de la chimenea impidiendo la salida de los gases, que terminan por abrirse lateralmente arrastrando a las lavas y originando las llamadas nubes ardientes. La fase final de este tipo de erupciones suele consistir en la formación de un domo.

### **1.5 RIESGOS VOLCÁNICOS**

Los riesgos asociados a un volcán son aquellos que afectan a las comunidades cercanas al edificio volcánico, estos efectos están asociados a la magnitud de la erupción, características climáticas e hidrológicas en su entorno y tipo de erupción; a continuación se describen estos fenómenos volcánicos (Rojas y Paredes, 2008).

- **LAHARES:** Son una mezcla de agua con depósitos volcánicos y escombros que se incorporan al flujo, por lo general, estos son uno de los peligros más destructivos en zonas volcánicas, debido a que pueden alcanzar distancias de varias decenas de kilómetros. El poder destructivo de los lahares depende de la alta concentración de sólidos y de la velocidad que estos alcancen.
- **CAÍDA DE CENIZA:** El nombre más apropiado para este peligro sería caída de tefra, pues este término encierra materiales de caída de varias granulometrías, su dispersión depende de la dirección y velocidad del viento y por lo tanto puede alcanzar varios kilómetros de distancia con respecto al cráter. Sus depósitos presentan una diferenciación de su granulometría con respecto a la distancia del cráter.

- **BOMBAS VOLCÁNICAS:** Es otro tipo de material de caída, que a diferencia del anterior, este no es afectado por la dirección de los vientos; la velocidad y alcance máximo que estos proyectiles está directamente relacionado con la energía mecánica liberada por la erupción, por lo general, los grandes bloques (mayores de 2.00 metros) se impactan dentro de un radio de 4 km, pero en erupciones grandes los fragmentos de diámetro pequeño (3 a 5 cm) son capaces de alcanzar distancias de 13 a 15 km.
- **FLUJOS PIROCLÁSTICOS:** Son una mezcla de gas, bloques y ceniza que se desplazan a grandes velocidades y altas temperaturas; junto con los lahares, son los peligros más devastadores de una erupción volcánica. Un peligro adicional asociado a los flujos piroclásticos son las Nubes ardientes, estas son una mezcla de ceniza y gas a temperaturas superiores a los 300° C que viajan con mayor velocidad que el flujo piroclásticos y son capaces de superar las barreras topográficas. A estos dos peligros también se les conoce como *Corrientes Piroclásticas de Densidad*.

Para medir que tan “grande” es una erupción, es necesario describir el volumen de tefra, la altura de la columna eruptiva, la energía explosiva y la distancia viajada por los balísticos; la escala es abierta y varía de 0, para erupciones no explosivas, hasta 8 para las explosiones más grandes registradas, se implementó el Índice de Explosividad Volcánica, VEI por sus siglas en inglés. Por ejemplo, la erupción del Chichón (1982) tuvo un VEI de 5 y la del Popocatepetl (2001) tuvo un VEI de 3. Tabla 1.1

VEI	0	1	2	3	4	5	6
Descripción	No explosiva	Pequeña	Moderada	Mediana	Grande	Muy grande	
Volumen cenizas	< 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	10 <sup>8</sup> -10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	0.1-1 km <sup>3</sup>	1-10 km <sup>3</sup>
Altura de columna (km)	< 0.1	0.1-1	1-5	3-15	10-25	>25	
Descripción Cualitativa	Efusiva	Ligera	Explosiva		Cataclísmica, paroxismal, colosal...		
Clasificación	Hawaiana	Hawaiana Estromboliana	Estromboliana Vulcaniana	Vulcaniana	Vulcaniana Subpliniana	Pliniana	
Duración (horas)	Muy variable	< 1	< 1-6		6-12	>12	
Inyección a la Tropósfera	Negligible	Menor	Moderada	Sustancial	Abundante		
Inyección a Estratósfera	No	No	No	Posible	Siempre	Significativa	

**TABLA 1.1 Índice de explosividad volcánica (CENAPRED)**

## **1.6 FORMACIÓN DE AEROSOLES**

Las erupciones de gran magnitud son capaces de inyectar en la estratosfera columnas y nubes eruptivas formadas por gases que si son condensables pasan a pequeñas gotículas líquidas de dimensiones inicialmente muy reducidas (0.10 - 1 mm) [1]. Los gases, junto con la ceniza volcánica, de granulometría también muy fina, forman aerosoles que constituyen nubes volcánicas muy diluidas que se extienden por la alta atmósfera siguiendo pautas de circulación global.

Estudios de erupciones más recientes ponen de manifiesto que el período de permanencia en la atmósfera de la ceniza volcánica suele ser reducido, en general menor de un año, pues los procesos de agregación electrostática entre partículas de pequeño tamaño permiten una sedimentación por efectos gravitatorios relativamente rápida. Los efectos de la ceniza volcánica en la atmósfera tienen una influencia climática local, sin embargo, no se puede olvidar la hipótesis de la extinción global causada por impactos de meteoritos (el comienzo de la era terciaria con la extinción de los dinosaurios y otros seres vivos), fue el polvo que se expandió en la atmósfera, que impidió la llegada de las radiaciones solares a la superficie de la tierra, creando unas condiciones incompatibles con la vida de determinados grupos de seres vivos.

## **1.7 VULCANISMO EN MÉXICO**

Los procesos volcánicos están estrechamente relacionados con el movimiento de las placas tectónicas que constituyen la superficie terrestre; dichas placas descansan sobre la astenósfera, parte superior del manto cuyas rocas se comportan como un fluido, lo que genera la formación de corrientes convectivas, como se apreció en el inicio de este capítulo.

El movimiento de las placas tectónicas representa la liberación de energía del interior de la Tierra y se pueden manifestar en vulcanismo que es la salida de roca fundida proveniente del manto interno a través de fracturas. La República Mexicana se localiza en una de las zonas sísmicas más activas del mundo, ya que además de ubicarse en la zona de contacto de las grandes placas Norteamericana y del Pacífico, limita con otras dos placas menores, que son la de Cocos y la del Caribe. Figura 1.2.

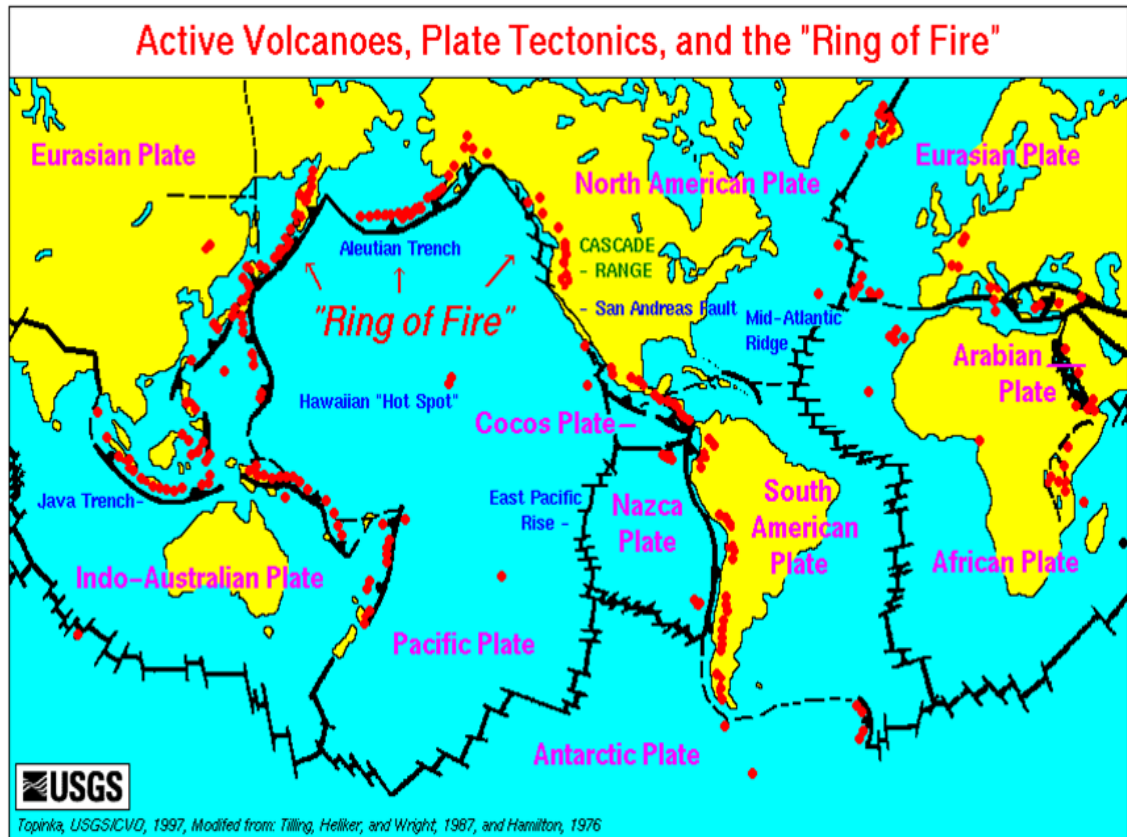


Figura 1.3 Cinturón de Fuego del pacífico, USGS (1987).

La zona de mayor actividad volcánica en la República Mexicana la constituye el Eje Volcánico Mexicano; este sistema recorre todo el centro del país, desde las costas de Nayarit, en el océano Pacífico, hasta las costas de Veracruz, en el Golfo de México, es una franja de orientación E-W, que se extiende poco mas de 1,000 km, con un ancho de 15 - 150 km (Damant, 1984).

Entre los volcanes de este sistema se encuentran algunos que han tenido actividad en los últimos 500 años; por ejemplo, el volcán Ceboruco, el de Fuego de Colima, el Popocatepetl y el Pico de Orizaba; después nacieron otros como el Jorullo en 1769, el Parícutín en 1943 y el Chichonal en 1982 (Damant, 1984). Los fenómenos volcánicos que se presentan en México generan una gran cantidad de zonas de riesgo, que se definen por la presencia o ausencia de asentamientos humanos.

## 1.8 VOLCÁN POPOCATÉPETL

Desde el periodo del pleistoceno (hace un millón de años) se originó la primera etapa del actual volcán Popocatepetl; durante sus numerosas erupciones se ha levantado un enorme aparato volcánico, que la actualidad es la quinta altitud del continente Americano, y el segundo volcán más grande después del Citlaltépetl (Pico de Orizaba). Tiene una localización de 19.02° N, 98.62° O, ubicado entre los estados de México, Morelos y Puebla, éste tiene una altitud de 5,454 msnm, posee un cráter de 300 metros, aproximadamente, de profundidad y 800 metros de longitud; por su geología es un estratovolcán de composición andesítico-dacítico. La Cd. de México se encuentra al NO del volcán, a una distancia de 65 km.; la Cd. de Puebla se encuentra a una distancia de 45 km al NE; a 41 km se encuentra la Cd de Cuautla, en el Estado de Morelos y hacia el este se encuentra, a 280 km la Cd. de Veracruz.

El volcán Popocatepetl, por su situación geográfica y la importancia cultural; la reciente actividad manifestada ha atraído la atención de los habitantes de las faldas del volcán y los habitantes de la ciudad de Puebla, donde la ceniza ha tenido una presencia de alerta e inquietud ante una posible erupción mayor. La ceniza volcánica, ha sido el principio de irritaciones oculares y vías respiratorias de la mayoría de la población.



**Figura 1.4. Vista del volcán Popocatepetl desde Atlixco, Puebla, fuente: propia.**

## **1.9 HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL**

Los registros antiguos del volcán Popocatepetl, que datan de 2999 A.C. las evidencias geológicas muestran erupciones plinianas con emisiones de nubes ardientes, que formaron grandes depósitos piroclásticos en sus alrededores con emanaciones de lava que no recorrieron grandes distancias; como los que se observan en localidades del estado de Puebla como: Tochimizolco, Santiago Xalitzintla, San Pedro Benito Juárez entre otros. En 1008 según evidencia geológica, se emitieron grandes depósitos de pómez a causa de explosiones violentas del volcán. En los años 1519-1530 hubo periodos eruptivos en donde se depositaron fragmentos de pómez y lapilli, se ignora si provocaron daños en los pueblos cercanos al volcán, sin embargo, en el evento de los años de 1539-1540, se registraron intensas caídas de ceniza (Espinasa, 2012), en donde se generaron víctimas y posibles daños en los cultivos. En los años de 1919-1927 se presentó actividad, emisiones de fumarolas y gases menores con actividad sísmica alta; se reportaron pérdidas humanas en el volcán por una explotación de azufre en el interior del cráter. Desde el año 1994 hasta el 2013, se ha incrementado la actividad volcánica del Popocatepetl, observándose proyectiles balísticos que caen aproximadamente a 4 kilómetros del cráter, y que han generado incendios forestales, también se han presentado flujos piroclásticos como el día 22 de Enero de 2001, así como la rotura de domos que se forman por la comulación de lava en el interior del cráter, que al solidificarse, la presión y temperatura aumentan, ocasionando una explosión que genera una nube de ceniza volcánica que tiende a seguir la dirección del viento, el cual no tiene un régimen durante todo el año, durante los meses de Enero a Junio, los vientos se dirigen de Oeste a Este, mientras que los meses de Julio a Diciembre, los vientos se dirigen de Este a Oeste. En Estos eventos han tenido continuidad hasta el día de hoy, sin embargo, algunos se presentan con mayor intensidad que otros, esto eventos han modificado el edificio volcánico y en especial el cráter del volcán, que si bien se sabe, tiene un labio superior y uno inferior, este último se encuentra en dirección NE, en dirección del estado de Puebla, el cual tiene una mayor vulnerabilidad ante episodios volcánicos mayores.

Se han presentado flujos piroclásticos en el estado de Puebla a distancias aproximadamente de 20 km. del cráter en comunidades como: Tochimilco, Santiago Xalitzintla, San Nicolás de los Ranchos y San Pedro Benito Juárez; así mismo, se hallan depósitos piroclásticos en el Estado de México en las comunidades de: Nexapa, Amecameca, San Rafael y



Ecatzingo. En lado Oeste del volcán, en el Estado de Morelos, se presentan estos depósitos en las cercanías de Tétela del Volcán.

## **1.10 MEDIDAS PREVENTIVAS**

Desde que el volcán Popocatepetl reinicio su actividad en el año de 1994, la comunidad científica del país ha tenido gran interés en él; tanto por el riesgo que representa a ciudades tan importantes, como la intensa actividad que ha sobrellevado el volcán durante estos 19 años hasta el día de hoy. Es por ello que el Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED) ha instalado una serie de medidores que involucran una serie de mediciones y observaciones que incluyen: deformaciones del edificio volcánico, sismos, emanaciones de gases, composición química de los materiales y afloramientos de agua, cambios de campos eléctricos, magnéticos, gravedad y temperatura, así como observaciones visuales y percepción remota. Todo esto nos permite tomar medidas preventivas de seguridad, y en su caso, poner en marcha los planes de emergencia de protección Civil ya establecidos por autoridades de cada estado en riesgo.

