



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

ESTUDIO DE AMENAZAS GEOLÓGICAS EN LA CIUDAD DE CUILAPA, DEPARTAMENTO DE SANTA ROSA

Julia Marleny Álvarez Cho

Asesorado por el Ing. Julio Roberto Luna Aroche

Guatemala, octubre de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE AMENAZAS GEOLÓGICAS EN LA CIUDAD DE
CUILAPA, DEPARTAMENTO DE SANTA ROSA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JULIA MARLENY ÁLVAREZ CHO

ASESORADO POR EL ING. JULIO ROBERTO LUNA AROCHE

A CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Ing. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Elfego Orozco Fuentes
EXAMINADOR	Ing. Julio Roberto Luna Aroche
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

Estudio de Amenazas Geológicas en la ciudad de Cuilapa, Departamento de Santa Rosa,

tema que me fuera asignado por la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 16 de marzo de 2000.

Julia Marleny Alvarez Cho



Agosto, 12 del 2004.

Ingeniera
Carmen Marina Mérida Alva
Jefe Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería, USAC.

Ingeniera Mérida:

Atentamente me dirijo a usted, para hacer de su conocimiento que he asesorado el trabajo de graduación de la estudiante **Julia Marleny Alvarez Cho**, titulado **“ESTUDIO DE AMENAZAS GEOLOGICAS EN LA CIUDAD DE CUILAPA, DEPARTAMENTO DE SANTA ROSA”**.

Después de haber revisado y corregido dicho trabajo considero que llena los requisitos para su aprobación final.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Cordialmente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Julio Roberto Luna Aroche
Director

Centro de Estudios Superiores de
Energía y Minas

cc. archivo

JRLA/tzvd





Guatemala, 4 de Octubre de 2004

FACULTAD DE INGENIERIA

Ing. Carlos Salvador Gordillo
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Gordillo:

Me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado: **AMENAZA DE RIESGOS GEOLÓGICOS EN LA CIUDAD DE CUILAPA, DEPARTAMENTO DE SANTA ROSA**, elaborado por la estudiante universitaria **Julia Marleny Alvarez Cho**, quien contó con la asesoría del Ing. Julio Roberto Luna Aroche.

Considero que el trabajo desarrollado por la estudiante **Alvarez Cho**, satisface los requisitos exigidos, por lo cual recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención a la presente.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS.

Ing. Carmen Marina Mérida
Jefe Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

c.c: Archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Julio Roberto Luna Aroche y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Inga. Carmen Marina Mérida Alva, al trabajo de graduación de la estudiante Julia Marleny Álvarez Cho, titulado ESTUDIO DE AMENAZAS GEOLÓGICAS EN LA CIUDAD DE CUILAPA, DEPARTAMENTO DE SANTA ROSA, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Ing. Oswaldo Romeo Escobar Alvarez



Guatemala, octubre 2006.

/bbdeb.

"TODO POR TI CAROLINGIA MÍA"
Dr. Carlos Martínez Durán, 2006 centenario de su nacimiento

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.416.06

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE AMENAZAS GEOLÓGICAS EN LA CIUDAD DE CUILAPA, DEPARTAMENTO DE SANTA ROSA**, presentado por la estudiante universitaria **Julia Marleny Alvarez Cho**, procede a la autorización de impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, octubre de 2006

/cc

Todo por ti, Carolingia Mía
Dr. Carlos Martínez Durán
2006: Centenario de su Nacimiento

AGRADECIMIENTOS A:

Dios

Mis padres y hermanos

Los ingenieros Julio Luna Aroche y Omar Flores, por su gran apoyo en la realización de este trabajo de graduación

Todos los que han contribuido a mi formación

ACTO QUE DEDICO A:

Dios y a la Virgen María

Mi patria

Mi familia

I. ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1. Eventos naturales.....	1
1.2. Riesgo	1
1.3. Vulnerabilidad.....	2
1.4. Amenaza.....	2
1.5. Amenaza sísmica.....	2
1.6. Amenaza por deslizamiento.....	4
1.7. Amenaza por inundación.....	11
1.7.1. Esguerrimiento.....	12
1.8. Amenaza volcánica	14
1.8.1. Tipos de erupciones volcánicas.....	18
1.8.2. Evaluación de la amenaza.....	19

2. ASPECTOS IMPORTANTES DEL MUNICIPIO DE CUILAPA

2.1. Descripción del área en estudio.....	21
2.1.1. Orografía y climatología.....	22
2.1.2. Hidrografía.....	22
2.1.3. Vías de comunicación.....	23
2.1.4. Actividades económicas.....	23
2.2. Geología	25

2.2.1. Unidades litológicas.....	25
2.2.2. Estructuras geológicas.....	25

3. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA EN EL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Metodología para la evaluación de la amenaza sísmica.....	27
3.1.1. Identificación y delimitación de las fuentes sísmicas.....	27
3.1.1.1. Fallas específicas.....	28
3.1.2. Determinación de la actividad sísmica de las fuentes.....	29
3.1.2.1. Determinación de modelos de recurrencia y ocurrencia temporal de los sismos.....	29
3.1.2.2. Modelo de recurrencia de los sismos.....	29
3.1.2.3. Modelo de ocurrencia.....	32
3.1.2.4. Establecimiento de una relación de atenuación.....	32
3.1.3. Integración de los efectos en el área de estudio.....	33
3.2. Presentación de los resultados.....	34
3.2.1. Propuesta de aceleración de diseño.....	37
3.2.2. El sismo básico de diseño.....	38

4. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN EL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Descripción de lugar	43
4.2. Factores condicionantes.....	45
4.2.1. Topografía.....	45
4.2.2. Geología del lugar.....	45
4.2.3. Características del suelo y vegetación.....	47
4.3. Factores activadores.....	48
4.3.1. Precipitación.....	48
4.3.2. Registros sísmicos.....	50

4.3.3.	Actividad humana en el área de estudio.....	51
4.4.	Estabilidad del talud.....	53
5.	EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO	
5.1.	Descripción de la cuenca.....	61
5.2.	Análisis de lluvias máximas.....	63
5.3.	Análisis de curvas de duración-frecuencia-intensidad.....	64
5.4.	Análisis de caudales máximos.....	67
5.4.1.	Disponibilidad de información.....	67
5.4.2.	Métodos para la obtención del caudal máximo.....	67
5.5.	Análisis de perfil del río Cuilapa.....	70
6.	EVALUACIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA EN EL ÁREA DE ESTUDIO	
6.1.	Índices para la identificación de riesgo volcánico.....	75
6.2.	Descripción de los volcanes que pueden afectar el área de estudio.....	79
6.2.1.	Volcán de Fuego.....	79
6.2.1.1.	Historia eruptiva.....	79
6.2.1.2.	Zonas de riesgo de caída de tefra.....	80
6.2.2.	Volcán de Pacaya.....	81
6.2.2.1.	Historia eruptiva.....	81
6.2.3.	Volcán Tecuamburro.....	82
	CONCLUSIONES.....	83
	RECOMENDACIONES.....	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Esquema de ladera natural	5
2	Esquema de talud	6
3	Ubicación del municipio de Cuilapa	24
4	Mapa geológico de Cuilapa	26
5	Secuencia de los pasos que involucra el cálculo de amenaza sísmica	36
6	Resultados para la ciudad de Cuilapa	35
7	Mapa de macrozonificación sísmica	39
8	Vista de uno de los conos cineríticos	44
9	Deslizamiento ocurrido en la colonia El Reducto	44
10	Fotografía de uno de los cortes de ladera	46
11	Drenajes erosionados	49
12	Casas muro	50
13	Secuencia del análisis de amenaza por deslizamiento	52
14	Planos de falla en el talud saturado	56
15	Planos de falla en el talud, con nivel freático alto	57
16	Planos de falla en el talud, con nivel freático medio	57
17	Planos de falla en el talud, con nivel freático bajo	58
18	Planos de falla en el talud, con nivel freático al pie del talud	58
19	Cuenca del riachuelo Las Cañas o río Cuilapa	62
20	Curva frecuencia acumulativa de precipitación	63
21	Curvas de intensidad de lluvia para El Pino, Santa Rosa	66
22	Perfil del río Cuilapa	71
23	Vista del río Cuilapa, en el punto de control	72

24 Orden lógico de un estudio de amenaza por inundación	73
25 Focos eruptivos cuaternarios de Guatemala	78

TABLAS

I Resumen de resultados	37
II Índices de sismicidad y aceleración efectiva según zona	39
III Probabilidad de no excedencia en 50 años	40
IV Descripción del material geológico	46
V Resultados de los ensayos del suelo	47
VI Factores de seguridad para diferentes pesos unitarios	55
VII Precipitación acumulada para períodos de retorno dados	64
VIII Intensidad de lluvia esperada para la estación El Pino	67
IX Caudales esperados para el río Cuilapa, método racional	68
X Caudales esperados para el río Cuilapa, método del caudal índice	70

GLOSARIO

- Acelograma** Es el registro obtenido de un acelerógrafo y sirve para calcular las aceleraciones instantáneas de la superficie terrestre.
- Atenuación** Disminución de la amplitud de las ondas sísmicas durante la transmisión a través del interior y por la superficie de la tierra.
- Basalto** Roca ígnea extrusiva de grano fino en la que predominan los minerales de color oscuro.
- Ceniza volcánica** Término genérico de material muy fino que se produce por la fragmentación del magma. Es transportada por el viento a grandes distancias, sus dimensiones son menores a los 2 mm.
- Ciclo hidrológico** El ciclo completo de fenómenos que realiza el agua y que la llevan de su forma gaseosa (vapor) a sus forma líquida o sólida y a través de la precipitación la incorporan a las aguas subterráneas o corrientes superficiales, para nuevamente regresar a su forma gaseosa en la atmósfera.
- Diaclasa** Fractura lisa en las rocas, se pueden denominar también grietas. Las diaclasas se pueden definir como planos

divisorios en los que no se observa un desplazamiento visible entre dos bloques.