### **1.10.1 MONITOREO SÍSMICO**

La sismicidad, en general, es el principal sistema de alertamiento previo a una erupción volcánica, este fenómeno es provocado por el movimiento del magma y gases que salen a la superficie, y se presentan sismos de mayor magnitud cuando se desarrollan colapsos dentro del volcán. La red de sismógrafos del CENAPRED está constituida por 4 sismógrafos distribuidos en las laderas del volcán, a distancias no mayores de 10 km del cráter; la mayor sismicidad se presenta en la comunidad de San Pedro Benito Juárez, comunidad del municipio de Atlixco, Puebla

### **1.10.2 MONITOREO GEODÉSICO**

Es la medición de las deformaciones del edificio volcánico provocadas por el cambio de presión por la acumulación de gases. Las deformaciones pueden ser de varios tipos, elevación del nivel del suelo, subsidencia, inclinaciones o abultamientos visibles.

### **1.10.3 MONITOREO VISUAL**

Es la observación del volcán mediante cámaras de video, fotografías aéreas, radar meteorológico o

imágenes de satélite; actualmente se cuenta con 4 cámaras que se encuentran distribuidas en Alzomoni y Tlamacas, Estado de México; mientras que Tianguismalco y Tochimilco en el Estado de Puebla, las cuales transmiten la imagen en tiempo real a través de la página oficial del CENAPRED.



**Figura 1.5. Volcán Popocatépetl, Espinosa R. (2013)**

## CAPÍTULO 2. SANTIAGO XALITZINTLA

### 2.1 POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de investigación de la tesina, consiste en la localidad de Santiago Xalitzintla, que pertenece al municipio de San Nicolás de los Ranchos, Estado de Puebla. La comunidad de Santiago se ubica a 2,802 msnm cuyas coordenadas geográficas son: 19°03'35.33''N y 98°31'51.95''O. Santiago Xalitzintla se encuentra limitado a: 2 kilómetros aproximadamente hacia el norte por la población de San Mateo Ozolco, Puebla; al Sur por el poblado de San Pedro Benito Juárez a una distancia de 15.2 kilómetros; así mismo, al Este se ubica el poblado de San Nicolás de los Ranchos a una distancia de 3 kilómetros; mientras que la ciudad de Puebla se localiza a una distancia de 33 kilómetros. La población aloja a 2,569 habitantes en su totalidad que representan el 20.38 % de la población total del municipio. Su principal fuente de alimentación es la agricultura, principalmente maíz, que lo utiliza tanto para consumo propio como para generar ingresos.

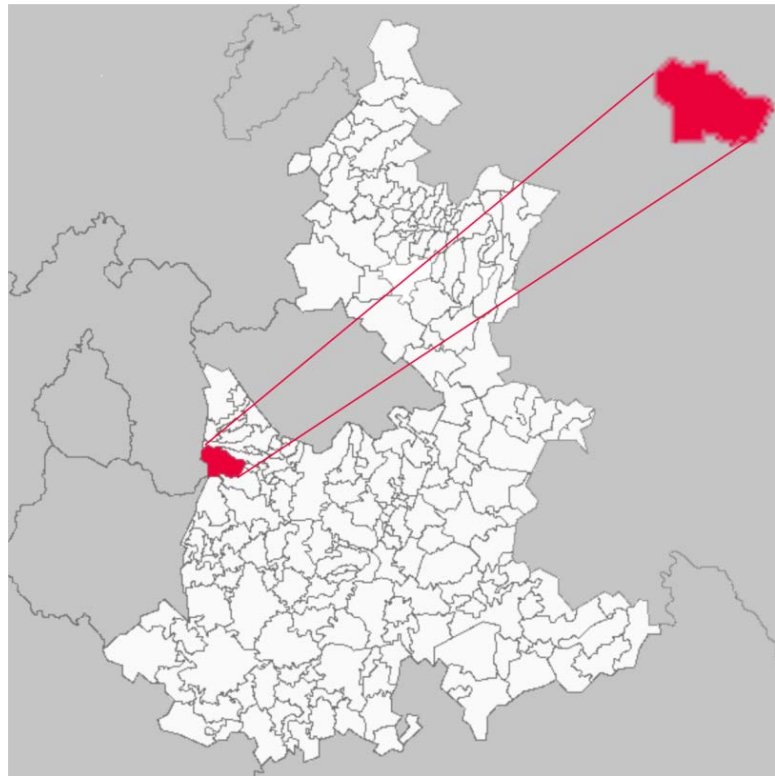


Figura 2.1. Municipio de San Nicolás de los Ranchos, fuente: Propia.

## **2.2 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN**

En Santiago Xalitzintla, por su limitado límite territorial, se encuentran depósitos ígneos andesitos-basálticos, sin embargo, en los alrededores se pueden observar derrames basálticos al SO de la comunidad, que provienen del volcán Popocatepetl, hace aproximadamente 300 años atrás; encontramos a un costado de la carretera de San Nicolás de los Ranchos a Santiago Xalitzintla, los flujos piroclásticos del volcán Iztaccíhuatl. La población está asentada en medio de los derrames volcánicos de aproximadamente 10.00 metros de espesor y flujos piroclásticos. Se exhiben depósitos vulcanosedimentarios en la localidad, lo cual permite especular que con anterioridad, esta zona se encontrara un río que provenía de las faldas del volcán, aún queda evidencia de este cuerpo de agua, ya que se localizan dos escurrimientos de agua que cruzan la población.

## **2.3 RIESGO VOLCÁNICO EN LA COMUNIDAD DE SANTIAGO XALITZINTLA**

El riesgo volcánico se define como probabilidad de pérdidas o daños de los bienes expuestos, ante la presencia de un fenómeno volcánico (Espinasa, 2013). La población de Santiago Xalitzintla es vulnerable a este fenómeno, ya que a tan solo 12.71 km se encuentra el cráter del segundo volcán más grande México, el Popocatepetl, las barrancas que desembocan en la población, el tipo de vivienda y el desconocimiento del fenómeno volcánico, condicionan el grado de vulnerabilidad. El riesgo se describe mediante la fórmula:

$$RIESGO = \frac{PELIGRO \times VULNERABILIDAD \times GRADO DE EXPOSICIÓN}{RECURSOS}$$

**Fórmula 2.1. Variables que determinan el grado de riesgo que se encuentra una determinada población.  
(Dirección de Apoyo y Seguridad Universitaria BUAP, Protección Civil BUAP)**



**Figura 2.2 Gráfico del riesgo en Santiago Xalitzintla, fuente: Propia.**

Primeramente debemos de identificar el riesgo, en este caso el volcán Popocatepetl, este factor nos condiciona flujos piroclásticos, lahares, caída de ceniza, flujos de lava, etc. Para poder indagar en posibles escenarios, nos debemos basar en el análisis de riesgo, y así llegar a una estimación del riesgo, los daños que podría ocasionar el fenómeno volcánico a las comunidades más cercanas, en este caso, la comunidad de Santiago Xalitzintla cuenta con riesgo de flujos de lahares y caída de ceniza masiva, Figura 5. ¿Cómo podríamos controlar los efectos del fenómeno volcánico?, la respuesta está con la implantación de la Gestión del Riesgo Volcánico, que son los procesos para minimizar los efectos destructivos del volcán mediante acciones preventivas en la comunidad.

Un peligro importante sobre la comunidad de Santigo Xalitzintla, es la caída de ceniza, y depende de la cantidad, tamaño y composición de la misma; entre las posibles afectaciones por caída de ceniza podríamos mencionar la contaminación de acuíferos, aire y suelos, afectación a las vías y medios de comunicación, y colapso de techos de viviendas, este último es muy importante y el daño más drástico que se puede producir ante una contingencia volcánica, ya

que la comunidad cuenta con más del 50 % de techos de cartón, lámina o tejas, como le veremos más adelante en el capítulo cuatro.

Las cenizas volcánicas pueden tener un recubrimiento ácido que causa irritación en pulmones y ojos (Martínez, 2012). Este recubrimiento ácido desaparece fácilmente con la lluvia, pero ésta puede arrastrarlas contaminando las reservas de agua local. La ceniza ácida también puede dañar la vegetación, haciendo fracasar las cosechas en la región afectada. En la mayoría de las erupciones la lluvia de cenizas produce pocos efectos adversos sobre la salud, pero genera mucha ansiedad. Las personas pueden tener mayor temor a los daños a la salud producidos por las cenizas y gases volcánicos, que al riesgo de morir a causa de mayores amenazas, como los flujos piroclásticos o lahares. Aun así, la caída de cenizas puede afectar grandes áreas en torno al volcán, e interrumpir la vida normal de los habitantes de la comunidad. Los servicios médicos pueden esperar un aumento de la cantidad de pacientes con síntomas respiratorios y oculares durante y después de una lluvia de cenizas volcánicas.

Los efectos de las cenizas volcánicas sobre la salud pueden ser clasificados en varias categorías (Horwell y Baxter, 2003): efectos respiratorios, síntomas oculares, irritación cutánea y efectos indirectos.

- Efectos respiratorios: Durante algunas erupciones las partículas pueden ser tan finas que son aspiradas profundamente hasta el interior los pulmones. Con una exposición prolongada, aun los individuos sanos experimentarán molestias en el pecho, acompañadas de aumento de tos e irritación. Los síntomas agudos (inmediatos) más comunes incluyen:
  - Irritación y secreción nasal.
  - Irritación y dolor de garganta, algunas veces acompañados de tos seca.
  - Personas con problemas pulmonares previos pueden desarrollar síntomas severos de bronquitis que persisten durante algunos días después de la exposición a las cenizas (por ejemplo, tos seca, flema, falta de aire).
  - Irritación en las vías respiratorias en personas con asma o bronquitis; respiración cortada, jadeo y tos son las manifestaciones más frecuentes en los asmáticos.
  - La respiración se hace dificultosa.

En raras circunstancias, la exposición prolongada a cenizas finas puede producir enfermedades pulmonares serias; si éstas ocurren, se debe a que las cenizas son muy finas y contienen sílice (que produce silicosis) y las personas afectadas debieron haber estado expuestas a altas concentraciones de cenizas durante muchos años (Horwell y Baxter, 2003). La exposición a cenizas volcánicas con sílice cristalino generalmente es breve (días o semanas), y los estudios realizados sugieren que el límite de exposición recomendado para la población en general puede ser excedido por períodos de corta duración sin conllevar daños a la salud. Las personas que sufren de asma u otros problemas pulmonares como bronquitis o enfisema, y problemas cardíacos graves, tienen mayor riesgo.

- Síntomas oculares: La irritación en los ojos es un efecto común, ya que una porción de arenilla puede provocar dolorosas erosiones en la parte frontal del ojo (abrasiones en la córnea) y conjuntivitis. Las personas que utilizan lentes de contacto deben ser especialmente conscientes de este problema y no ponerse las lentillas, para prevenir una abrasión en la córnea. Los síntomas más comunes son:
  - Sensación de cuerpo extraño en los ojos.
  - Dolor ocular, escozor e inyección conjuntival.
  - Secreción pegajosa y lagrimeo.
  - Abrasión en la córnea o erosiones.
  - Conjuntivitis aguda o inflamación del saco conjuntival que rodeo el globo ocular.
- Irritación cutánea: Aunque no es muy común, las cenizas volcánicas pueden producir irritación en la piel a algunas personas, especialmente si la ceniza es ácida. Los síntomas incluyen:
  - Irritación y enrojecimiento de la piel.
  - Infecciones secundarias debido al rascado.
- Efectos indirectos de la caída de cenizas: Además de los riesgos para la salud a corto y largo plazo, el impacto indirecto de la caída de cenizas volcánicas debe ser considerado. Éste está vinculado a las consecuencias secundarias de la lluvia de cenizas , como por ejemplo:
  - Efectos sobre las carreteras: La reducción de visibilidad debido a partículas en suspensión puede causar accidentes por sí misma, y este peligro se ve acrecentado por la ceniza que cubre las carreteras. Esto no sólo provoca que se

desdibujen las líneas de señalización vial, sino que las capas finas de cenizas secas o húmedas sean muy resbaladizas, reduciendo la tracción de los vehículos. Los depósitos espesos de cenizas pueden hacer las carreteras intransitables, aislando comunidades del suministro de recursos básicos.

- Efectos en la energía eléctrica: La lluvia de cenizas puede producir cortes de electricidad, lo que puede tener efectos nocivos para la salud debido a la falta de calefacción u otras infraestructuras necesarias que dependen de suministro para su funcionamiento. La ceniza húmeda es conductora de electricidad, de manera que es esencial que se cumplan estrictamente los procedimientos operativos de seguridad al limpiar los equipos de abastecimiento eléctrico.
- Efectos en el abastecimiento de agua: La ceniza puede contaminar el agua, así como producir atascos o daños en el equipo de abastecimiento de agua. Depósitos pequeños y abiertos, como tanques de agua con salida al techo, son especialmente vulnerables a la lluvia de cenizas, e incluso pequeñas cantidades de cenizas pueden reducir la potabilidad del agua. Aunque el riesgo de intoxicación es bajo, el pH puede verse reducido o la clorificación inhibida. Durante y después de la lluvia de cenizas también es muy probable que haya una demanda extra de agua destinada a la limpieza, provocando escasez.
- Efectos en los servicios de saneamiento: La inhabilitación temporal de los servicios municipales de saneamiento, puede incrementar el riesgo de enfermedades en áreas infectadas.
- Riesgo por colapso de techos:
  - Los techos pueden colapsarse debido al peso de la ceniza.
  - Riesgo de que los techos se colapsen durante las tareas de limpieza, debido al aumento de carga por la presencia de una persona en un techo ya de por sí sobrecargado.

## **2.4 PLAN OPERATIVO POPOCATÉPETL**

Santiago Xalitzintla, por su posición geográfica se encuentra en un alto riesgo volcánico; sin embargo, Protección Civil Estado de Puebla, en coordinación con el CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), han implementado el Plan Operativo Popocatépetl (POP), el cual



nos indica las labores preventivas, de auxilio y recuperación ante una contingencia volcánica mayor (fases de la emergencia). Como bien es de conocimiento, un riesgo nunca se va a eliminar; pero si se puede mitigar; esta acción se lleva a cabo con medidas de prevención para obtener un desarrollo sustentable de la población. Entre las acciones preventivas que se plasman en este POP son:

- Capacitación a la comunidad ante el fenómeno volcánico.
- Identificación de sistema de alarma (monitoreo volcánico).
- Identificación de puntos de reunión de la comunidad y rutas de evacuación.
- Equipamiento de albergues temporales.
- Logística de medios de transporte ante una evacuación imprevista.
- Coordinación con las diferentes dependencias de los gobiernos estatal y federal, como:
  - SEDENA (Secretaría de la Defensa Nacional)
  - SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social)
  - SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes)
  - CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres)
  - SINAPROC (Sistema Nacional de Protección Civil)
  - CRUZ ROJA MEXICANA
  - Consejo Estatal de Seguridad Pública
  - H. Cuerpos de Bomberos
  - CONAGUA (Comisión Nacional de Agua)
  - CFE (Comisión Federal de Electricidad)
  - DIF (Desarrollo Integral de la Familia)
  - Secretaría de Infraestructura
  - Secretaría de Educación Pública
  - Secretaría de Administración
  - Secretaría de Salud
  - Secretaría de Seguridad Pública

Cada una de estas dependencias juega un papel importante, ya que todas trabajan en conjunto presupuestando, dando seguridad pública, brindando vehículos, víveres, dando

mantenimiento a las rutas de evacuación, realizando difusión en los medios de comunicación, atención médica etcétera, siempre en coordinación de Protección Civil del Estado de Puebla.

El POP se creó a partir de la gran actividad del volcán hace ya 14 años, en diciembre de 1999, en donde se requirió la evacuación de las comunidades más cercanas al volcán; tomando una asertiva decisión, ya que, días posteriores a la evacuación se registró una gran erupción, cuyos resultados hubieran sido catastróficos si la comunidad se hubiese retornado a las diferentes poblaciones. Figura 2.3, Tabla 2.1 y 2.2. Este Plan contempla cuántas personas se necesitan evacuar en caso de contingencia volcánica, los municipios y localidades se dividen en zona de alto riesgo y zona de riesgo moderado.

## Localidades de Alto Riesgo

<b>Municipio</b>	<b>Localidades</b>	<b>No. de habitantes</b>
Calpan	San. Mateo Ozolco	2.261
Sn. Nicolás de los Ranchos	Santiago Xalixintla	2.569
	Sn. Nicolás de los Ranchos	4.327
	San Pedro Yancuittalpan	2.665
Nealtican	San Buenaventura Nealtican	9.229
San Juan Tianguismanalco	San Pedro Atlixco	1.486
	San Baltazar Atlimeyaya	856
Atlixco	San Pedro Benito Juárez	4.340
	San Juan Ocotepc	695
	Colonia Agrícola Ocotepc	1.691
	Guadalupe Huexocuapan	486
Tochimilco	La Magdalena Yancuittalpan	2.665
	Tochimilco	3.265
	Sta C. Cuilotepec	388
	Sta. C.Tepanapa	651
	Sn. M. Zacatempán	710
	Sn. Miguel Tecuanipa	1.228
	Sta. Cruz Cuauhtomatilla	1.352
<b>T O T A L</b>		<b>40.864</b>

TABLA 2.1. Poblaciones en alto riesgo volcánico. (Plan Operativo Popocatepetl, Protección Civil del estado de Puebla)

# Localidades en Riesgo Moderado

Municipio	Localidades	No. de habitantes
Chiautzingo	San Antonio Tlatenco	3,497
Huejotzingo	San Juan Pancoac	921
	Chahuac	501
	Sta. Ma. Nepoatlco	2,437
	Sta. Ma. Tianguistengo	550
	San Miguel Tianguizolco	1,751
	San Diego Buenavista	586
Atlixco	Metepec	5,068
	San Miguel Ayala	1,628
	San Jerónimo Covula	4,190
Tochimilco	Stgo. Tochimizolco	713
	San Antonio Alpanocan	2,372
	San Francisco Huilango	897
Atzitzihuacán	San Juan Tejupa	2,623
Domingo Arenas	Col. Popocatepetl	172
	Sta. Ma. Atecac	2,768
	Domingo Arenas	4,841
Calpan	San Andrés Calpan	9,031
	San Lucas Atzala	
	San Agustín Los Molinos	234
	Emiliano Zapata Los Molinos	470
	El León	1,094
	Col. Cabrera	1,196
	Mártir de Chinameca	201
	Axocopan	3,408
	Tenextepec	590
	Castillota	325
	San Diego Acapulco	450
Sta. Isabel Cholula	Sta., Isabel Cholula	1,765
	Col. Tlamapa	382
	San Martín Tlamapa	1,730
San Jerónimo Tecuacán	San Jerónimo Tecuánipan	1,957
Tianguismanalco	San Juan Tianguismanalco	4,774
	San Martín Tlapala	1,363
	San Fco. Buenavista	556
Atzitzihuacán	San Miguel Aguacomulcan	1,010
	San Francisco Xochitliapan	903
	San Pedro Ixhuatepec	840
	San Mateo Coatepec	649
	Santiago Atzitzihuacan	879
	San Juan Amecac	3,976
Huaquechula	San Antonio Cuautla	177
Tochimilco	San Lucas Tulcingo	1,251
Cohuecan	San Felipe Cuapexco	618
	San Andrés Ahuatelco	470
	San Francisco Tepango	887
<b>TOTAL</b>		<b>76,701</b>

TABLA 2.2. Poblaciones en moderado riesgo volcánico. (Plan Operativo Popocatepetl, Protección Civil del estado de Puebla).

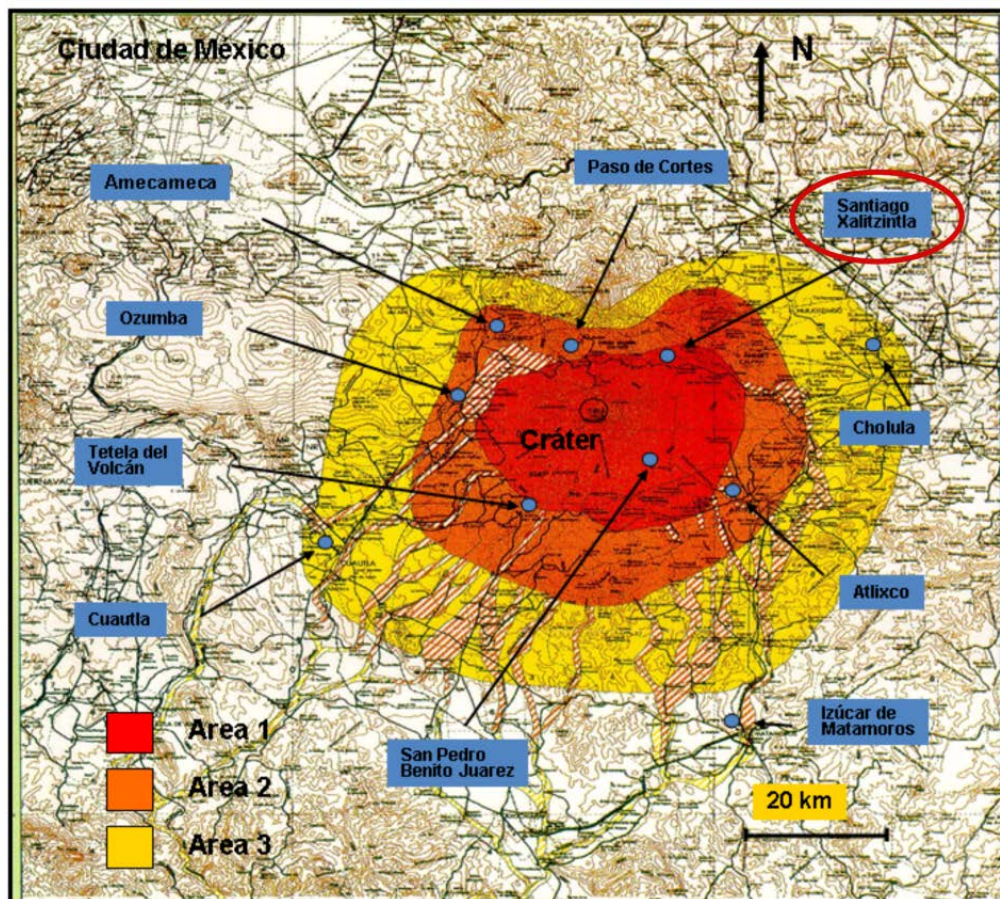


Figura 2.5. Mapa de riesgos del Volcán Popocatepetl (CENAPRED)

Así mismo, cuenta con la capacidad de cada uno de los albergues temporales; los cuales están ubicados en:

- San Martín Texmelucan
- San Pedro Cholula
- Ciudad de Puebla
- Izúcar de Matamoros

De los cuales, solo tres albergan a las comunidades en alto riesgo, los cuales son:

ZONA	NO. DE REFUGIOS	CAPACIDAD
CHOLULA	72	23,277
PUEBLA	3	7,410
I. DE MATAMOROS	81	23,386
<b>TOTALES</b>	<b>156</b>	<b>54,073</b>

**TABLA 2.3. Capacidad de refugios temporales de comunidades de alto riesgo (Plan Operativo Popocatépetl, Protección Civil del Estado de Puebla)**

Se han trazado rutas de evacuación en el Plan Operativo Popocatépetl, en donde se garantiza la ruta más segura hacia al albergue temporal estas rutas de evacuación se consideran en buen estado por la Secretaria de Infraestructura, se cuenta con diez rutas de evacuación por donde circularán los pobladores de las comunidades con alto riesgo volcánico en caso de una evacuación masiva. Nuestra comunidad de estudio, Santiago Xalitzintla, cuenta con la ruta de evacuación número dos, Figura 7, cuyas poblaciones que evacuarían serán, Santiago Xalitzintla, San Nicolás de los Ranchos, San Mateo Ozolco, San Pedro Yancuitalpan y en riesgo medio a San Lucas Atzala y San Andrés Calpan. Estas comunidades se albergaran en la ciudad de San Pedro Cholula.

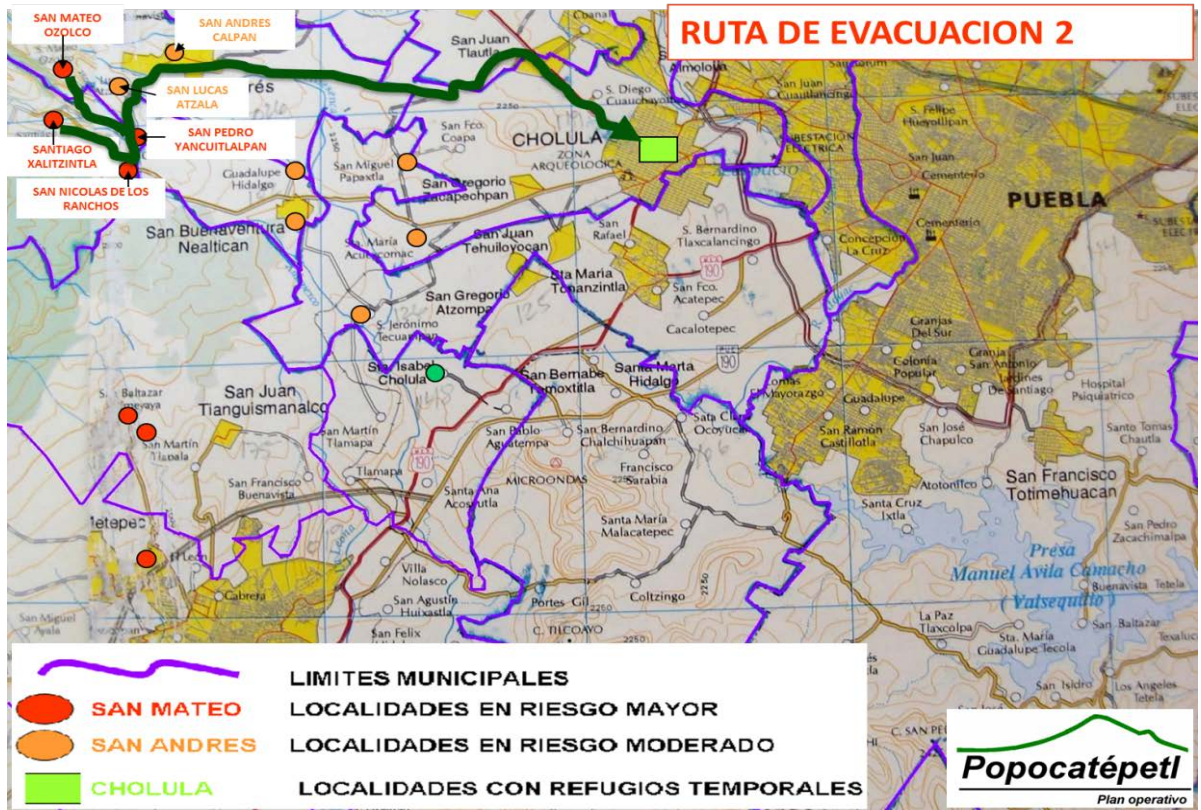


Figura 2.4. Ruta de evacuación de Santiago Xalitzintla. (Plan Operativo Popocatépetl, Protección Civil Estado de Puebla)

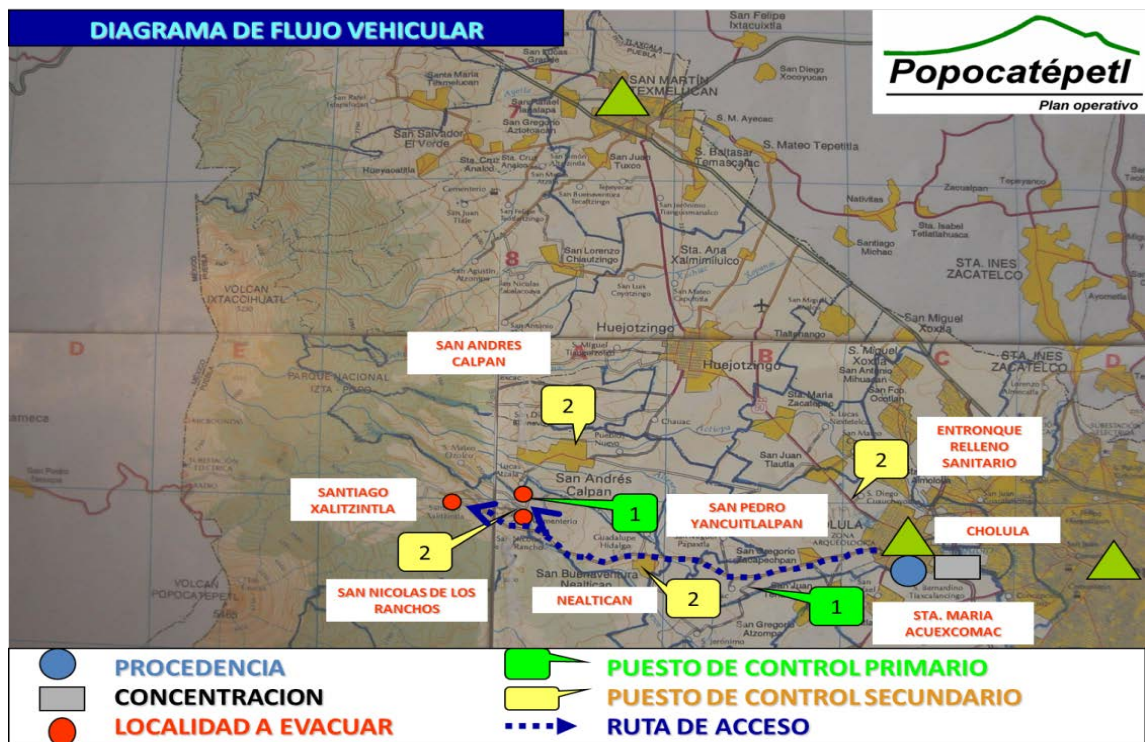


Figura 2.5. Diagrama de flujo vehicular. (Plan Operativo Popocatépetl, Protección Civil del Estado de Puebla)

Se han implementado puestos de mando primarios y secundarios en caso de emergencia, en donde se controla el flujo vehicular, Figura 8, desde el ingreso a las comunidades hasta el punto en donde no se permitirá el acceso a ningún vehículo hacia las localidades en riesgo. En Xalitziñtla se tiene un total de 1,276 personas que pudiesen evacuar por sus propios medios, mientras que 1,293 personas tendrían que recurrir a evacuar con los vehículos previamente enviados a la comunidad por parte de gobernación (Ordaz y Acevo, 2012).