Estratovolcán	Tienen forma cónica con un cráter central, el edificio volcánico está formado por capas sucesivas de depósitos de lava, escoria, arena y cenizas, producto de las diferentes erupciones. La mayoría de los volcanes de Guatemala son de ese tipo.
Flujo de tierra	Movimiento masivo caracterizado por el traslado cuesta a bajo de materiales sueltos.
Lapilli	Es lava fragmentada y lanzada violentamente que se solidifica en el aire, sus dimensiones van de 4 a 32 mm.
Licuefacción	Proceso por el cual un material cambia sus características dinámicas y fluye con aquellas parecidas a las de un líquido.
Magma	Mezcla líquida, sólida y gaseosa de silicatos, generada por la fusión de rocas que se encuentran en el interior de la tierra entre los 20 a 300 Km. de profundidad.
Sismo	Evento físico causado por la liberación repentina de energía debido a dislocación o desplazamiento en la corteza terrestre; parte de la energía es irradiada en todas direcciones en forma de ondas elásticas u ondas sísmicas. Es percibido en la superficie como una vibración del terreno y se le denomina temblor cuando no causa daños y

terremoto cuando la sacudida es violenta y el evento es destructivo, causando daños severos o víctimas.

Suelo saprolito Suelo residual, que se forma de alteración y disolución incompletas pero intensas.

Tefra Son fragmentos de lava porosa producida por la rápida liberación de los gases, con dimensiones de unos cuantos centímetros.

RESUMEN

En este trabajo se encuentra información acerca de las amenazas geológicas que pueden afectar a la población de la ciudad de Cuilapa, cabecera municipal del Departamento de Santa Rosa, se aplica solamente al área urbana de dicho municipio y fue estructurado de la siguiente manera: conceptos fundamentales, aspectos importantes del municipio de Cuilapa, amenaza sísmica, amenaza por deslizamiento, amenaza por inundación y amenaza volcánica. Cada amenaza se analizó tomando en cuenta las características principales de la zona en estudio.

El capítulo de amenaza sísmica, es un resumen del estudio Análisis de amenaza sísmica en el Departamento de Santa Rosa realizado por Federico Chavarría en el año 1999, en el que se propone un valor de aceleración del terreno para incluirlo al diseño sismorresistente. Se incluye este resumen por los datos importantes que propone y para ilustrar de mejor manera los componentes más relevantes a tomar en cuenta en un análisis de amenaza geológica.

El capítulo de amenaza por deslizamiento, analiza las propiedades físico-mecánicas del terreno, así como los factores de seguridad del talud que indican su grado de estabilidad, para ello se utilizó el programa de computadora PCSTBL5.

Para el análisis de amenaza por inundación, se desarrolló una tabla de frecuencia-intensidad de lluvia, a partir de los datos obtenidos de la estación Los Esclavos, desde 1969 hasta el año 2000. Los datos de lluvia así como los

caudales que se pueden registrar, entre otros aspectos, sirven para determinar si en la zona puede o no ocurrir este tipo de amenaza.

El análisis de amenaza por actividad volcánica considera los volcanes que pueden afectar a la población, ya sea por actividad directa o indirecta.

OBJETIVOS

General

- Determinar las amenazas geológicas que pueden afectar al Municipio de Cuilapa, departamento de Santa Rosa.

Específicos

1. Determinar qué amenazas causan mayores daños en la ciudad de Cuilapa.
2. Proporcionar un estudio técnico que sirva de base para estudios más específicos y para un ordenamiento territorial adecuado.

INTRODUCCIÓN

Guatemala ha sido marcada por diversas catástrofes geológicas y meteorológicas. Se han registrado terremotos –como en el año 1976-, inundaciones y deslizamientos en diversas regiones, así como la continua actividad volcánica en el sur del país.

Por tal motivo, el presente estudio que analiza las amenazas geológicas que pueden afectar a la población de la ciudad de Cuilapa, cabecera departamental de Santa Rosa.

El estudio se ha restringido a la zona urbana de la ciudad de Cuilapa por tener el mayor número de habitantes y la mayor parte de infraestructura de importancia (iglesias, hospital general, institutos, escuelas, etc.) también se encuentra cerca de la falla de Jalpatagua a la que se asocia la actividad sísmica local.

Se analizaron cuatro tipos de amenazas: sísmica, por inundación, por deslizamiento y volcánica.

Dentro del estudio se profundizó en la amenaza por deslizamiento, debido a que anteriormente se presentó en la colonia El Reducto un problema de esta naturaleza, dicha colonia está asentada en conos de escoria volcánica. Para determinar la estabilidad y conveniencia para que sea habitable, se realizó un ensayo de suelo determinando las siguientes características: cohesión, ángulo de fricción interna, peso específico. Estos datos sirvieron para determinar la estabilidad del talud con la ayuda del programa por computadora PCSTABL-5,

facilitado por el director del Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear de Colombia (INGEOMINAS).

El río Cuilapa atraviesa esta ciudad por lo que se analizó la cuenca y sus características, seguido del análisis de lluvias máximas y curvas de duración-frecuencia-intensidad (D-F-I) para finalizar con datos sobre el caudal máximo que puede esperarse.

La amenaza volcánica se realizó tomando en cuenta, los volcanes Pacaya, Fuego y Tecuamburro, analizando los registros existentes de los mismos y su posible impacto nocivo en el lugar.

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Para comprender de mejor manera lo que significa un estudio de amenazas geológicas y su incidencia en la sociedad, se describen algunos conceptos fundamentales relacionados al tema, entre ellos: vulnerabilidad, amenaza y riesgo.

1.1. Eventos naturales

Resultan básicamente, de interacciones entre la atmósfera, hidrósfera y litósfera; es decir, son procesos geofísicos.

El agotamiento de los recursos y el deterioro ambiental cambian estas interacciones, que a su vez, afectan la frecuencia y magnitud de los desastres naturales.

1.2. Riesgo

Es el nivel de destrucción o pérdida esperada, se obtiene de la combinación de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos –amenaza– y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales amenazas.

$$R = \text{Amenaza} \times \text{vulnerabilidad}$$

1.3. Vulnerabilidad

Condición de susceptibilidad a sufrir daños, pérdidas, sufrimiento o dificultad de recuperación ante la manifestación de una o varias amenazas.

1.4. Amenaza

Potencial ocurrencia de un suceso provocado por un evento natural, generado por la acción de los seres humanos o por la interacción de ambos, el cual origina condiciones adversas a las personas, a sus bienes y al ambiente cuando se manifiestan en un lugar específico, con una intensidad y duración determinada.

Amenazas geológicas: potencial de ocurrencia de un fenómeno geológico desastroso –terremotos, deslizamientos, actividad volcánica, etc.- durante cierto período de tiempo, en un lugar determinado.

1.5. Amenaza sísmica

La amenaza sísmica es la probabilidad de que el parámetro de movimiento del suelo (aceleración, velocidad, desplazamiento, intensidad) en un sitio y en un intervalo de tiempo determinado, sea excedido.

Las fuentes sísmicas pueden generar sismos de diferentes características, tales como magnitud, distancia epicentral, profundidad focal y frecuencia de vibraciones; dependiendo del grado en que se presenten dichas características, una región puede estar más o menos amenazada o estar totalmente libre de amenaza.

Las ondas sísmicas que se generan durante cualquier evento sísmico, producen aceleraciones en el terreno, las cuales afectarán a las obras civiles existentes que se encuentren dentro de la zona de influencia del sismo, tales como: viviendas, edificios, presas, acueductos, puentes, carreteras, aeropuertos, etc.

Para la evaluación de la amenaza sísmica, se ha incorporado la metodología probabilística, la cual permite predecir la futura actividad sísmica en términos de probabilidades.

La validez de los resultados de un análisis probabilístico de amenaza sísmica depende de muchos factores, principalmente de la calidad y cantidad de los datos usados. Cornell, en 1968 desarrolló un método para que el ingeniero obtenga las relaciones entre algunos parámetros del movimiento del terreno como intensidad Mercalli modificada, velocidad pico, aceleración pico, período de retorno, etc. El tipo de información necesaria para desarrollar el método consiste en el promedio de la actividad sísmica de las fuentes cercanas al sitio, incluyendo el número de eventos mayores de cierta magnitud de interés. El método está diseñado para integrar la influencia individual de fuentes potenciales de terremotos a la distribución de intensidad (o aceleración) máxima probable. La ventaja del método es su rapidez y simpleza, lo que permite al analista llevar a cabo varios análisis para estudiar el efecto de diferentes distribuciones de fuentes y sus respectivas actividades. Varios investigadores se han dedicado a mejorar el procedimiento original de Cornell, han aportado algunas variantes a la metodología, y se han desarrollado varios programas de computadora tales como: EQRISK, PRISK Y NPRISK.

Hay dos aspectos que satisfacer en cuanto a la amenaza sísmica se refiere.

- a. Seguridad de las estructuras
- b. Conocimiento del lugar donde se piensa ubicar nueva infraestructura

1.6. Amenaza por deslizamiento

Es la probabilidad de que se presente un movimiento de suelo o roca, en una población determinada, que origine condiciones desfavorables a las personas o sus bienes.

Los deslizamientos son movimientos que se inician debajo de masas de suelo o roca, sobre una o unas superficies de rotura o zonas relativamente delgadas con intensa deformación de cizalla (posiblemente planos de falla), en los que preserva, a grandes rasgos, la forma de la masa desplazada.

Los deslizamientos de taludes o laderas ocurren de muchas maneras y aún persiste cierto grado de incertidumbre en su predicción, rapidez de ocurrencia y área afectada. Sin embargo, existen ciertos parámetros que ayudan a identificar y reconocer áreas potenciales de fallas, lo cual permite el tratamiento del talud, para así eliminar o reducir, a un mínimo, la amenaza por deslizamiento.

Es usual, por ejemplo, que la inspección se realice por medio de un análisis foto-geológico del área que se desea estudiar, que permita descubrir evidencias importantes sobre grandes deslizamientos en curso, los cuales deberán ser evaluados con posterioridad en el sitio.

Talud o ladera es una masa de tierra o roca que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos.

Ladera: tiene una conformación actual y tuvo origen natural (ver figura 1).

Talud: tiene conformación actual pero es de origen artificial (ver figura 2).

Figura 1. Esquema de ladera natural

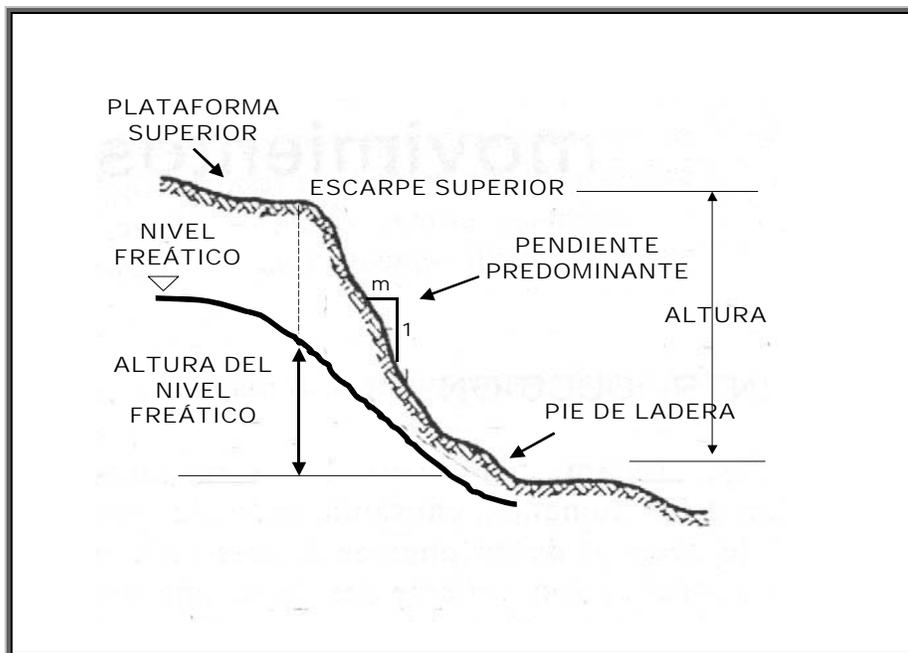
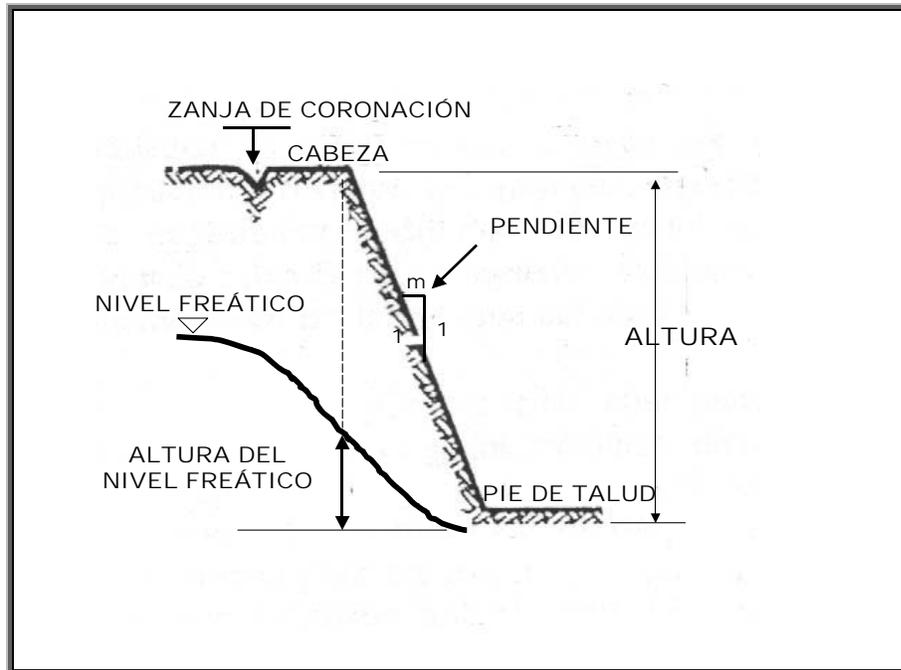


Figura 2. Esquema de talud



El conocimiento de la ocurrencia de deslizamientos en el pasado, en el área de interés, constituye un buen punto de partida para la detección y evaluación de potenciales deslizamientos en el futuro. En general, las áreas donde estos fenómenos ya han ocurrido en el pasado, son altamente susceptibles a que se repitan. Entre las fuentes de información para conocer sobre deslizamientos en el pasado, están las reseñas de deslizamientos publicados en periódicos locales, revistas nacionales o internacionales especializadas en el tema, mapas de zonificación de casos ocurridos de inestabilidad geológica, inventarios de riesgos geológicos, entre otros.

La ocurrencia de deslizamientos en un área en particular es provocada por los siguientes factores.

1.6.1 Factores condicionantes

a) Topografía

En general, los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de topografía si las condiciones están dadas. Es importante destacar qué zonas, inicialmente estables, pueden volverse inestables con la construcción de infraestructura, deforestación u otras causas.

Una breve descripción de las características topográficas se incluye a continuación.

Taludes escarpados: en terrenos escarpados los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de material geológico. Sin embargo, la causa más común de un gran número de derrumbes que ocurren en taludes escarpados, es el deslizamiento a lo largo de la zona de contacto de la roca con suelos residuales o coluviales.

Acantilados y bancos bajo la acción de corrientes de quebradas: en acantilados y bancos objeto de ataque por corrientes de quebradas los deslizamientos son comunes. Si el banco está constituido por suelos o materiales no consolidados, el punto de deslizamiento más débil está ubicado en el máximo punto de curvatura de la quebrada y es en este punto donde se recibe el mayor impacto del agua.

Áreas de concentración de drenaje y filtración: un estudio cuidadoso de la red de drenaje y áreas de concentración de agua, es extremadamente importante. Filtraciones con el subsecuente deslizamiento, es probable que ocurran en áreas debajo de reservorios, canales de irrigación o depresiones con agua estancada.

La importancia de reconocer el peligro potencial en áreas derivadas de drenaje superficial, especialmente en rocas porosas y fracturadas, necesita especial énfasis

Áreas de terreno ondulado: la presencia de terreno ondulado (pequeñas elevaciones o montículos) cuyas características sean inconsistentes con aquellas de los taludes generales del área y que presentan escarpas en las elevaciones altas, son generalmente indicadores de un deslizamiento antiguo. Una vez que se encuentra un deslizamiento antiguo, sirve como advertencia de que el área en general ha sido inestable en el pasado y por lo tanto nuevas perturbaciones pueden reactivar el movimiento.

b) Geología de la región

Los fenómenos geológicos condicionan el comportamiento local de los deslizamientos. Esta influencia puede considerarse principalmente desde tres puntos de vista: el primero es debido al comportamiento mecánico de los materiales que forman el subsuelo y el segundo debido a que la actividad sísmica es uno de los principales fenómenos que inducen los deslizamientos, y el tercero la composición química de los suelos.

En áreas de concentración de fracturas, el movimiento de taludes puede estar estructuralmente controlado por superficies o planos de debilidad tales como fallas geológicas, diaclasas, planos de deposición y foliación. Estas estructuras dividen un macizo rocoso en una serie de unidades individuales, las cuales pueden actuar independientemente una de la otra.

c) Vegetación

En taludes con pendientes completamente cubiertas por vegetación las hojas y raíces de las plantas inhiben el movimiento de las partículas de suelo. Las hojas forman una superficie burda, impiden y reducen la velocidad del agua corriente y las raíces consolidan el suelo.

Los taludes desprovistos de vegetación o cubiertos por ella parcialmente, son más susceptibles a la erosión hídrica y se pueden producir grandes movimientos de suelo con una tormenta o durante una estación lluviosa.

Los factores que determinan la pérdida de suelo son: la intensidad y la duración de la lluvia, la distribución del tamaño de las partículas del suelo y las propiedades relacionadas, como son la textura y la estructura superficial, y la forma de la pendiente.

1.6.2. Factores activadores

a) Las lluvias

La lluvia es un efecto primordial en la estabilidad de taludes ya que influencia la forma, incidencia y magnitud de los deslizamientos.

En suelos residuales, que generalmente que no está consolidado, la lluvia tiene un efecto muy importante, ya que el efecto acumulativo puede llegar a causar la saturación del terreno activando así un deslizamiento.

Los grandes accidentes registrados en el territorio nacional, se producen durante el período lluvioso, que varía de una región a otra.

La lluvia contribuye directamente a la inestabilidad de laderas a través de los siguientes mecanismos.