Estas acciones de prevención se encuentran diseñadas para un escenario mayor de contingencia volcánica, cabe señalar, que si la emergencia supera la capacidad del estado (gobierno estatal), entra el Plan DN-III de la milicia Mexicana, quedando en segundo plano el gobierno estatal.

#### 2.4.1 ESTUDIOS REALIZADOS

Si bien es de gran importancia tomar medidas preventivas con el POP, es también importante el ámbito científico, para tomar decisiones ante una contingencia volcánica; los estudios que se han realizado en el Popocatepetl son variados y de diversos intereses, estos se han desarrollado en las cercanías de Santiago Xalitziñtla y son: por riesgo de flujos de lahares y caída de ceniza.

El Volcanic Ash Advisory Center (VAAC) de Washington, mediante imágenes de satélite, realiza observaciones y predicciones acerca de la presencia de cenizas de origen volcánico, que se hacen del conocimiento de los sistemas de aeronavegación internacionales. Figura 9.

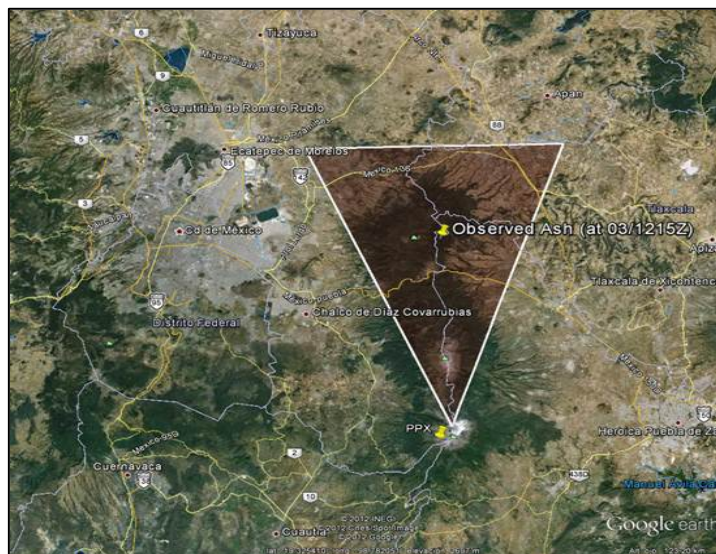


Figura 2.6. Predicciones de la dispersión de la ceniza volcánica mediante observaciones de satélite (VAAC)

Por otra parte, el Centro de Ciencias de la Atmósfera del Instituto de Geofísica de la UNAM, realiza modelaciones de las posibles caídas de ceniza del Popocatépetl, que permiten hacer pronósticos sobre su distribución y posibles espesores, estas simulaciones de pueden hallar en la página de internet del Instituto de ciencias de la Tierra de la UNAM. Figura 10.

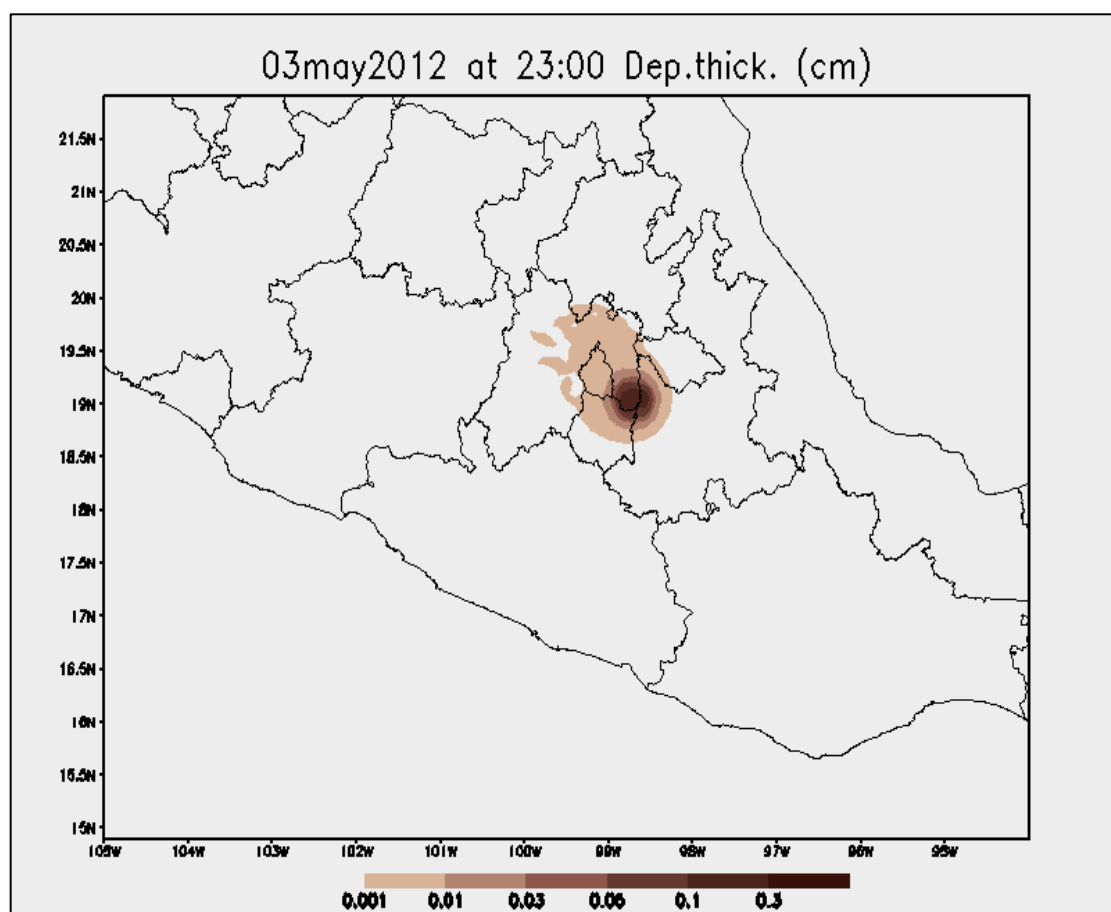
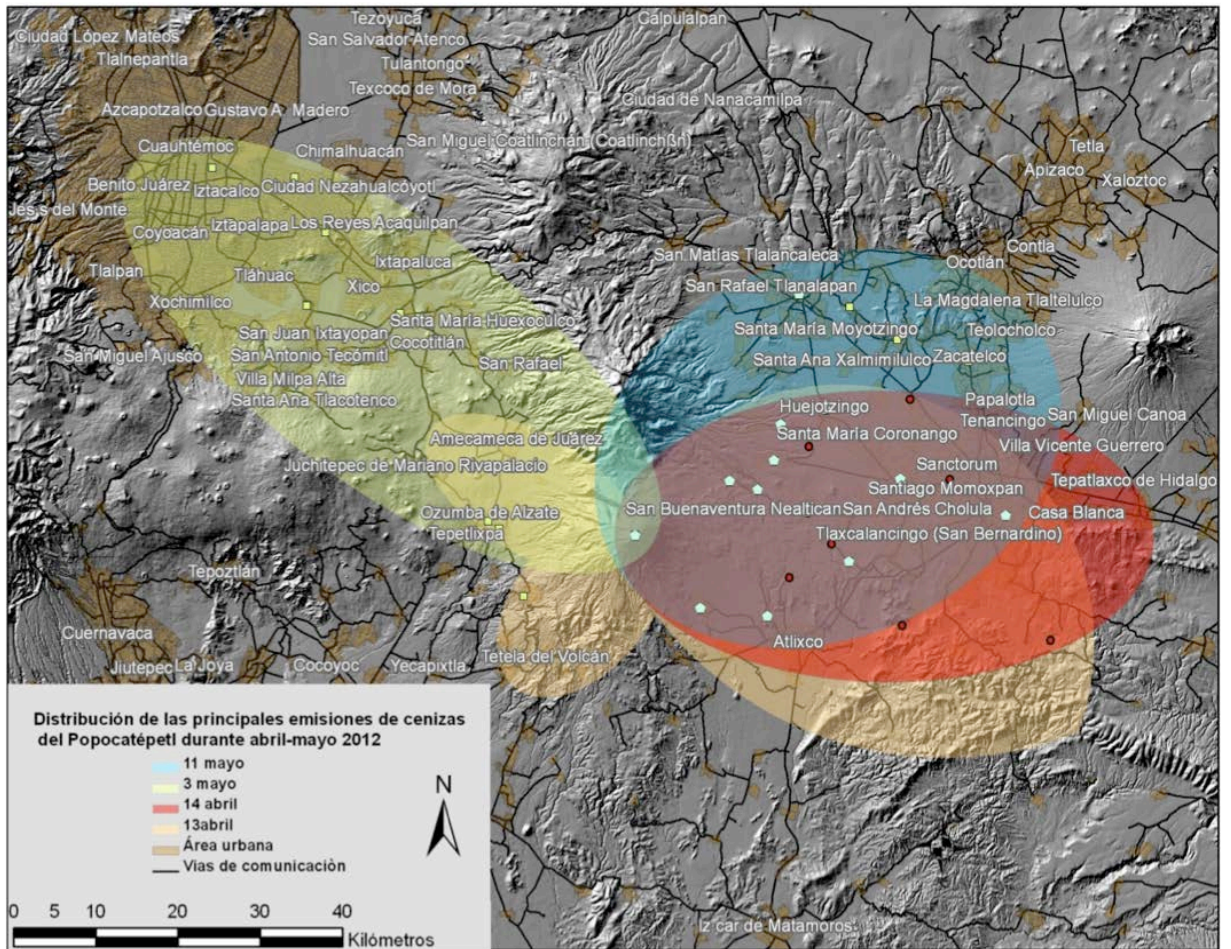


Figura 2.7. Simulación de dispersión de la ceniza del volcán Popocatépetl. (Instituto de Geofísica de la UNAM)

La Universidad Nacional Autónoma de México junto con el Sistema Nacional de Protección Civil ha monitoreado la dispersión de ceniza volcánica del volcán Popocatépetl, generando diversos mapas de dispersión como el siguiente.



**Figura 2.8. Dispersión de ceniza volcán Popocatépetl del año 2012. (UNAM)**

Tal mapa demuestra la dispersión de ceniza durante el invierno, principalmente hacia el Este, a principios del verano hacia el noroeste, mientras que a mediados y fines del verano hacia el suroeste. Este tipo de investigaciones nos permiten tomar medidas preventivas ante explosiones volcánicas; es importante señalar que el trabajo de tesina generará escenarios de riesgo por caída de ceniza, sumando un trabajo más para poder mitigar los efectos volcánicos en la comunidad de Santiago Xalitzintla.



## **CAPÍTULO 3. MODELOS DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA**

### **3.1. CLASIFICACIÓN GENERAL**

Existen en forma general dos modelos de dispersión atmosférica, los modelos físicos (basados en experimentos) y los modelos matemáticos (numéricos y analíticos). Los métodos analíticos tienen como objetivo el cálculo de las emisiones a la atmósfera únicamente. Los métodos numéricos a su vez se dividen en estadísticos y determinísticos; los primeros sirven para análisis de diagnóstico (base de datos) y los determinísticos sirven para la descripción de pronósticos.

En la dispersión de contaminantes participan una gran cantidad de parámetros. Estos determinan el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, así como la dinámica de su movimiento a través de ésta, denominado transporte de contaminantes, que a su vez está condicionado por otros factores.

### 3.2. VARIABLES DE IMPORTANCIA

Las variables que intervienen en la identificación de la dispersión atmosférica son, ver la siguiente tabla:

Estabilidad atmosférica	Es la capacidad que tiene la atmósfera de aumentar o suprimir los movimientos convectivos de aire. Así como un indicador del medio atmosférico, que nos permita identificar si es turbulento, laminado, estratificado, estático o de inversión
Altura de la capa de mezclado	Es la distancia vertical entre la superficie y el estrato en que se realiza el tope o límite de ascensión del contaminante, que es donde permanece la mayor parte de su existencia efectuando reacciones y cambios físicos y químicos en combinación con otros elementos. A veces por las características meteorológicas, así como por la presencia de otros elementos el contaminante no alcanza su límite de ascensión. Debido a que efectúa reacciones y cambios en su recorrido.
Longitud de mezclado	Debido a la dinámica atmosférica la ascensión de los contaminantes no se realiza totalmente en línea vertical, ya que su recorrido hacia su límite de ascensión es por lo general en forma inclinada, esta línea crea una proyección sobre la horizontal la cual es conocida como la longitud de mezclado.
Área de mezclado	Es la proyección sobre la superficie de la zona donde se realiza el mezclado. Es de significativa importancia en lo que se refiere a la lluvia.
Reflexión	Es la característica de los contaminantes de “rebotar” contra la superficie. Puede tomarse como total, nula o parcial.
Advección	Es el transporte debido al movimiento microscópico e un fluido.
Difusión	Es el transporte debido gradientes de diversos índoles.

### Parámetros de influencia en el transporte de contaminantes

Características Meteorológicas de la zona	La meteorología es el parámetro más importante en lo que se refiere al transporte de los contaminantes, sus variables tiene una afección significativa sobre ésta
Características topográficas y Geográficas del lugar	Este parámetro es muy importante en el comportamiento de la dirección que tomen los contaminantes, después de la variable del viento, así como las posibilidades de estar en lugares adversos, como es el caso de la ciudad de México, que está rodeado de montañas que hacen de ella una “olla” ; cuando se presentan inversiones se potencializan los factores de riesgo a la salud
Características del contaminante	Cada elemento tiene una capacidad y tiempo de reacción, así como las propiedades físicas y químicas que hacen de él un elemento único
Velocidad de sedimentación de los contaminantes	Todos los gases y partículas están bajo la influencia de la gravedad y por consiguiente de la caída hacia la superficie de la tierra o de la estratificación del mismo a cierta altura de la atmósfera, esto en función de sus características de expulsión y de sus características físicas
Expulsión	Es la característica con la cual la emisión es afectada, como son la potencia, velocidad, dirección, altura.  Además de estar relacionado con las características físicas de los contaminantes, como son densidad, peso molecular y volumen.  Para fines prácticos, si las PST tiene un diámetro menor a 20 micrómetros se comportan igual que los gases
Gradiente térmico	Es la variación de la temperatura respecto a la altura.
Altura de inversión térmica	El aumento de la temperatura con la altitud de una capa de la atmósfera se llama inversión térmica. Las inversiones térmicas actúan como tapaderas que frenan el movimiento ascendente del aire en la atmósfera. En efecto el aire no puede elevarse en la zona de inversión, puesto que es

	más frío en la zona inferior y por lo tanto más denso.
Radiación	Es la transmisión de energía, generalmente en rayos ultravioleta, infrarrojo, luz visible y ondas de radio, las cuales producen reacciones fotoquímicas que afectan el comportamiento de los contaminantes, además de alterar el gradiente térmico.
Turbulencia	Alteración del flujo del aire debido a cambios de dirección bruscos.
Reacciones termodinámicas, químicas y físicas	Al estar en contacto un elemento con otro(s), durante un tiempo determinado, se van estableciendo reacciones y cadenas de diversos tipos, los cuales dan pie a la formación de nuevos elementos

El objetivo de la Dinámica ambiental es estudiar cómo se esparcen los contaminantes primarios desde sus fuentes, así como los secundarios que se generan en sus reacciones con el medio, ya sea un medio acuático o la atmósfera o la tierra. De estos estudios y mediante diversos modelos matemáticos se puede estimar en tiempo y lugar las concentraciones esperables de los contaminantes procedentes de emisiones continuas o discontinuas o accidentales.