- Elevación del nivel de agua y generación de fuerza de percolación
- Llenado temporal de hendiduras, grietas y/o estructuras en suelos saprolíticos y rocas (fracturadas, juntas, etc.) con generación de presiones hidrostáticas, y
- Formación de frentes de saturación, sin la elevación o formación de nivel freático, reduciendo la resistencia de los suelos, por la pérdida de cohesión aparente.

b) Inestabilidad de laderas por acción del hombre

El hombre, a través del tiempo se ha constituido en un importante agente modificador del medio ambiente, potenciando o acelerando diversos procesos de dinámica superficial. Estas intervenciones adquieren especial importancia en las laderas, debido a la susceptibilidad natural de los movimientos gravitacionales de masa o procesos erosivos, que son los problemas más comunes.

Las principales causas antrópicas de los deslizamientos son las siguientes.

- Mala evacuación y concentración de aguas pluviales
- Mala evacuación de aguas servidas
- Filtraciones en redes de abastecimiento de agua potable
- Fosas sanitarias

- Pendientes y alturas excesivas de cortes
- Ejecución inadecuada de rellenos
- Botaderos de basura
- Remoción indiscriminada de cobertura vegetal

Los deslizamientos que ocurren directamente por la acción de estas causas se les denominan deslizamientos inducidos.

c) La sismicidad de la región

La aceleración sísmica en el terreno, la falla de taludes y licuefacción de suelos constituyen uno de los principales efectos causados por los sismos, que puede afectar de modo desfavorable obras hechas por el hombre, generando grandes pérdidas materiales y humanas. La gran mayoría de las fallas de taludes durante sismos se deben al fenómeno de licuefacción en suelos no-cohesivos. Sin embargo, estas fallas de taludes en suelos cohesivos también han sido observadas durante eventos sísmicos.

1.7. Amenaza por inundación

Las inundaciones son fenómenos naturales que tienen como origen la lluvia, además el crecimiento anormal del nivel del mar o una combinación de estos fenómenos. La precipitación que cae en una zona determinada, es el resultado de una serie de factores que influyen sobre la lluvia, tales como:

- La latitud: debido a que la precipitación disminuye con la latitud porque la disminución de la temperatura hace decrecer la humedad atmosférica.

- Distancia a la fuente de humedad: mientras más cercana se encuentre la zona a fuentes de humedad, como mar, lagos, entre otros, existirá mayor posibilidad de lluvias.
- Presencia de montañas: el ascenso orográfico favorece la precipitación. Así, en una cadena montañosa ocurren precipitaciones más pesadas o intensas en las laderas expuestas a los vientos, cayendo sólo trazas de lluvia en la ladera no expuesta de las montañas.

1.7.1. Escurrimiento

Es la precipitación residual que queda después de restar las pérdidas por intercepción y evapotranspiración. Aparece en los canales, naturales o artificiales, con flujos perennes o intermitentes. El escurrimiento, de acuerdo con la trayectoria que toma para llegar a un canal, puede ser superficial, subsuperficial o freático.

El flujo superficial se mueve por el suelo como flujo terrestre hasta que llega a un canal, por donde continúa como flujo en canal o río. Después de unirse al caudal del canal, se combina con los otros componentes del escurrimiento en el cauce para formar el escurrimiento total.

El flujo subsuperficial, llamado también interflujo, escurrimiento subsuperficial por tormenta y filtración por tormenta, se infiltra sólo hasta las capas superiores del suelo sin unirse al cuerpo freático principal. Como tiene movimiento lateral, puede avanzar debajo de la tierra, hasta que llega a un canal o retorna a la superficie y continúa como flujo sobre tierra.

El flujo de aguas freáticas, o escurrimiento subterráneo, es el aporte producido por la percolación profunda. Es el flujo del cuerpo freático principal y requiere períodos largos, quizá de años, para llegar a un canal. El flujo freático es el que ocasiona que sigan corriendo los ríos en tiempo de secas y permanece casi constante durante una tormenta.

El flujo superficial y subsuperficial interesa a los ingenieros en el control de inundaciones, porque en márgenes de río suelen encontrarse poblados y porque el flujo subsuperficial puede ocasionar movimientos de masa de suelo.

La precipitación es la que alimenta al escurrimiento. La parte de la precipitación que contribuye por completo al escurrimiento directo se llama precipitación efectiva, si la precipitación es de lluvia. La parte de la precipitación que contribuya directamente por entero al escurrimiento se llama precipitación o lluvia en exceso. Por tanto, la lluvia efectiva influye al flujo subsuperficial, mientras que la lluvia en exceso sólo flujo de superficie.

Los factores que afectan el escurrimiento son:

a. Características climatológicas

- Precipitación: forma (lluvia, granizo, heladas, rocío), intensidad, duración, distribución por región, intervalo de recurrencia, precipitación antecedente, humedad del suelo, dirección de movimiento de la tormenta.
- Temperatura: variación, acumulación de nieve, extremos durante una precipitación
- Viento: velocidad, dirección, duración

- Humedad
- Presión atmosférica
- Radiación solar

b. Características de la cuenca hidrológica

- Topográficas: tamaño, forma, pendiente, elevación, red de drenaje, ubicación general, uso y capa superior del suelo, lagos y otros cuerpos de agua, drenaje artificial, orientación, canales y cauces (tamaño, forma de la sección transversal, pendiente, rugosidad, longitud)
- Geológicas: tipos de suelo, permeabilidad, formaciones de aguas freáticas, estratificación.

Una inundación constituye una amenaza para el hombre, cuando éste ocupa planicies de inundación, obstruye el cauce normal del río provocando represamiento.

1.8. Amenaza volcánica

Los volcanes poseen una variedad de amenazas geológicas, tanto durante las erupciones como en ausencia eruptiva.

Dentro de las amenazas volcánicas se encuentran las siguientes:

a. Caída de piroclastos

A medida que el magma se aproxima a la superficie del volcán, libera gases disueltos. El gas que escapa rápidamente fragmenta el magma solidificándolo en partículas. Si las partículas fragmentadas salen del conducto a velocidades considerables, se dispersarán a gran altura dentro de la atmósfera. Estos fragmentos con tamaños dentro de un intervalo que va desde ceniza microscópica hasta bloques de varios metros.

El grosor y tamaño de partículas de un depósito de tefra generalmente disminuye entre mayor sea la distancia desde la zona eruptiva o de escape, sin embargo un depósito puede cubrir área extensas, de decenas a cientos de kilómetros desde su fuente.

Las caídas de tefra raras veces amenazan directamente la vida, excepto dentro de unos cuantos kilómetros del foco eruptivo.

b. Flujos y oleadas piroclásticas

En ocasiones, la mezcla de gases calientes y las partículas de roca volcánica producidas por una erupción explosiva es más densa que el aire, por lo cual, en vez de elevarse por encima de la zona de escape para producir la tefra, dicha mezcla densa se comporta como un fluido, permaneciendo cerca de la tierra y cayendo pendiente abajo como un flujo piroclástico.

Los flujos piroclásticos comúnmente generan mezclas diluidas de ceniza caliente y gas, denominadas **oleadas piroclásticas**.

c. Flujos de lava

Aunque las erupciones con grandes emisiones de lava son poco explosivas y por lo tanto representan un riesgo menor, no es menos cierto que pueden ocasionar graves daños económicos, ya que al extenderse sobre la superficie pueden cubrir varios kilómetros de terreno.

Aunque el número de muertes debidos a flujos de lavas es generalmente menor que el asociado a otros productos volcánicos, no es, sin embargo nulo. La razón de esto es que su movimiento es relativamente lento y sigue los cursos de máxima pendiente, de manera que su trayectoria puede preverse. Excepcionalmente se emiten lavas de viscosidad tan baja que pueden cubrir grandes extensiones en poco tiempo.

d. Gases volcánicos

Todos los magmas liberan gases durante y entre las erupciones. Generalmente, los gases volcánicos se disipan rápidamente en dirección del viento, pueden dañar ojos y pulmones así como originar lluvia ácida.

Enormes cantidades de gases son normalmente lanzados hacia fuera con gran fuerza, durante una erupción volcánica. Los gases son emitidos a altas temperaturas lo que hace imposible la toma de muestras. La presencia de llamas amarillas o azules, observadas en varias ocasiones, indican la presencia de componentes inflamables, mientras que otros gases pueden ser reconocidos por su olor.

Los más importantes gases eruptivos son los siguientes: hidrógeno, cloruro de hidrógeno, sulfato de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, fluoruro de hidrógeno. En adición se encuentran pequeñas cantidades de metano, amonio, nitrógeno, argón y otros gases.

e. Deslizamientos y lahares

Se consideran eventos asociados los deslizamientos y lahares.

Los deslizamientos en volcanes pueden ser originados por movimientos sísmicos ya sea asociados a la actividad volcánica o tectónica y a la pendiente del volcán. Cuando el movimiento es rápido y de material seco se le denomina avalancha de escombros.

Los lahares, también denominados flujos de lodo y flujos de escombros, son masas fluidas de lodo, roca y agua. Los lahares, como las inundaciones, cubren las planicies de inundación y sumergen las estructuras en áreas más bajas.

Los lahares son particularmente riesgosos debido a que viajan mucho más lejos de un volcán que cualquier otro fenómeno con excepción de la tefra, además, afectan los valles principales en donde los asentamientos humanos son más grandes.

Los desprendimientos de tierra y lahares pueden provocar problemas mucho tiempo después de las erupciones originales. Las inundaciones y lahares pueden persistir por varios años o incluso décadas después de las erupciones.

1.8.1 Tipos de erupciones volcánicas

Dentro de los tipos de erupciones que pueden darse en un volcán están las siguientes: Hawaiano, Estromboliano, Vulcaniano, Peleano, Freático, Vesubiano y Pliniano. Se describirán las erupciones que se consideran más importantes, debido a que son las que se producen en los volcanes guatemaltecos.

a. Erupciones estrombolianas

Las fases explosivas normales de los magmas basálticos son poco violentas y se conocen como estrombolianas por ser como las que casi continuamente repite desde hace centenares de años el volcán Stromboli. La explosión se produce en forma continua o esporádica, cuando los gases se separan en el techo de la columna magmática, provocando la fragmentación más o menos grosera (bombas o escorias y lapillis o ceniza respectivamente) del fundido. La dispersión de estos depósitos de caída es muy pequeña y los fragmentos escoriáceos mayores constituyen los conos cineríticos.

b. Erupciones vulcanianas y plinianas

Las fases explosivas de los magmas ácidos viscosos con una elevada proporción de volátiles son casi siempre muy violentos, distinguiéndose los tipos de Vulcaniano (generalmente al inicio de la erupción, cuando la presión de gases en el conducto destruye el tapón que obtura el conducto) y Pliniano (a conducto abierto)

Los depósitos plinianos de proyección aérea presentan una gran dispersión y suelen ser muy homogéneos. Las cenizas alcanzan la estratósfera, pudiendo constituir masas o nubes que giran durante años en torno a la Tierra.

El nivel de fragmentación en el conducto es más profundo en las explosiones plinianas, cuya columna eruptiva también es mucho mayor pudiendo alcanzar más de 30 Km de altura.

Las erupciones plinianas son las erupciones magmáticas más violentas, estando asociadas en general a magmas calcoalcalinos y alcalinos diferenciados.

La energía de las erupciones vulcanianas es menor y suelen terminar con la emisión de lavas muy viscosas, empobrecidas en gases. En realidad la mayoría de estas erupciones violentas se inician con gases vulcanianos y si el volumen de magma es suficiente, continúan con fases plinianas de distinta intensidad, que a veces culminan con la formación de grandes calderas.

1.8.2. Evaluación de la amenaza

La información sobre las áreas de impacto directo o áreas de amenaza, se obtendrán del análisis histórico de ocurrencia de eventos; éstas son aquellas que pueden quedar cubiertas con lava o las afectadas por lluvias ácidas y cenizas, así como los cursos de agua afectados por los mismos materiales.

La amenaza volcánica como fenómeno físico no es en sí lo que determina el impacto a una población. Es la actividad humana y su relación con el entorno físico, lo que realmente determina este impacto. Por estos motivos, una estrategia de prevención del riesgo volcánico es necesaria. Dentro de las actividades a considerar están las siguientes.

- Evaluación de los posibles efectos de los productos volcánicos en las rutas de transporte, sistemas de comunicación, almacenamientos de agua y otras facilidades críticas.
- Evaluación detallada de planes para futuros usos del suelo y desarrollos estructurales cercanos a los centros volcánicos.
- Instalación de sistemas adecuados de monitoreo en los volcanes más activos y con el potencial de producir daños importantes a las poblaciones cercanas.
- Elaboración de los mapas de riesgos volcánicos.
- Establecimiento de planes para limitar el acceso a zonas con alto riesgo, en caso de una inminente erupción y de planes de evacuación para estas áreas.
- Desarrollo de sistemas de comunicación durante la emergencia, para prevenir e informar a la población.
- Preparación de folletos describiendo los planes oficiales y procedimientos ante erupciones volcánicas.

2. ASPECTOS IMPORTANTES DEL MUNICIPIO DE CUILAPA

2.1. Descripción del área de estudio

Se presentan a continuación los aspectos más relevantes del municipio de Cuilapa. Se tomó solamente el área urbana como área de estudio debido a que se concentra en ella el mayor número de habitantes, así como edificaciones de importancia.

El municipio de Cuilapa se localiza directamente al sur de Nueva Santa Rosa, en las coordenadas geográficas: Lat. 14°10' a 14°28' N y longitud 90°15' a 90°30' W limita al norte, con los municipios de Nueva Santa Rosa y Casillas del mismo departamento. Al oriente con Oratorio, Santa Rosa y San José Acatempa, Jutiapa; al sur con Santa María Ixhuatán y Santa Cruz Chiquimulilla, Santa Rosa; al poniente con Pueblo Nuevo Viñas y Barberena, también de Santa Rosa. Tiene una elevación sobre el nivel del mar de 893.31 m, un área de 365 km² y 31,267 habitantes según datos de SEGEPLAN para el año 2003.

Su aspecto físico generalmente es quebrado, con partes pedregosas y arenosas, abundan lomas y depresiones, existen algunas planicies que no llegan a constituir grandes valles. La división territorial y administrativa, es como a continuación se describe.

La cabecera departamental de Cuilapa, tiene diez aldeas, veinticinco caseríos y ochenta y seis fincas; a la cabecera departamental y a todo el municipio se le conoce con el nombre de Cuilapa.

2.1.1 Orografía y climatología

El municipio tiene algunas partes montañosas y elevadas, donde se encuentran las aldeas Los Matochos y Guacamayas, también las fincas El Zapote, La Sonrisa, Rodeo Alto y La Concepción.

- Cerro de la Cruz, está situado en la parte oriente a la orilla de la población, cubierto con pastos y algunas partes con cultivos de maíz, constituido primordialmente por material volcánico.

El clima es generalmente templado. La época seca se presenta entre los meses de marzo y abril. La precipitación anual en el año 2003 fue de 1,763.9 mm y la temperatura promedio de 24.8 °C.

2.1.2. Hidrografía

- Río Los Esclavos, el municipio de Cuilapa es atravesado por el río Los Esclavos a escasos cuatro kilómetros de la cabecera.
- Río Cuilapa
- Río Amapa
- Río Zacuapa
- Río La presa
- Río El Zapatero
- Río El Molino

2.1.3. Vías de comunicación

Las principales carreteras que atraviesan el municipio son la interamericana CA-1, la ruta nacional 16, así como caminos vecinales que unen a sus poblados entre sí con los municipios y departamentos vecinos.

2.1.4. Actividades económicas

- Agricultura la principal actividad es agrícola, los principales cultivos son: café, maíz, frijol, caña de azúcar, maicillo, frutas y otros.
- Industria: fábrica de ladrillos y blocks
- Comercio: hospedajes, restaurantes e importación de productos agrícolas hacia la ciudad capital.

El departamento de Santa Rosa con sus ríos se presenta en la figura 3, donde se ubica el río Los Esclavos, se localiza el municipio de Cuilapa.

2.2 Geología

A continuación se describen las características geológicas de la zona de estudio, las unidades litológicas y las estructuras geológicas que se refieren a las fallas que se localizan dentro de la ciudad de Cuilapa.

2.2.1. Unidades litológicas

Las unidades del terciario más antiguas son plutónicas, entre las que se encuentra el granito (Tg) y entre las más jóvenes están las andesitas (Ta). Entre las unidades del cuaternario están: basaltos sin dividir (Qbl), aluvión (Qal), lahares (Ql), basalto los Esclavos (Qble), así como una formación de conos cineríticos (Qcc). Ver figura 4.

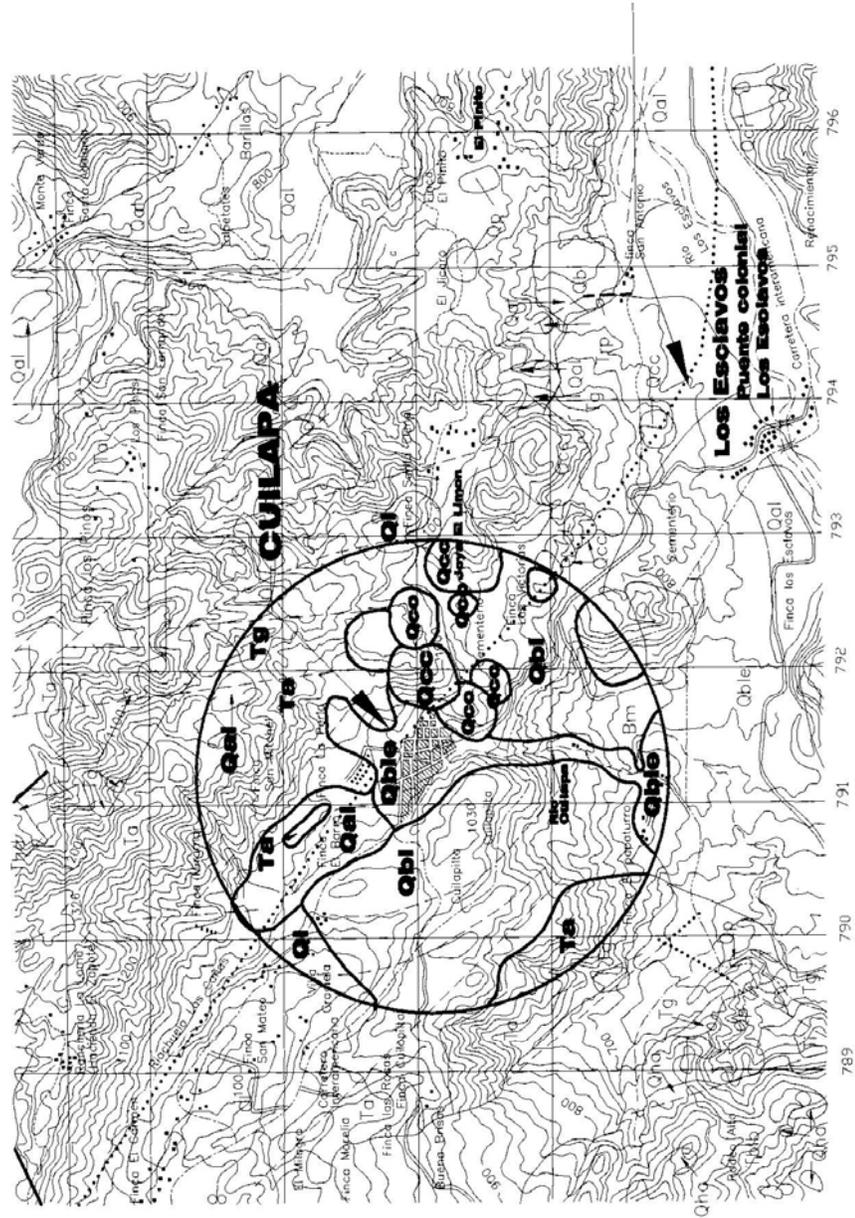
2.2.2. Estructuras geológicas

En el área de estudio se localizan las siguientes fallas geológicas:

- La falla de Jalpatagua en el área de estudio tiene una orientación N16°W de movimiento lateral derecho, además hay un sistema de fallas transversales de orientación N6°W preferencialmente con movimiento lateral izquierdo. Ver figura 4.
- Una serie de conos cineríticos alineados con orientación N18°W paralelos a la falla de Jalpatagua que atraviesa la ciudad de Cuilapa.

El mapa geológico de Cuilapa puede observarse en la figura 4.

Mapa geológico del municipio de Cuilapa



FUENTE: Fragmento del mapa geológico del cuadrángulo de Cuilapa I.G.N. Escala: 1:50,000

3. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA EN EL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Metodología para la evaluación de la amenaza sísmica

Se utilizará una metodología que consta de 4 pasos, los cuales se detallan a continuación.

- Identificación y delimitación de las fuentes sísmicas
- Determinación de la actividad sísmica de las fuentes
- Establecimiento de una relación de atenuación
- Integración de los efectos en el sitio de estudio

3.1.1. Identificación y delimitación de las fuentes sísmicas

Los tres tipos principales de fuentes sísmicas a considerar son los siguientes.

- Zonas de fuentes sísmicas (fuentes areales):** se dan en los casos donde una porción considerable de área (zona) experimenta actividad sísmica, la cual no puede ser atribuida a una estructura geológica específica y definida.
- Fallas específicas (fuentes lineales):** se da en los casos donde hay información sísmica y suficiente evidencia geológica que garantiza la existencia de fallas activas.

- c. Fuentes puntuales:** se consideran como fuentes puntuales aquellas donde la relación de la distancia de la fuente al sitio, comparada con las dimensiones de la falla, es muy grande o cuando se tiene una gran concentración de terremotos en un área muy pequeña.

3.1.1.1. Fallas específicas

En este capítulo se hace un resumen del estudio realizado por Federico Guillermo Chavarría Palacios titulado Análisis de Amenaza Sísmica en el Departamento de Santa Rosa, en el año 1999, haciendo énfasis en la cabecera departamental. Las gráficas fueron editadas de dicha tesis.

Los sistemas de fallas que están identificados geológica y sísmicamente activos y que tienen algún efecto amenazante en el departamento de Santa Rosa, donde se encuentra el área de estudio son los siguientes.

- Falla 1.** Sistema Chixoy – Polochic
- Falla 2.** Sistema Motagua
- Falla 3.** Sistema Jalpatagua
- Falla 4.** Sistema Mixco
- Falla 5.** Sistema Santa Catarina Pinula

3.1.2. Determinación de la actividad sísmica de las fuentes

La actividad sísmica, se evalúa en términos del número de eventos sísmicos y la frecuencia de ocurrencia de sus correspondientes magnitudes que pueden ocurrir en la fuente en una unidad de tiempo. La determinación de la actividad sísmica se basa generalmente en los registros históricos e instrumentales de los sismos. Para la evaluación de la actividad sísmica hay que examinar los eventos y utilizar sólo la parte más reciente del registro.

3.1.2.1. Determinación de modelos de recurrencia y ocurrencia temporal de los sismos

Para cada fuente sísmica, se evalúa un modelo de recurrencia de eventos y un modelo de ocurrencia temporal de los mismos.

Para el modelo de recurrencia de los sismos se utiliza la relación frecuencia-magnitud de Richter y para el modelo de ocurrencia temporal, se usa el proceso estocástico de Poisson.

3.1.2.2. Modelo de recurrencia de los sismos

Para cada fuente sísmica se estima la tasa de ocurrencia de eventos sobre un nivel de umbral, usando la frecuencia observada de sismos. Para este efecto, se utilizan las relaciones de frecuencia magnitud, que correlacionan la frecuencia de ocurrencia de los temblores con sus magnitudes; tales relaciones también se conocen como relaciones de recurrencia.

A partir de estas relaciones, se puede evaluar el intervalo de tiempo promedio entre temblores de determinadas magnitudes.

Las frecuencias pueden ser presentadas como valores únicos, como valores de frecuencia acumulativa.

Estas relaciones acumulativas indican si un terremoto excede un determinado valor de magnitud y no si está en un cierto intervalo de magnitud; consecuentemente, pueden ser utilizadas para los análisis de riesgo sísmico donde el enfoque es evaluar pérdidas que generan sismos de una determinada magnitud o mayores.

En general, las observaciones presentan una distribución exponencial para la frecuencia única.

$$N = a \exp (-\beta M)$$

Donde:

N = número de eventos.

M= Magnitud.

a= es una medida, del número de eventos sobre una magnitud dada.

β = es una medida de la severidad sísmica.

Esta expresión procede de la clásica relación presentada por Richter:

$$\log (N) = a - bM$$

Donde:

N = es el número de terremotos observados durante T años en el intervalo de magnitudes seleccionado

a y b = son constantes a determinar

M = magnitud

El coeficiente “a” representa el logaritmo del número total de temblores que tienen una magnitud mayor o igual a cero. El coeficiente “b”, es un parámetro de gran importancia ya que es reflejo de las condiciones físicas de una región sísmica determinada. Un alto valor de “b”, indica una proporción relativamente alta de bajas magnitudes. Una evaluación precisa de “b”, es requisito para la calidad de los resultados de un análisis de amenaza.

Si los datos de las fuentes individuales en una región son escasos, el valor de “b”, en la ecuación anterior, se determina considerando los datos de varias o todas las fuentes sísmicas de regímenes sísmicos similares y que pertenecen a una región sismo tectónicamente homogénea y bien delimitada.

Se ha observado que la relación lineal de Gutenberg y Richter no se ajusta a la distribución de magnitudes en el rango de altas y bajas magnitudes, por lo que diversos investigadores proponen modificar la relación truncándola en el límite inferior y superior. Esto es debido a que no siempre se pueden registrar los sismos muy pequeños (por falta de sensibilidad o existencia misma del equipo sismológico) y los registros de los mismos de gran magnitud son, por lo general, escasos debido a sus grandes períodos de recurrencia.

Se propone como límite inferior un valor tal que, terremotos de magnitudes más pequeñas que la especificada, ocasionen un daño potencialmente despreciable y de esa manera puedan ser descartados, para efectos de diseño de ingeniería. El límite superior se propone sobre la base de la suposición de la existencia de un valor de magnitud máxima regional finita. Dicho valor puede ser establecido utilizando información geológica o del registro sísmico histórico.

Hay que estimar una tasa de recurrencia de eventos sísmicos sobre un nivel de umbral, usando la frecuencia observada por los sismos. Para el departamento de Santa Rosa los datos se obtuvieron del Ing. Mario Villagrán (Problems Related to Seismic Hazard in Central America, June 1995) el cual realizó un estudio de la historia sísmica registrada en Guatemala.

3.1.2.3. Modelo de ocurrencia

El modelo de ocurrencia utilizado para este trabajo es el modelo Poissoniano de la distribución de sismos con respecto al tiempo. Las zonas de fuentes sísmicas areales, así como las fallas, fuentes sísmicas lineales se basan en la estadística instrumental de sismos disponible.

El modelo de Poisson exige que las siguientes suposiciones sean válidas para los sismos.

- Los eventos son independientes espacialmente
- Los eventos son independientes temporalmente (en el tiempo)
- La probabilidad de que dos eventos sísmicos tengan lugar al mismo tiempo y en el mismo lugar es casi cero

3.1.2.4. Establecimiento de una relación de atenuación

La relación de atenuación escogida para el cálculo probabilístico de la amenaza sísmica utilizada en el estudio de Chavarría, es la desarrollada por Climent et. al., 1994, quien aplicando un método de regresión Bayesiano de los registros de movimiento fuerte del terreno de El Salvador, Costa Rica y Nicaragua, con algunos registros adicionales de Guerrero, México, obtuvo dicha

relación, que actualmente es la más reciente y única obtenida con datos de la región centroamericana.

Relación de atenuación de Climent et al., 1994 propuesta para Centroamérica:

$$\ln A = C_1 + C_2 M + C_3 \ln R_h + C_4 R_h + C_5 S + \ln \varepsilon$$

A = Máxima aceleración del terreno en (m/s^2)

M = magnitud del momento sísmico

R_h = distancia hipocentral

S = factor de suelo (0 para sitios rocosos y 1 para sitios con suelo)

ε = término de la distribución normal del error (δ)

C₁, C₂, C₃, C₄ Y C₅ = Constantes

3.1.3. Integración de los efectos en el área de estudio

La integración de los efectos en el área de estudio –Departamento de Santa Rosa- comprende: identificación y delimitación de las fuentes sísmicas (fallas areales, lineales, oblicuas, puntuales, etc.) determinación de la actividad sísmica de las fuentes (base de datos sísmicos y determinación del modelo de recurrencia), ocurrencia de los sismos (modelo de distribución probabilística: Bayesianos, Poissonianos, Marcovianos, etc.) y el establecimiento de una relación de atenuación (movimiento fuerte del terreno) y la utilización del modelo de programación NPRISK.