Se han desarrollado gran número de modelos matemáticos con grados de complejidad y “realidad” variables. Sin embargo, tres es el número de modelos, digamos, “base”: los modelos de caja, los modelos Gaussianos y los modelos globales.

### **3.3. MODELOS GAUSSIANOS**

Se aplican tanto al caso de focos puntuales, como de focos lineales y focos superficiales. Se entiende por foco puntual el de un vertido instantáneo de contaminante; por ejemplo: una fuente emitiendo en forma continua los gases vertidos por la chimenea de una central termoeléctrica constituye un foco lineal; las emisiones de los vehículos o las calefacciones de

una ciudad constituirían un foco superficial. Estos modelos se basan en suponer que el esparcimiento de los contaminantes se debe a la difusión.

Dicho proceso de difusión viene definido macroscópicamente por las leyes de Fick, que en una dirección "x" se pueden expresar como:

$$\text{1ra ley : } J_x = -\mu A \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} \quad 3.1$$

$$\text{2da ley : } \frac{\partial \Phi_x}{\partial t} = -\mu A \frac{\partial^2 \Phi_x}{\partial x^2} \quad 3.2$$

dónde: J es la rapidez de difusión en kg/s,  $\mu$  es el coeficiente de difusión en  $\text{m}^2/\text{s}$ , A es el área de sección transversal y  $\partial \Phi$  es la variación de concentración de una sustancia "C".

Las ecuaciones 3.1 y 3.2 definen el cambio con el temporal del perfil de concentraciones de una sustancia "C" en un determinado fluido. Resolviendo la segunda ley de Fick por el método de FOURIER (separación de las variables) y utilizando la fórmula integral de la transformación inversa de J. FOURIER, se obtiene:

$$\Phi = \Phi_0 (4\pi\mu t)^{-1/2} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad 3.3$$

Es una función gaussiana, que puede reescribirse en una forma más simple como:

$$\Phi = \frac{\Phi_0}{(\sigma\sqrt{2\pi})} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad 3.4$$

Donde  $\sigma^2 = 2\mu t$ , una deducción detallada de la función gaussiana puede verse también en el trabajo de Flores Rodríguez.

La longitud  $\sigma$  es la desviación tipo y es una medida de la anchura de la distribución (función), estando directamente relacionada con la distancia cuadrática que al cabo del tiempo “t” se encontraría del origen una molécula “C”, siguiendo un movimiento browniano, es decir,  $\sigma$  está directamente relacionada con la interpretación molecular del carácter fluctuante de la difusión.

Una interpretación de las ecuaciones, 3.2 y 3.4, de difusión unidireccional, esparcimiento de la especie “C”, nos dice que a medida que aumenta el tiempo y la distancia desde el origen, más diluido se encuentra el contaminante. La aplicación de 3.4 de manera tridimensional sirve para describir la dispersión espacial de un foco puntual:

$$\Phi = \frac{m_0}{(\sigma\sqrt{2\pi})^3} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2} - \frac{y^2}{2\sigma^2} - \frac{z^2}{2\sigma^2}}$$

Tras la emisión instantánea de una cantidad  $m_0$  del contaminante “C” en condiciones atmosféricas de total calma, que no son las habituales. Si hay viento, el contaminante se moverá preferentemente en su dirección y habrá, en ese caso, que tener en cuenta su velocidad. Si por ejemplo, el viento se mueve con dirección x en una velocidad  $v_x$ , la ecuación anterior quedará como:

$$\Phi = \frac{m_0}{(\sigma)2\pi)^3} e^{-\frac{(x^2 - vx t)^2}{2\sigma^2} - \frac{y^2}{2\sigma^2} - \frac{z^2}{2\sigma^2}}$$

o, en términos generales, se pueden sustituir en su exponencial correspondiente las contribuciones  $v_x$ ,  $v_y$  y  $v_z$  que definen la velocidad del viento.

Es claro que en cuanto más variedades entren en juego, menor precisión en la predicción y es por ello que estos modelos se apliquen principalmente a los casos de focos puntuales y focos lineales, sobre todo estos últimos a los casos de contaminantes no reactivos en penachos bien definidos; de igual forma, los modelos gaussianos requieren información sobre los coeficientes de dispersión y su variación con la estabilidad atmosférica y distancia al foco emisor, información que suele adquirirse empíricamente.

## CAPÍTULO 4. ESCENARIOS PROPUESTOS

### 4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A lo largo de este trabajo de tesis, se ha descrito el fenómeno volcánico, el origen, características y los riesgos que este conlleva hacia los seres humanos, así mismo, se han descrito las acciones preventivas que se están implementando en México para salvaguardar la integridad de las personas que viven en comunidades cercanas a este fenómeno, específicamente para el volcán Popocatepetl.

### 4.2. CONSIDERACIONES PARA SIMULAR LA PLUMA VOLCÁNICA.

Consideremos una malla o grilla de 80 km en dirección horizontal 30 km en y, puesto que una columna “promedio” del volcán tiene entre 60 – 80 km en el eje horizontal, “x”, y 20 – 30 km en el eje “y”, antes de ser violentamente dispersada, datos CENAPRED, el tiempo lo consideramos de dos horas, también tiempo promedio en que la pluma tarda en sobrepasar la ciudad de Puebla, caso atípico sería el evento de febrero de 2003 donde la ceniza tardó solo 45-50 minutos en estar cayendo sobre la ciudad de Puebla, según el Centro Universitario de prevención de Desastres, CUPREDER.

Consideremos la siguiente tabla:

Clase	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Vel. Ter. ( $\text{cm}/\text{s}$ )
800 – 1200 ( $\mu\text{m}$ )	1180	.798	122.82
400 – 800 ( $\mu\text{m}$ )	600	.999	95.79
200 – 400 ( $\mu\text{m}$ )	350	1.64	68.76
100 – 200 ( $\mu\text{m}$ )	180	1.998	41.73
50 – 100 ( $\mu\text{m}$ )	75	2.001	14.7

**TABLA 4.1. Distribución de tamaño, densidad y velocidad terminal de ceniza, resultados parciales presentados por Amaro et al, en el primer Congreso Nacional de Riesgos, BUAP 2103**

En lo que respecta a los valores de  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  la literatura reporta valores diversos, sin embargo, para escalas por debajo de los 100 km se utilizan valores en los siguientes intervalos 2000 – 5000  $\text{m}^2/\text{s}$  para  $K_x$  y  $K_y$ , mientras que 45  $\text{m}^2/\text{s}$  para  $K_z$ . En este trabajo consideramos 4000  $\text{m}^2/\text{s}$ , ya que fue el valor que mejor se ajustó a la simulación.



Por otro lado, Settle, propone una fórmula para obtener el gasto de emisión:

$$Q(g/s) = \left( \frac{H(km)}{0.117} \right)^{4.54}$$

Una vez que tenemos prácticamente los valores requeridos, nos falta el valor de  $A$  en la ecuación 3.2., para este caso la literatura propone valores entre 1.5 y 4.2, en este caso tomamos 1.5. y la velocidad del viento a la altura del cráter está entre 4 y 6 m/s en dirección noreste.

Los resultados son modelados y superpuestos a una imagen de satélite del día 7 de Mayo de 2013, en donde se aprecia la columna de ceniza emanada del Popocatepetl con dirección hacia Puebla capital, en donde los colores representan los diferentes espesores de depósito de ceniza en  $kg/m^3$ , lo cual resulta inaccesible si solo tuviéramos la imagen de satélite, por supuesto que en este caso no consideramos la parte de reacciones químicas.

Con ayuda del programa DISPER 3.0, se han generado escenarios diversos por caída de ceniza, es decir, cuanta ceniza volcánica caería en la localidad de Santiago Xalitzintla en caso de una erupción mayor. Como bien se sabe, una erupción volcánica nunca es constante, dado que los parámetros que dependen en la erupción son la presión y temperatura que se genera en la cámara magmática o con la formación de un domo en el cráter. Un volcán al incrementar su actividad tiene tres maneras de comportarse: la primera es que siga incrementando su actividad y se genere una erupción mayor, como la sucedida en el 2000 a 2001 en el volcán Popocatepetl, la segunda es que se mantenga por periodos largos de tiempo, en donde se presenten caída de ceniza, fumarolas, tremores (armónicos y espasmódicos), micro sismos, etcétera, y una tercera es que disminuya su actividad hasta volver a incrementarla una vez más como en 2012.

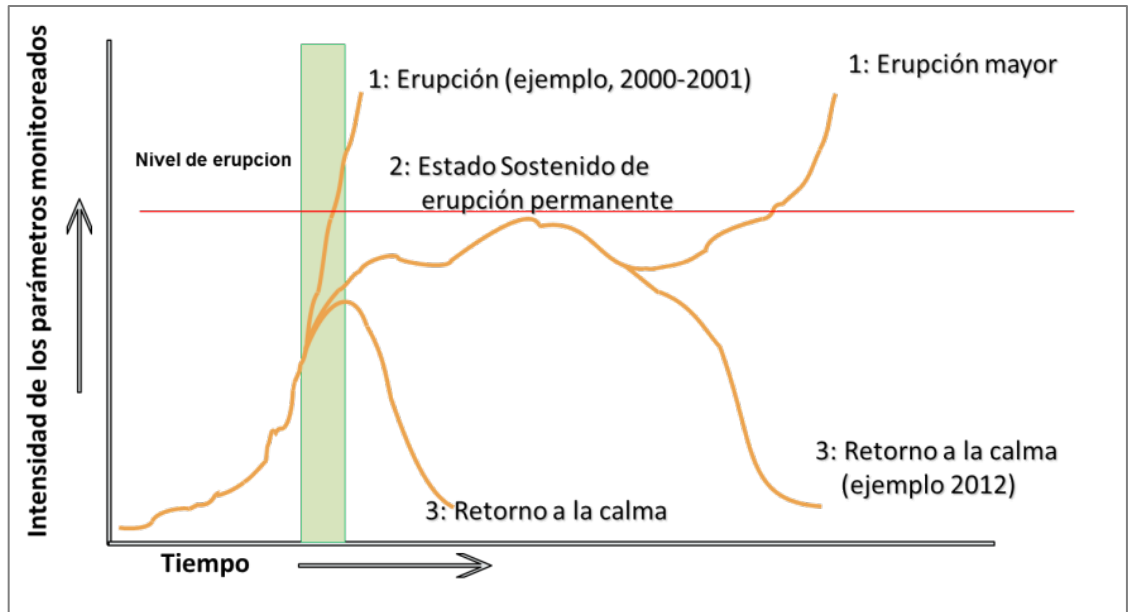


Figura 4.1. Posibles escenarios de un volcán al incrementar su actividad. (CENAPRED, 2013)



Figura 4.2. Santiago Xalitzintla, fuente: Propia.

Es por ello que para la generación de los escenarios por caída de ceniza se consideran los valores tanto atmosféricos como los de la fuente emisora, es este caso el volcán, al variar cada uno de estos valores se genera un nuevo escenario, algunos más se mantienen constantes por las mismas características físicas del edificio volcánico ver tabla 5.

<b>OPTIMIZACIÓN DE CAIDA DE CENIZA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL</b>										
	<b>VIENTO</b>				<b>FUENTE</b>					
<b>PRUEBAS</b>	<b>Parámetro de Estabilidad de Pasquill</b>	<b>Velocidad del Viento (m/s)</b>	<b>Dirección del Viento</b>	<b>Temperatura del Viento (K)</b>	<b>Altura de la Chimenea desde el Nivel del Suelo</b>	<b>Velocidad de Salida del Contaminante</b>	<b>Temperatura del Gas en el Punto de Salida (K)</b>	<b>Diámetro del Orificio de Salida del Gas (m)</b>	<b>Flujo de Salida del Contaminante</b>	<b>Concentración Máxima en la Población (ug/m3)</b>
Prueba 1	3	8	55	330	3600	10	600	800	180000	<b>5754.4637</b>
Prueba 2	3	20	55	330	3600	25	600	800	180000	<b>3841.4239</b>
Prueba 3	3	3	55	330	3600	5	600	800	180000	<b>7516.05</b>
Prueba 4	3	8	55	450	3600	10	600	800	180000	<b>6931.3695</b>
Prueba 5	3	3	55	450	3600	5	600	800	180000	<b>9097.7863</b>
Prueba 6	3	3	55	330	3600	5	800	800	180000	<b>6868.2386</b>
Prueba 7	3	20	55	330	3600	25	800	800	180000	<b>3569.0511</b>
Prueba 8	1	3	55	330	3600	5	600	800	180000	<b>2542.7114</b>
Prueba 9	6	20	55	330	3600	25	600	800	180000	<b>991.8879</b>
Prueba 10	1	20	55	330	3600	5	600	800	180000	<b>1234.4082</b>
Prueba 11	6	3	55	330	3600	5	600	800	180000	<b>8142.6795</b>
Prueba 12	3	8	55	330	3600	10	800	800	180000	<b>5302.8631</b>
Prueba 13	3	8	55	330	3600	10	600	800	220000	<b>7026.2366</b>
Prueba 14	3	3	55	330	3600	5	600	800	220000	<b>9276.7814</b>
Prueba 15	3	8	55	330	3600	10	800	800	220000	<b>6570.2308</b>
Prueba 16	3	3	55	330	3600	5	800	800	220000	<b>8484.6714</b>
Prueba 17	1	8	55	330	3600	10	600	800	220000	<b>2475.7821</b>
Prueba 18	6	3	55	330	3600	5	600	800	220000	<b>10507.2577</b>
Prueba 19	1	8	55	330	3600	10	800	800	220000	<b>2403.5084</b>
Prueba 20	6	3	55	330	3600	5	800	800	220000	<b>10201.1754</b>
Prueba 21	5	8	55	290	3600	15	600	800	10000	<b>539.1899</b>
Prueba 22	5	8	55	290	3600	15	600	800	100000	<b>3614.7544</b>
Prueba 23	3	5	55	330	3600	20	500	800	100000	<b>2963.9745</b>
Prueba 24	3	10	55	330	3600	20	500	800	100000	<b>2848.3347</b>
Prueba 25	4	8	55	330	3600	20	500	800	200000	<b>5696.6693</b>
Prueba 26	4	8	55	330	3600	15	600	800	200000	<b>5915.2162</b>
Prueba 27	1	8	55	330	3600	15	600	800	200000	<b>2345.9642</b>
Prueba 28	6	8	55	330	3600	15	600	800	200000	<b>3747.9431</b>
Prueba 29	3	3	55	330	3600	8	600	800	200000	<b>7314.6988</b>
Prueba 30	3	20	55	330	3600	35	600	800	200000	<b>4056.7897</b>

Tabla 4.2. Pruebas de escenarios por caída de ceniza volcánica del Popocatepetl.