La figura 5 describe los pasos que involucra el cálculo de la amenaza sísmica.

3.2. Presentación de los resultados

Se muestran los resultados de la integración de todos los efectos sísmicos en el sitio de estudio, se presenta solamente un punto para ilustrar los resultados de salida del programa NPRISK. El punto escogido, es el más cercano a la cabecera departamental, Cuilapa, el cual se considera el más representativo de todos, ya que cercano a él también se encuentran otras ciudades importantes del departamento, así como infraestructura valiosa para el país.

Se presenta la gráfica semilogarítmica (ver figura 6) y el resumen de resultados (tabla I), los que ilustran de mejor manera los datos de salida del programa.

Figura 6. Resultados del municipio de Cuilapa

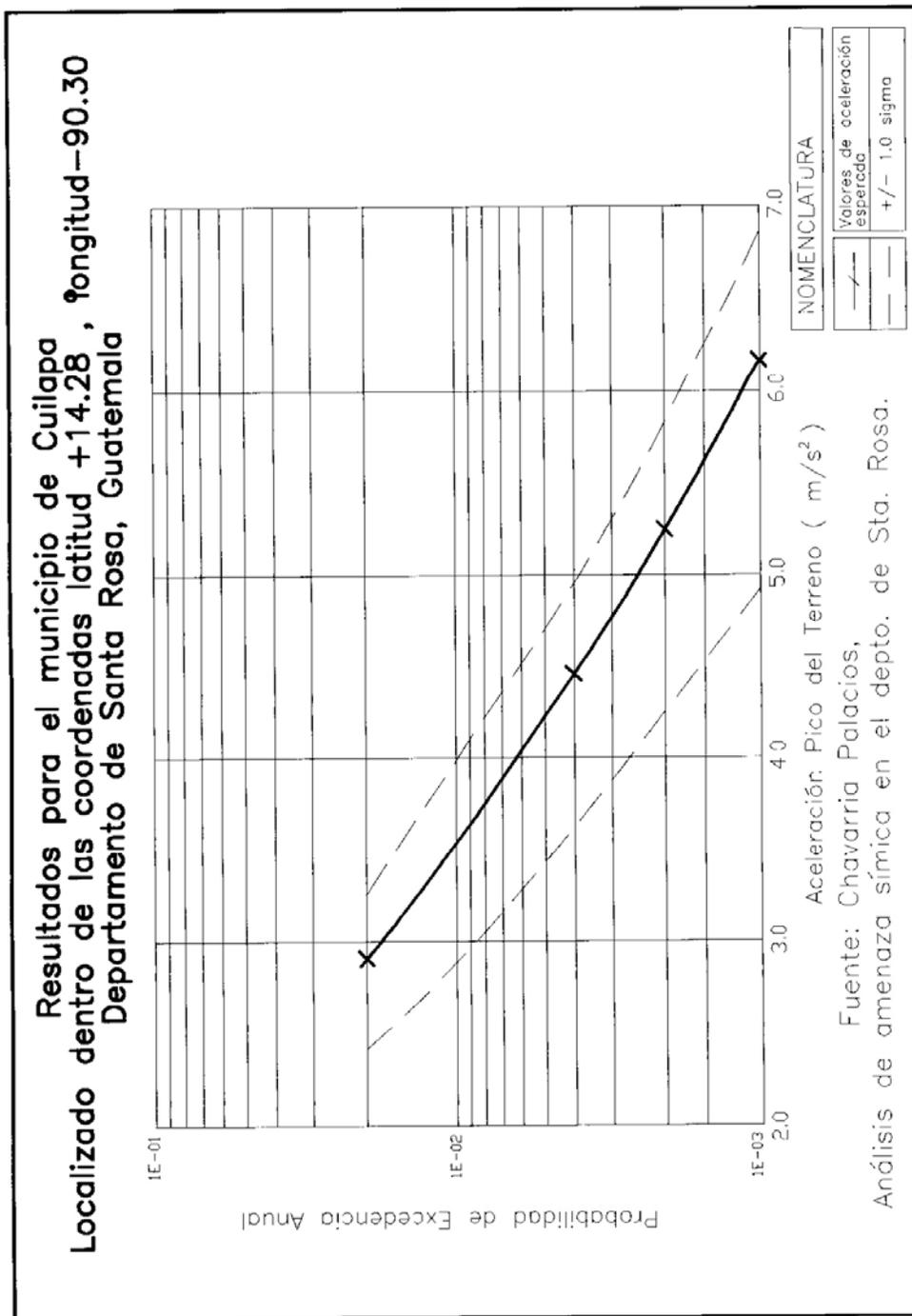
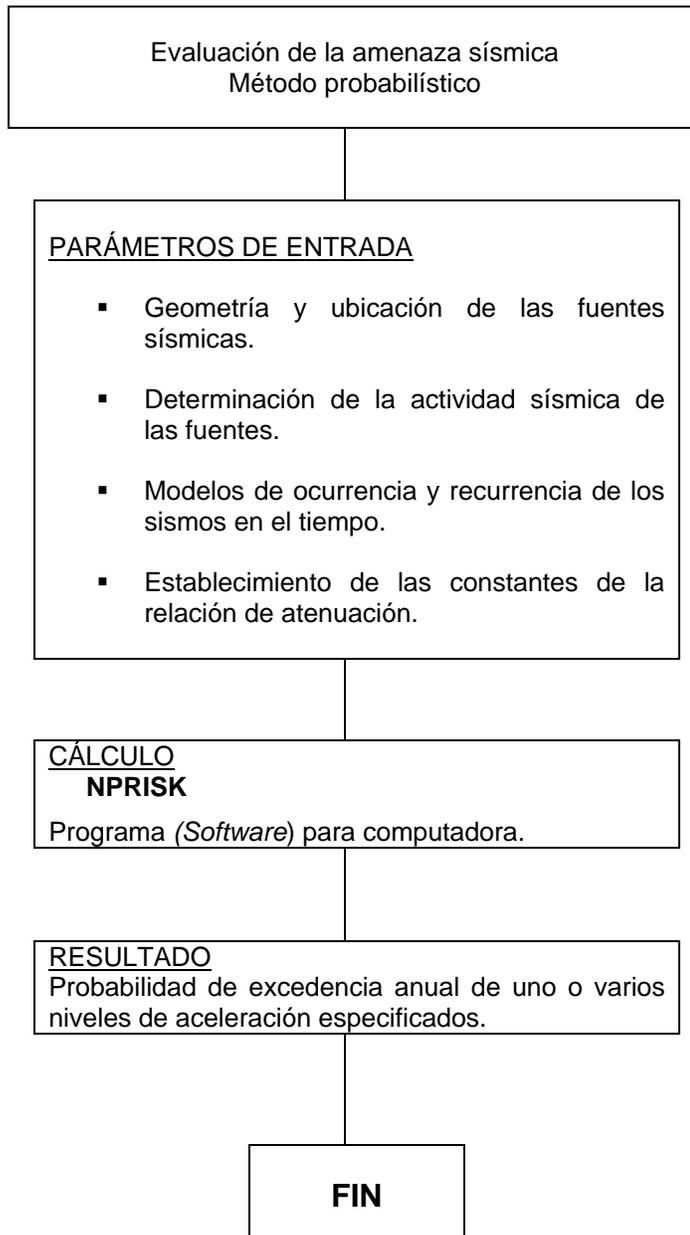


Figura 5. Secuencia de los pasos que involucra el cálculo de la amenaza sísmica.



RESUMEN DE RESULTADO DEL ARCHIVO DE SALIDA DEL PROGRAMA
NPRISK

Tabla I. Resumen de resultados

"P" Probabilidad de Excedencia Anual	0.020	0.010	0.004	0.002	0.001
"T" Período de retorno en años	50	100	250	500	1,000
"PGA" Aceleración máxima del terreno (m/s ²)	2.9012	3.52	4.4533	5.2389	6.1630

3.2.1. Propuesta de aceleración de diseño

Después de obtener los resultados finales del programa NPRISK, se pretende establecer una aceleración de diseño para el área del departamento de Santa Rosa, la cual esté basada en los resultados más puntuales que se obtienen de una evaluación para un área restringida geográficamente, a un departamento o a una región específica, y no en general para toda la república de Guatemala.

Basados en las normas estructurales de diseño y construcción recomendadas para la república de Guatemala, publicada por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES) que en relación para sismos de diseño estructural dice así: para efectos de estas normas, se especifica los sismos para diseño estructural por medio de espectros de respuesta sísmica simplificados, llamados **espectros de diseño**. Los sismos de diseño se denominan aquí **básicos, frecuentes y extremo**. Por ser el sismo básico, el de aplicación y uso general, es este criterio el que se utiliza en este trabajo para establecer la aceleración de diseño.

3.2.2. El sismo básico de diseño

Se define como un sismo que tiene un 90% de probabilidad de no ser excedido en un período de 50 años.