Uno de los parámetros que varía, es el de Pasquill, que nos indica la dispersión de la ceniza con turbulencia y sin ella en el medio atmosférico, la cual varía de 1 hasta 6, siendo el número 6 el valor que implica condiciones atmosféricas moderadamente estable, en contraste el número 1 la cual nos indica que la atmosfera se encuentra extremadamente inestable ver tabla 6. Otro parámetro que varían, son la velocidad y temperatura del viento puesto que dependen de las condiciones climatológicas que se presentes en el momento de la erupción, asimismo la velocidad con la que emerge la ceniza del cráter, ya que puede ser mayor o menor dependiendo de la energía liberada en la explosión.

<b>Categoría</b>	<b>Estabilidad</b>
A	Extremadamente inestable
B	Moderadamente inestable
C	Ligeramente inestable
D	Neutra
E	Ligeramente estable
F	Moderadamente estable

**Tabla 4.3. Categorías de estabilidad atmosférica definidas por Pasquill (1962).**

Un valor importante en la generación de estos escenarios, es el flujo de salida del contaminante (ceniza), como se ha venido manejando, las erupciones volcánicas varían dependiendo de la energía liberada producida por la presión y temperatura, así que los valores asignados a este caso, corresponden para una erupción estromboliana o vulcaniana según la tabla 1. Con un índice de explosividad volcánica (VEI) de 2 a 3, similares a las erupciones del volcán Popocatepetl en 2000 y 2001. Entre los valores que se mantienen constantes son tanto la altura de la chimenea, diámetro del cráter volcánico y dirección del viento, este último será importante en la determinación de la concentración de la caída de la ceniza en la población, ya que el viento no tiende a una sola dirección, sin embargo para fijar una mayor concentración se requiere que el viento fluya en dirección de 55 grados tomando referencia el norte geográfico

Se realizaron treinta pruebas, variando los parámetros mencionados, las cuales nos arrojaron posibles escenarios de caída de ceniza en la localidad de Santiago Xalitzintla. En la tabla 5, se muestran los resultados de la concentración máxima de la ceniza volcánica, se

pueden comparar los resultados de la misma indagando que parámetros influyen para que la población sea vulnerable por caída de ceniza volcánica.

Entre los parámetros que depende la acumulación máxima de ceniza, es la temperatura del viento en grados kelvin, la cual se exhibe en la prueba 4 y prueba 5, en donde se aumentó la temperatura del viento, ya la prueba 5 tiene un valor de  $9097.7863 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a comparación de la prueba 4 que tiene un valor de  $6931.3695 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sin embargo, este fenómeno se determina por el factor de la velocidad del viento de la prueba 5. Si consideramos la prueba 3 y prueba 5, en donde cuentan con la misma velocidad del mismo, pero con menor temperatura de viento, quedando demostrado que al aumentar temperatura del viento aumenta la concentración de ceniza en la población.

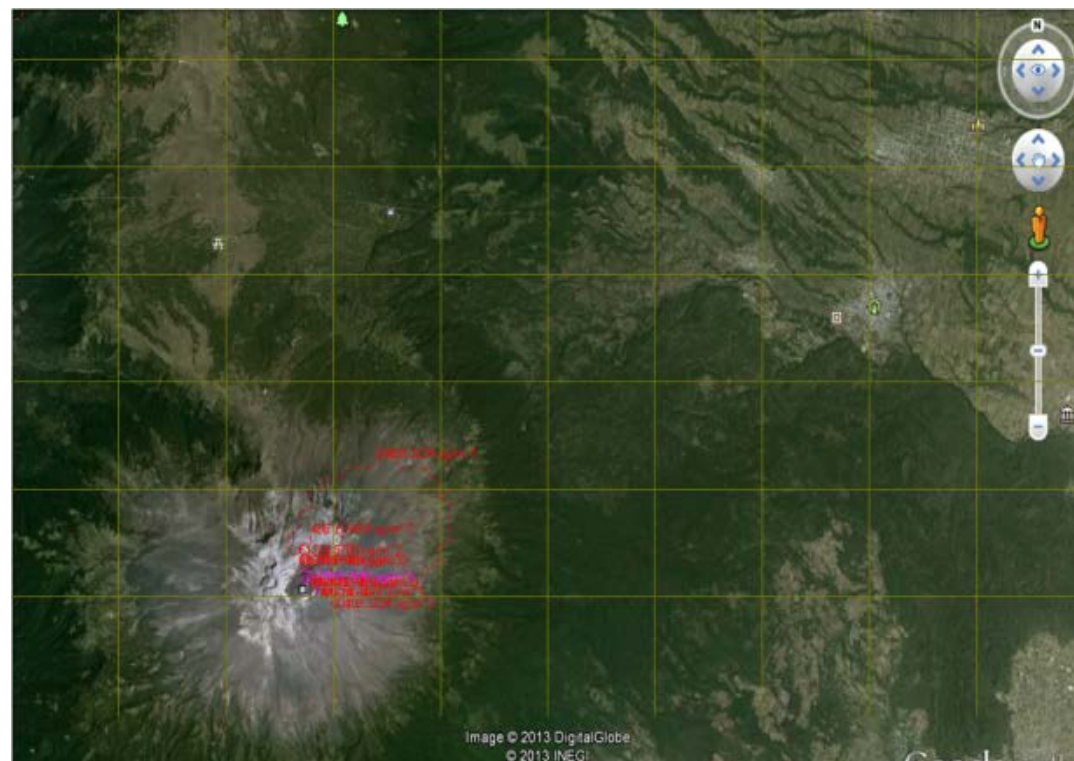
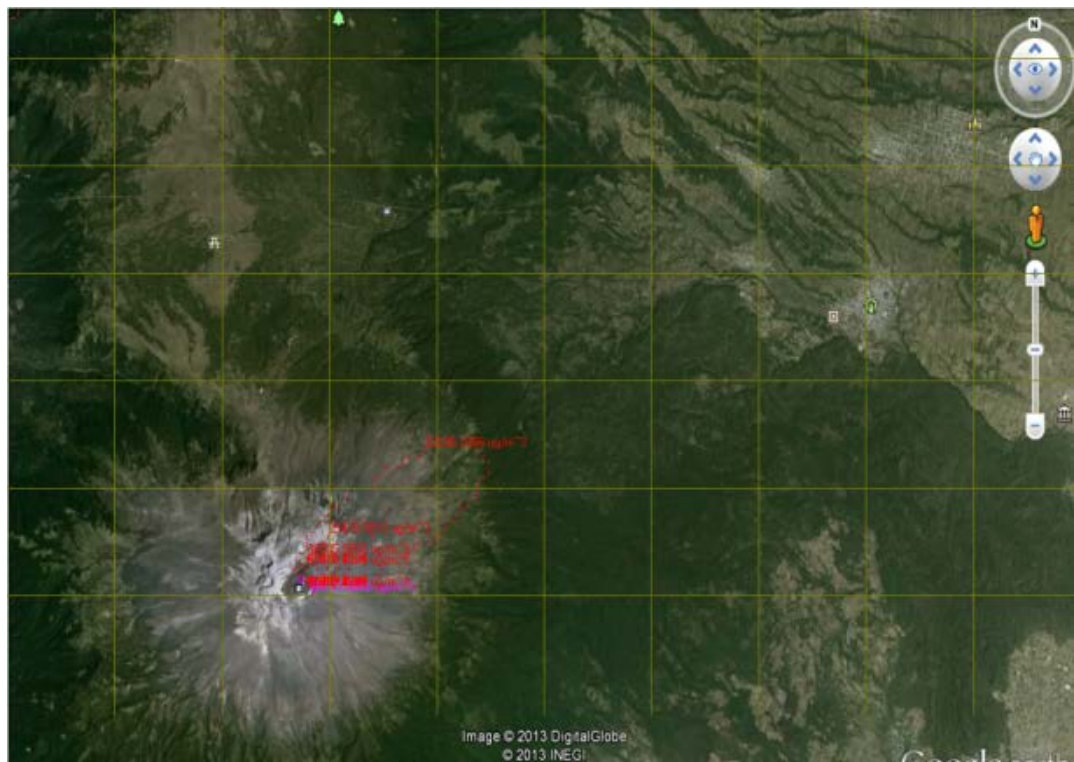


Figura 4.3. Prueba 4 y prueba 5, comparación de la temperatura del viento.

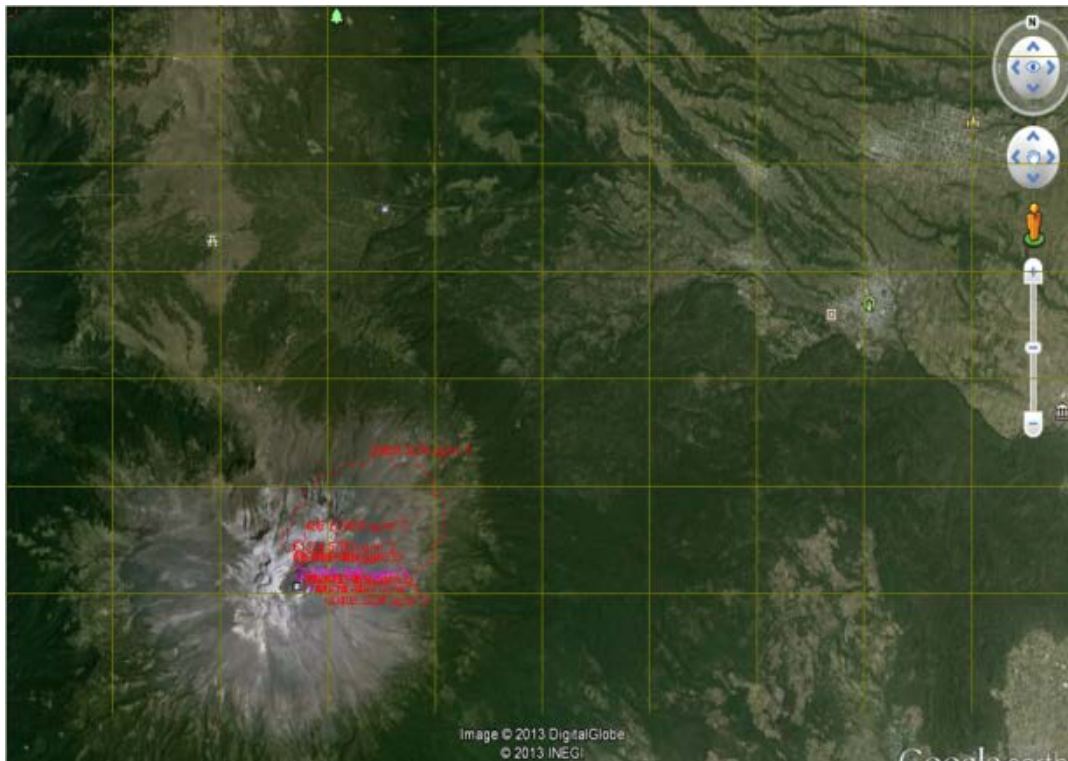
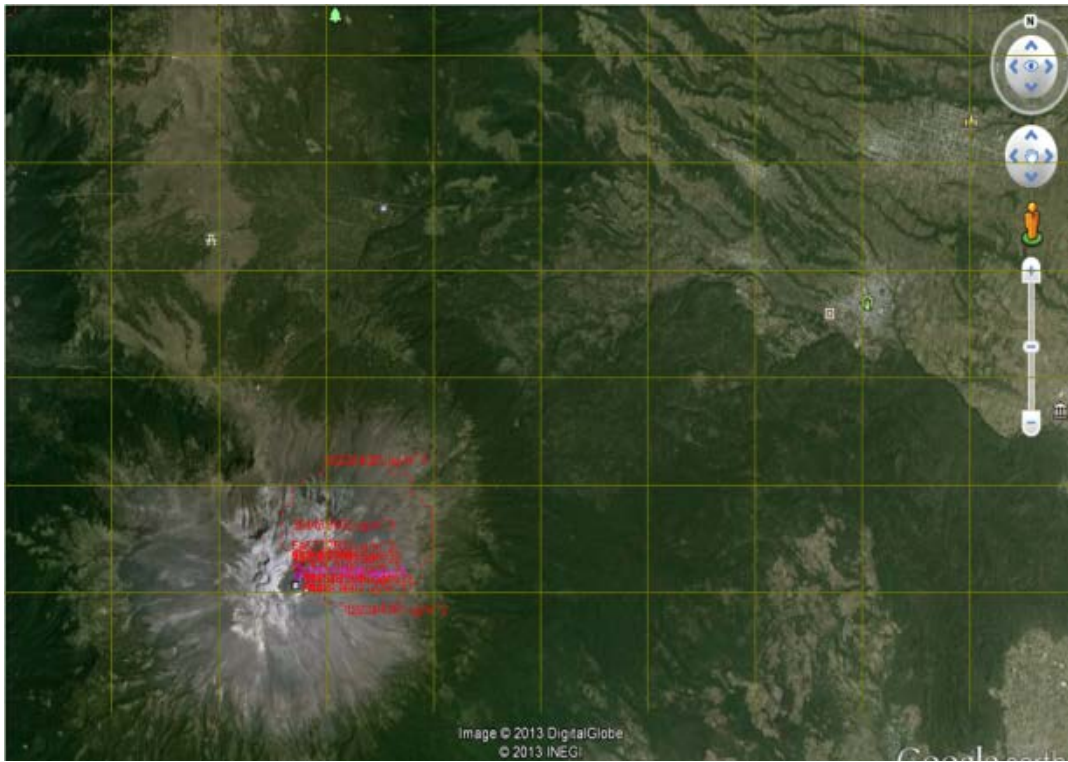
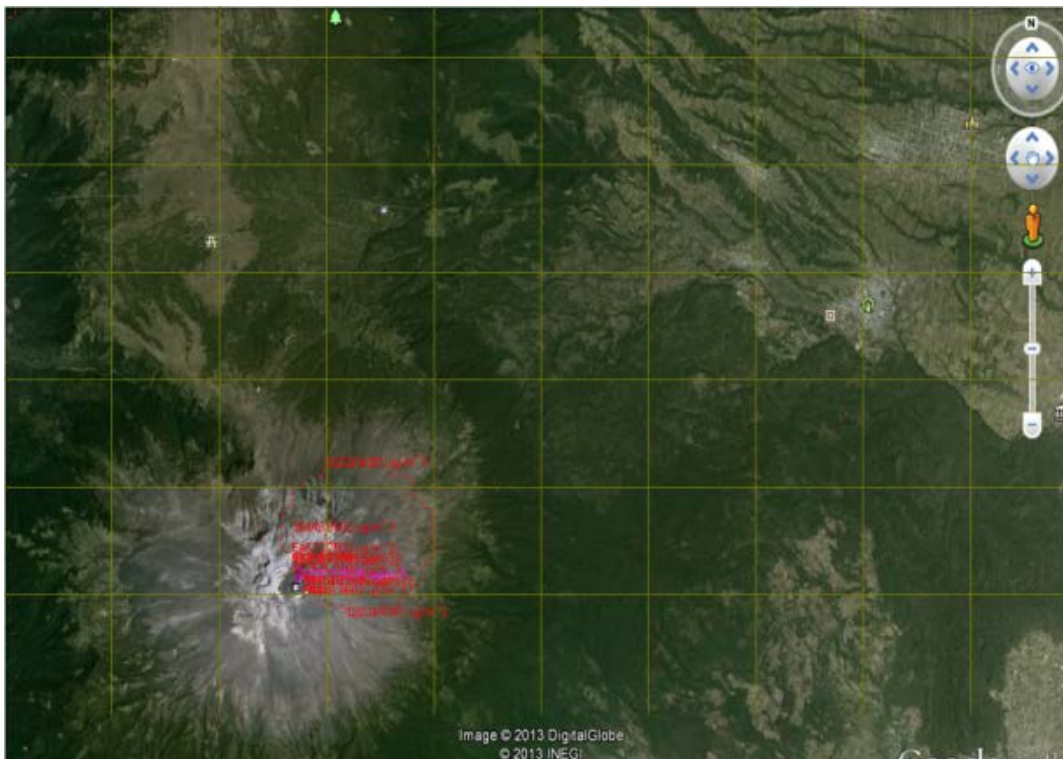
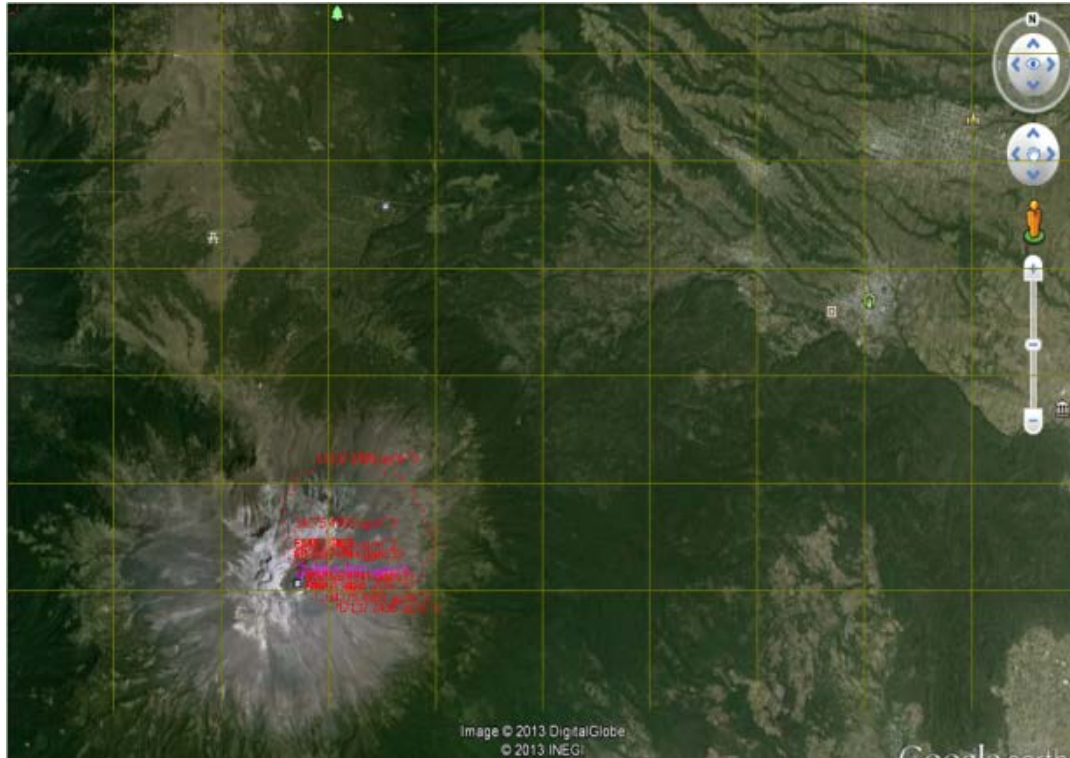


Figura 4.4. Prueba 3 y prueba 5 respectivamente. Comparación de la temperatura del viento.

Como se ha mencionado con anterioridad, la temperatura del gas emitido durante la erupción de cierta manera influye en la acumulación de ceniza volcánica, se realizó la comparación con la prueba 3 y 6 correspondiente a la tabla 5, en donde se incrementa este parámetro 200 grados kelvin más que en la prueba 3. El resultado de esta variación, es que se observa que la concentración máxima entre estas dos pruebas corresponde aquella que tiene menor temperatura del gas emitido.







**Figura 4.5. Comparación de la temperatura en la prueba 3 y prueba 6 respectivamente.**

Sin lugar a duda la concentración máxima de ceniza volcánica depende fundamentalmente de la cantidad de material volcánico que emana el cráter. Es por ello que en las pruebas 12 y 13 se incrementa este valor, reflejándose significativamente en la concentración máxima de ceniza. Un factor sin duda fundamental para el estudio, que se puede obtener con el Índice de Explosividad Volcánica, ver tabla 1.

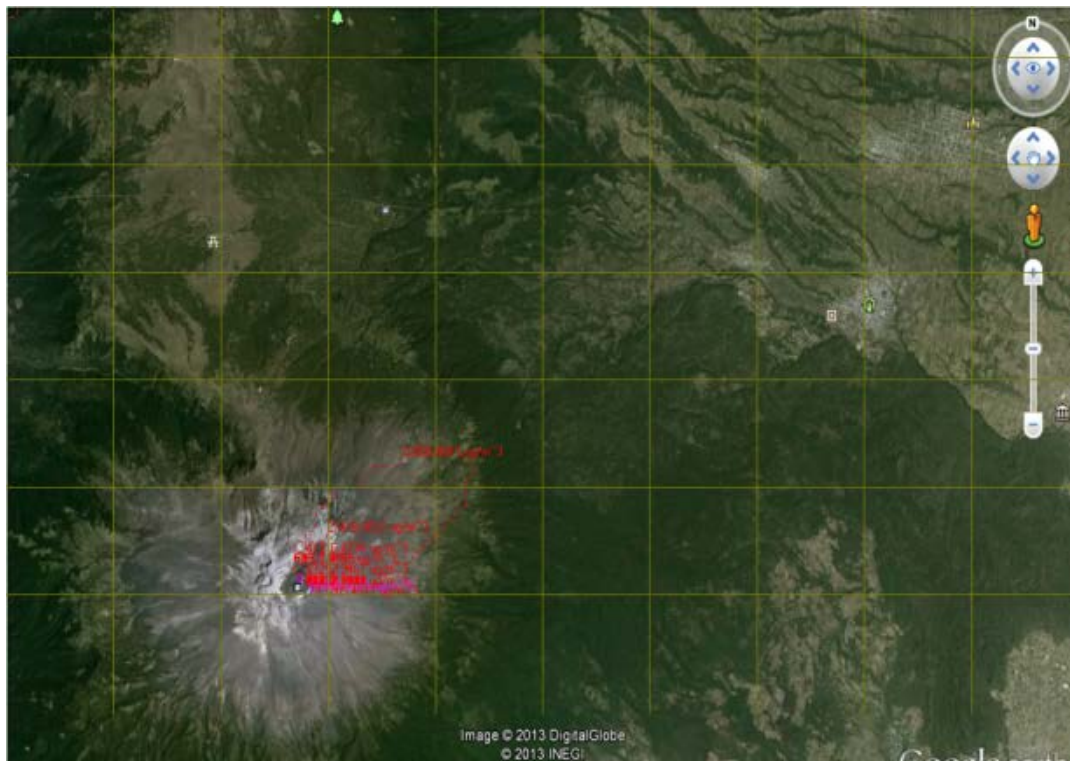
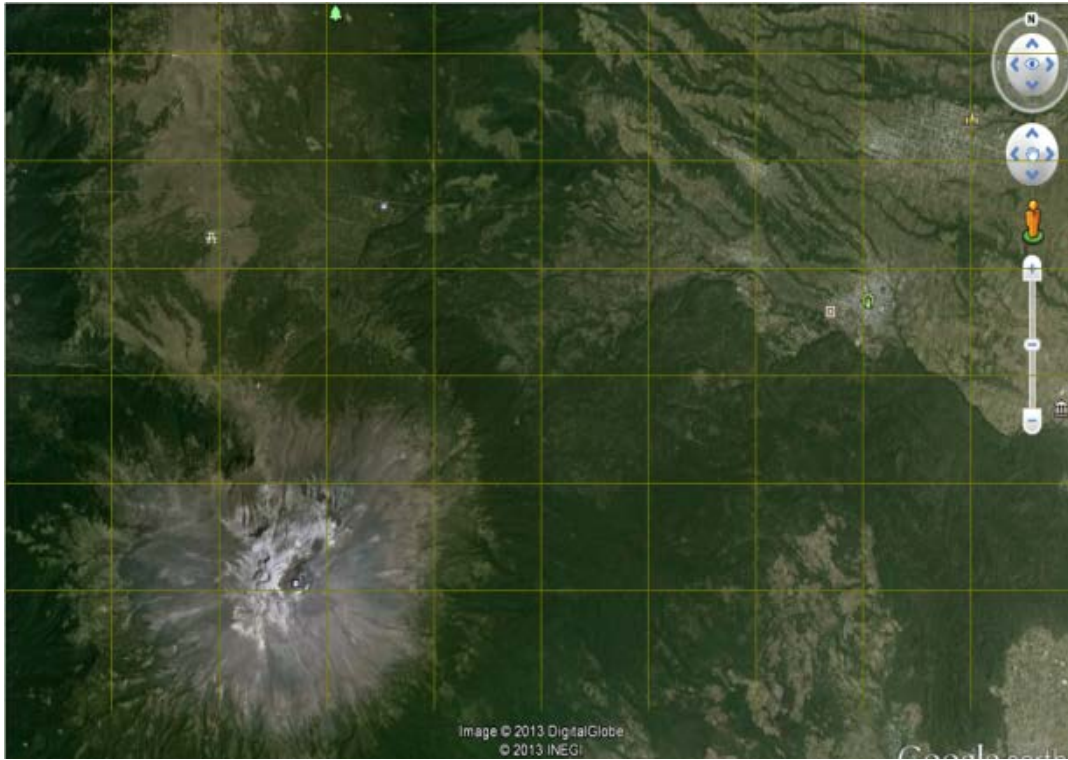


Figura 4.6. Aumento del flujo de salida. Pruebas 12 y 13 respectivamente.

Considerando las estaciones del año, se crearon escenarios en donde se tiene mayor inestabilidad atmosférica, así como también moderadamente establece con el factor de Pasquill; como se observa en las pruebas 8, 9, 10 y 11, para un flujo de salida de  $18,000 \mu\text{g}/\text{m}^2$ , se muestra en la prueba 11 mayor concentración de ceniza de  $8,142.6795 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , cuando el parámetro de Pasquill es máximo, es decir, moderadamente estable pero con vientos lentos de  $3 \text{ m/s}$ , a comparación con la prueba 9, en donde es el mismo parámetro de Pasquill pero con velocidad de viento mayor, de  $20 \text{ m/s}$  se observa una disminución significativa en la concentración de ceniza de  $991.8879 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lo que determina estas diferencias es la velocidad del viento, la concentración de ceniza será mayor si tenemos vientos lentos a comparación si tenemos ráfagas de vientos, las cuales se pueden presentar en verano. Asimismo se muestra en las pruebas 17, 18,19 y 20, con un flujo de salida de  $22,000 \mu\text{g}/\text{m}^2$ , las cuales han dado el mismo resultado si el parámetro de Pasquill se halla en su máxima expresión y con vientos lentos de  $3 \text{ m/s}$ ; en las pruebas 18 y 20 cuyos valores de concentración máxima son de  $10,507.2577 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $10,201.1754 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.

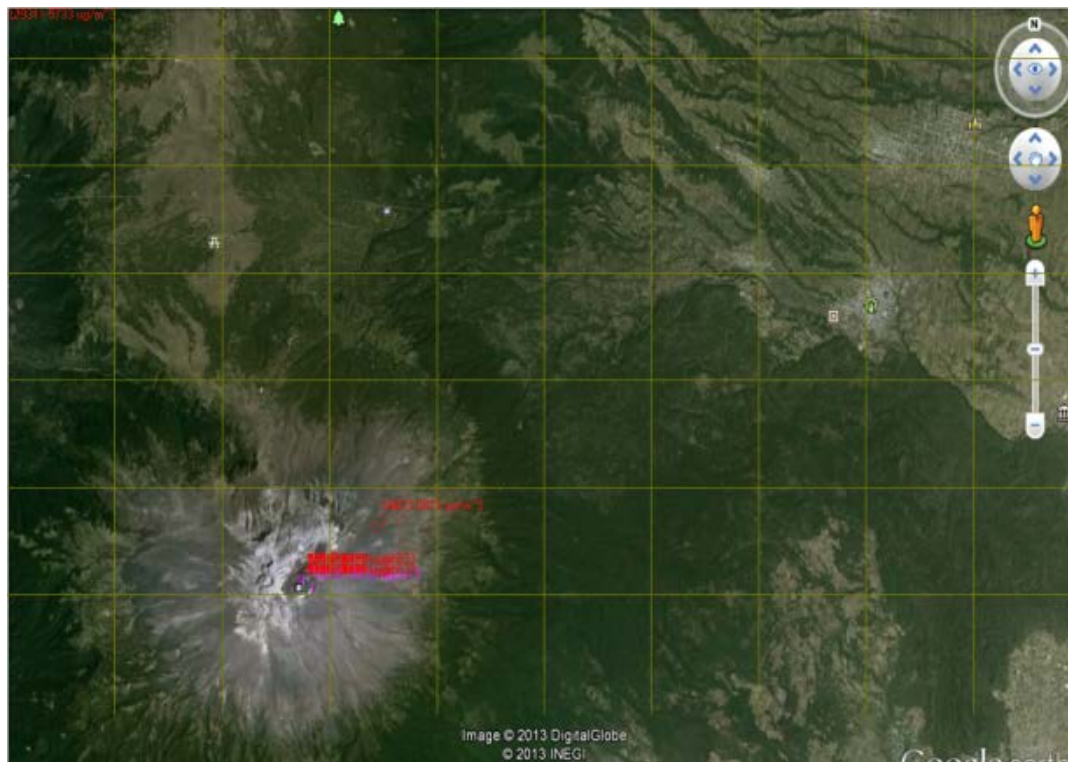
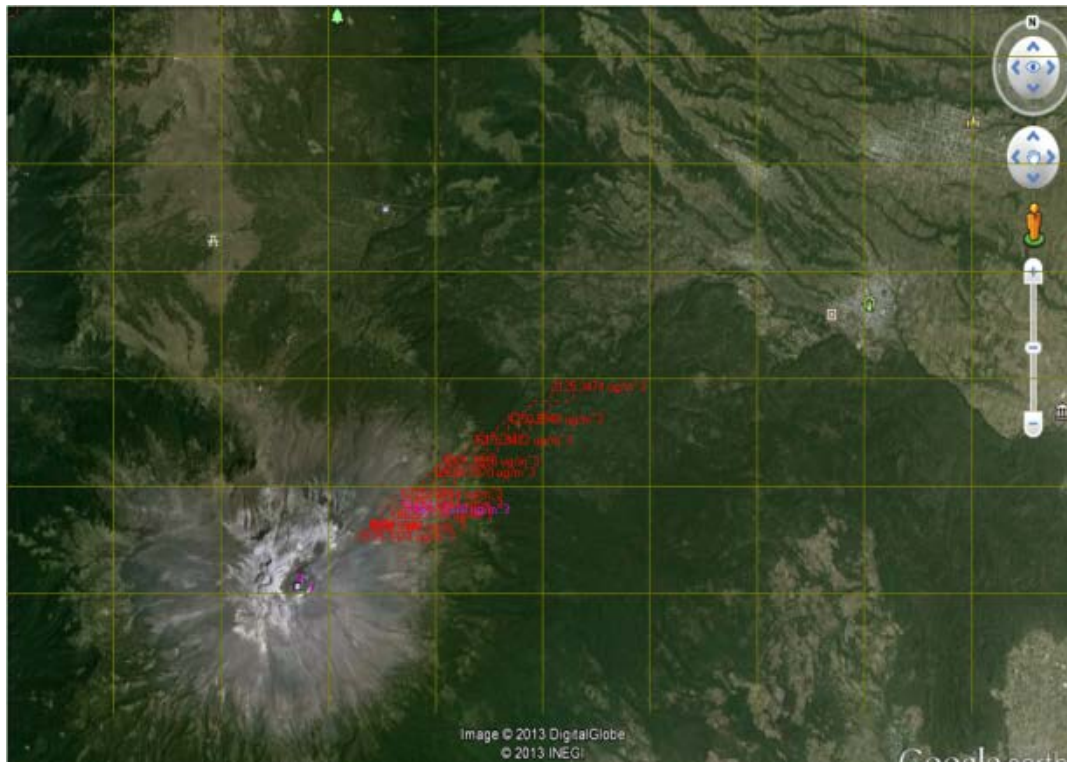
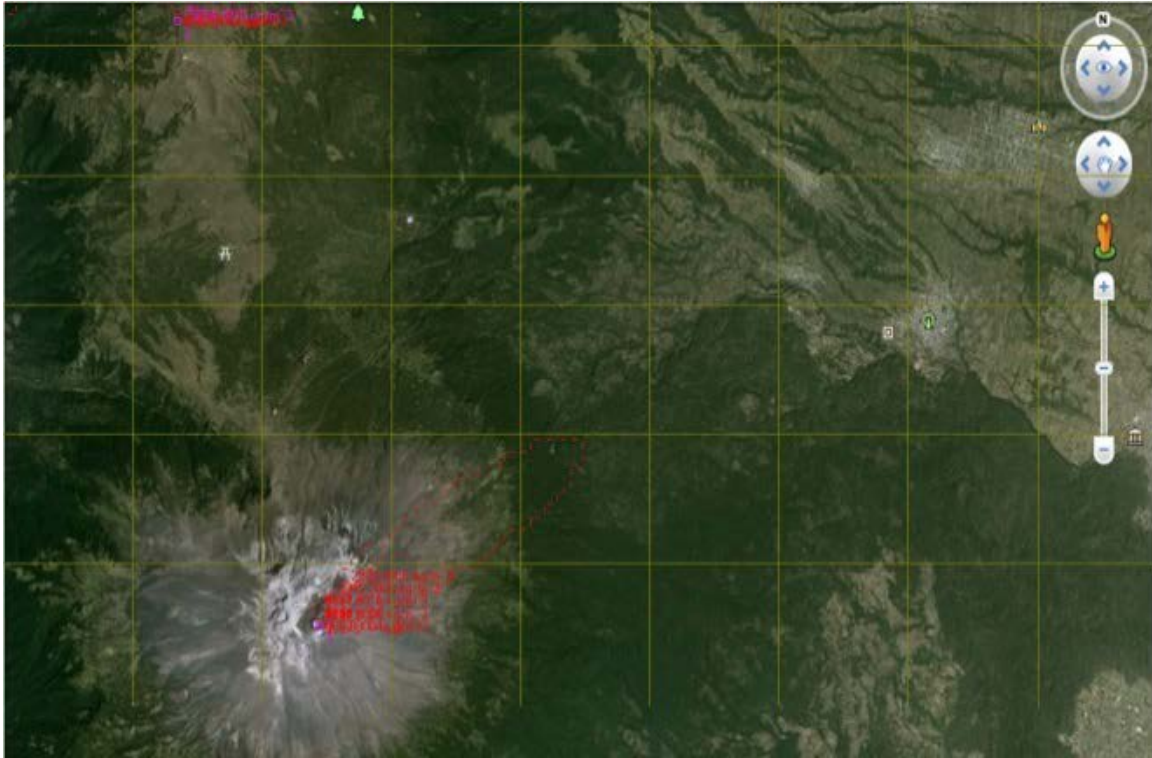


Figura 4.7. Pruebas 9 y 11 respectivamente, análisis del parámetro de Pasquill.

En las 30 pruebas que se evaluaron, se registró la menor concentración de ceniza volcánica en la prueba 21, cuyo flujo de salida fue el menor con un valor de 10,000  $\mu\text{g}/\text{m}^2$  y se obtuvo una concentración de ceniza de 539.1899  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ , este resultado resulta del mínimo flujo de salida y se le asignó una elevada velocidad de salida del contaminante (ceniza) de 15 m/s.



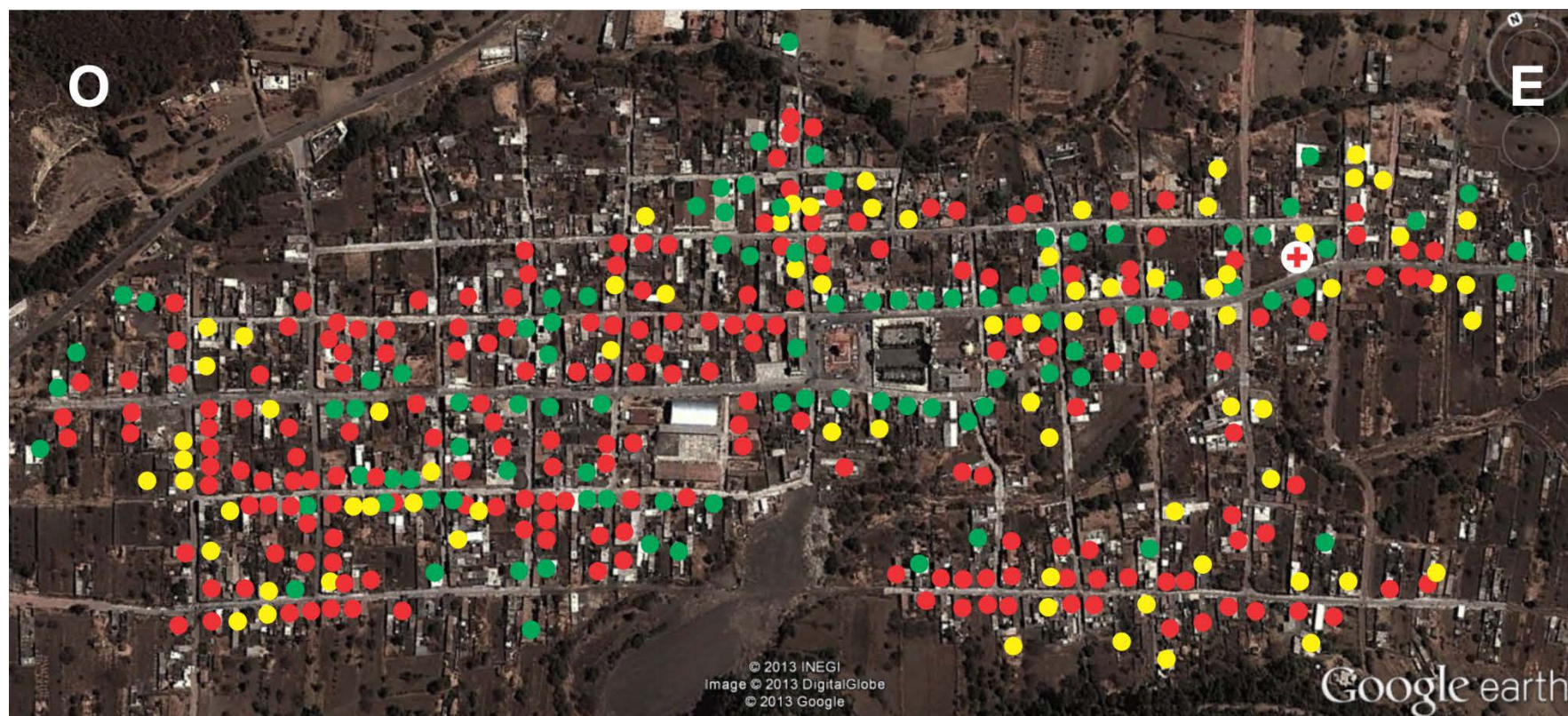
**Figura 4.8. Prueba 21, concentración de ceniza mínima para los diferentes escenarios.**




La concentración máxima de ceniza volcánica de  $10,507.2577 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de la prueba 18, tal vez no ocasione daños a la infraestructura de la población, como colapso de techos en las viviendas. Sin embargo, basándonos en la tabla 1 del capítulo 1, la duración de este tipo de erupción es de 1 hasta 6 horas, incrementándose el flujo de salida de la ceniza, provocando mayor sobrepeso en los techos de las viviendas, ocasionando el colapso de los mismos. Santiago Xalitzintla es una población que no cumple con las normas de construcción de viviendas, los techos son de cartón, teja, madera, lámina, y son escasos los techos de concreto. Es por ello que el propósito de esta tesis es sensibilizar a las autoridades tanto municipal, estatal y federal a formar campañas de reconstrucción de techos en las viviendas de las localidades cercanas a volcanes activos como lo es el Popocatepetl, Citlaltépetl, Chichón etc. Se necesitan medidas preventivas para poder mitigar estos fenómenos naturales.



**Figura 4.9. Vulnerabilidad de Santiago Xalitzintla, Puebla, fuente: Propia.**

Figura 4.10. Disposición gráfica de la vulnerabilidad de Santiago Xalitzintla.



	Techo de concreto
	Techo de aluminio
	Techo de cartón

## CONCLUSIONES

Si bien existe un Plan Operativo Popocatepetl (POP), es necesario que se analice una vez más, ya que, desde su creación en 2000, no se han reajustado las líneas de mando, la infraestructura y servicios comunitarios; si bien en Julio de 2012 se creó el Plan Integral de Atención de Emergencias y Desastres Naturales para el Estado de Puebla por parte de Protección Civil del Estado de Puebla, en donde integra acciones de los coordinadores municipales, acciones de dependencias municipales y estatales, manuales de refugios temporales; se requiere de seguimiento de las mismas autoridades, apoyo en investigaciones, simulacros, capacitación a las comunidades, entre otros, para poder mitigar los riesgos volcánicos. Implementar programas de reconstrucción de techos mediante estudios previos en las localidades que se encuentren en un radio no mayor a 15 kilómetros del cráter del volcán Popocatepetl, y, así mismo, será importante para la comunidad adoptar una cultura autoprotección.

Se han generado diversos escenarios en este estudio de tesis, en ellos hemos variado los parámetros que por circunstancias meteorológicas o propias de la dinámica del volcán determinan el comportamiento y desarrollo de una pluma volcánica. Un factor determinante es la velocidad del viento, en todas las pruebas con este valor de 3 m/s o 5 m/s obtenemos un valor de concentración de ceniza elevado, como en la prueba 18, prueba 20, prueba 5, Tabla 5; incluso variando el parámetro de Pasquill a una estabilidad atmosférica extremadamente inestable, este valor puede determinar si la vulnerabilidad de la comunidad de Santiago Xalitzintla ante caída de ceniza del volcán Popocatepetl aumenta o disminuye.

Sin duda alguna el factor que principalmente determina el riesgo volcánico es el mismo material que puede emanar el volcán, el riesgo volcánico es directamente proporcional al material eyectado durante la erupción. Esto es, al emitir mayor cantidad de fragmentos volcánicos (ceniza, lapilli, bombas, lava, gases), se producen flujos piroclásticos, caída intensa de ceniza, coladas basálticas, lahares., etcétera, aumentando significativamente el riesgo volcánico en las poblaciones cercanas.



Haciendo un análisis minucioso de las pruebas generadas, la temperatura de los gases que exhalan del edificio volcánico, juega un papel importante en la caída de ceniza en las poblaciones cercanas al volcán, en la prueba 16 se incrementó la concentración máxima de ceniza al disminuir la temperatura de los gases a 600 grados kelvin, en comparación de la prueba 14 en donde la temperatura de los gases es de 800 grados kelvin, Tabla 5. Como se observa en la Tabla, el ángulo de dirección del viento es de 55 grados tomando de referencia al norte geográfico, estos escenarios se pueden generar entre los meses de Enero a Abril, ya que las corrientes de viento en meses posteriores cambia, y es poco probable que adquiera ese ángulo de dirección.

Las pruebas con parámetros de Pasquill en “1”, resultan improbables que se lleguen a generar en la comunidad de Santiago Xalitzintla, ya que estas condiciones atmosféricas se obtienen en verano, estación del año en donde los vientos se tienden hacia el Oeste. Xalitzintla no correrá ningún riesgo por caída de ceniza del volcán, si la velocidad de las corrientes de viento son elevadas, puesto que la mayoría de la ceniza con granulometría fina se suspenderá sobre la población depositándose en áreas lejanas al volcán, mientras que los fragmentos gruesos se depositaran en las faldas del mismo, no importando la distancia tan corta de la población al cráter, el riesgo por caída de ceniza será menor.

## BIBLIOGRAFIA

DE LA CRUZ, Servando. "*Origen de los volcanes*". En: Volcanes, peligros y riesgo volcánico en México, México, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Vol 1, pp, 1-55 diciembre 2008.

DEMANT, A. "*Interpretación geodinámica del vulcanismo del Eje Volcánico Transmexicano*". Revista del Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México, vol. 5, núm. 2, 1984.

ESPINASA, R. "*Gestión del Riesgo Volcánico*". Primer Congreso Nacional de Gestión de Riesgos, Puebla, México, Junio, 2013.

ESPINASA, R. "*Historia del Volcán Popocatepetl, 17 años de Erupciones*". Centro Nacional de Prevención de desastres, México, 2012.

ESPINDOLA, J.M. "*Tectónica de Placas*", Dirección General de Divulgación de la Ciencia Universidad Nacional Autónoma de México, primera edición, 2006, pp, 1-29.

ESPINDOLA, J.M. "*Tectónica de Placas*", Dirección General de Divulgación de la Ciencia Universidad Nacional Autónoma de México, Primera edición, México, 2006.

FÚSTER, J.M. "*Vulcanismo y Cambio Climático*", Real Academia de Ciencias, España, 2004.

HOWELL, C, BAXTER P et al. "*Los Peligros de las Cenizas Volcánicas para la Salud*", E.U. 2003.

MARTINEZ, A. "*Volcanes*". Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, Julio, 2012.

NAVARRETE, E. "*Apuntes de Geología General*", FICT – ESPOL, México, 2005.

ORDAZ, L, y ACEVO, Z. et al. "*Plan Operativo Popocatepetl*", Protección Civil del Estado de Puebla, Puebla, México, 2012.

ROJAS, D y PAREDES J. "*Compendio de Geología General*". Universidad Nacional de Ingeniería Programa, Editorial Eduardo de Habich Textos UNI, Perú, Noviembre 2008.

SAENZ, Rodrigo. "*Los Volcanes*", Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica", segunda edición, 1998.