Con el sismo básico de diseño se establece primero, la aceleración máxima del terreno (PGA) que provocaría dicho sismo y luego una aceleración máxima efectiva (A_0), la cual se utiliza para establecer el espectro básico de diseño. La aceleración máxima efectiva (A_0) intenta representar al conjunto de pulsos grandes de un sismo. No hay un acuerdo general sobre cuanto deba ser la reducción, pero generalmente se utilizan valores de entre 70% y 90% de la aceleración pico del terreno o sea entre 0.70 y 0.90 del PGA.

Las normas estructurales de diseño y construcción, entre sus comentarios hacen notar que la aceleración efectiva (A_0) escogida para las zonas 4.1 4.2 del mapa de macrozonificación sísmica de Guatemala (ver figura 7) con índice de sismicidad $I_0=4$, es de 0.30g, el cual es ciertamente bajo, según resultados de estudios recientes de sismicidad, por lo que se recomienda incrementarlo en un 15%, lo cual significaría aproximadamente una aceleración máxima efectiva (A_0) de 3.4335 m/s^2 o sea 0.35g.

Figura 7. Mapa de macrozonificación sísmica.

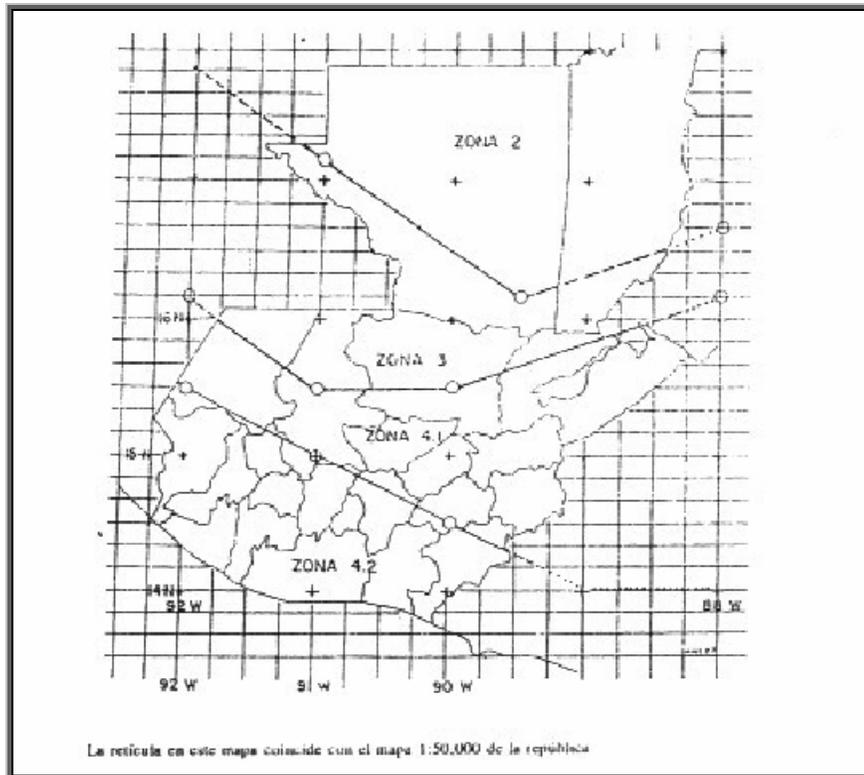


Tabla II: Índice de sismicidad y aceleración efectiva según zona.

ZONA	I_0	A_0	OBSERVACIONES
2	2	0.10 g	Cuando sea necesario interpolarse, hacerlo sobre líneas norte – sur.
3	3	0.10 a 0.30 g	
4.1	4	0.30 g	
4.2	4	0.30 g	

Siguiendo el concepto del sismo básico de diseño, se presenta el siguiente cuadro donde se calcula que las aceleraciones máximas del terreno PGA, obtenidas en la sección anterior, tengan una probabilidad del 90% de no ser excedidas en 50 años. Utilizando la ecuación: $q = 1 - e^{(-L/T)}$.

Tabla III Tabla que muestra la probabilidad de no excedencia en 50 años.

"P" Probabilidad de excedencia anual	0.020	0.010	0.004	0.002	0.001
"T" Período de retorno en años	50	100	250	500	1,000
"PGA" Aceleración máxima del terreno (m/s ²)	2.9012	3.52	4.4533	5.2389	6.1630
Probabilidad de no-excedencia en %	37 %	61%	82%	90 %	95 %

Al obtenerse los resultados de la tabla anterior, se puede observar que el resultado que interesa en términos de concepto básico de diseño es la aceleración máxima del terreno (PGA) de 5.2389 m/s², la cual tiene un período de retorno de 500 años y una probabilidad de no ser excedida en 50 años del 90%, por lo tanto, el sismo básico de diseño es aquel sismo que provocaría dicha aceleración máxima.

Por otro lado, para poder aplicar la función del espectro de diseño recomendado por las normas estructurales de diseño y construcción para la república de Guatemala, hay que establecer una aceleración efectiva (A_o), la cual es una fracción de la aceleración máxima del terreno, como ya se mencionó, está entre 0.70 y 0.90 del PGA y por no haber un criterio definido con relación a cuanto debe ser la reducción, se tomará el promedio del intervalo de reducción o sea 0.80 PGA. Por lo tanto, la aceleración efectiva (A_o) para el departamento de Santa Rosa sería 0.80*(5.2389)= 4.1911 m/s², lo que equivale aproximadamente al 43% de la gravedad o 0.43 g.

Para el diseño estructural sismorresistente se propone una aceleración efectiva (A_0) de cuando menos **0.40g**, para toda la extensión territorial del departamento de Santa Rosa.

4. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN EL ÁREA DE ESTUDIO

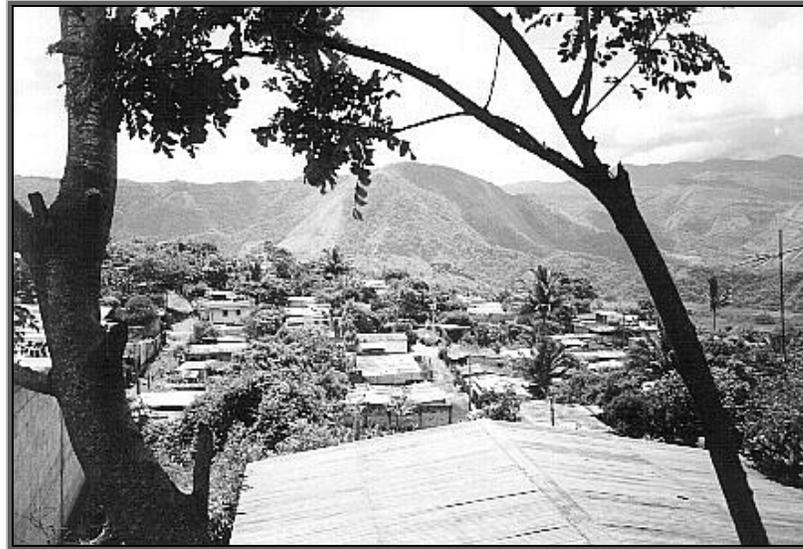
En el siguiente capítulo se hace un análisis de los parámetros que pueden ocasionar algún tipo de movimiento de masas de suelo o roca, dentro de la ciudad de Cuilapa.

4.1. Descripción de lugar

Dentro de la ciudad de Cuilapa se formaron pequeños conos de escoria volcánica, llamados conos cineríticos, que se estima fueron producto de ascenso de magma; es decir, un vulcanismo de tipo monogenético, cuya actividad no fue más allá de unos meses o días, por lo que en la mayoría de los casos, no es necesario hacer un estudio de sus erupciones, a efectos de su prevención.

Los conos cineríticos son volcanes simples que están constituidos por burbujas de lava congelada, expulsada a través de una simple abertura. Con la presión del gas, la lava es lanzada violentamente al espacio donde se solidifica y precipita como ceniza alrededor del cráter para formar un cono circular y oval como si fuera un montículo de arena o grava. En la figura 8, se puede apreciar la vista de uno de estos conos sin habitar, la depresión que se observa hacia la derecha indica que han ocurrido deslizamientos anteriores.

Figura 8. Vista de uno de los conos cineríticos



Varios de estos conos están siendo habitados actualmente y se han presentado problemas de inestabilidad en algunos lugares, tal es el caso del barrio El Reducto (ver figura 9) en la que el 5 de septiembre del 2001, en horas de la madrugada de dos a tres familias perdieron sus viviendas.

Figura 9. Deslizamiento ocurrido en el barrio El Reducto



Al descubrir los problemas que dicho material presenta, se prosiguió a hacer el estudio más detallado, centrando toda la atención en ese lugar.

4.2. Factores condicionantes

4.2.1. Topografía

Para tener una idea general del sitio, se hizo un análisis de los lugares más susceptibles a partir del análisis de fotografías aéreas y del mapa topográfico.

Teniendo situada el área más vulnerable, se estimó la pendiente de la ladera a partir del trabajo de campo, dando como resultado 25° sobre la horizontal.

4.2.2. Geología del lugar

Los vecinos del lugar han hecho cortes para ubicar sus viviendas estos a su vez favorecen la inestabilidad. De unos de esos cortes se ha tomado la siguiente fotografía (figura 10) que muestra cómo se encuentra el material en condiciones naturales.

Figura 10. Fotografía en uno de los cortes de la ladera, puede observarse la composición del material en estado natural



Como se indicó anteriormente, el material geológico es escoria volcánica, para completar la información se presenta la siguiente descripción petrográfica.

Tabla IV. Descripción del material geológico

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Tipo de material	Granular
Composición	Fragmentos volcánicos escoriáceos
Color	Rojo (óxido)
Estructura	Vesicular
Tipo de roca	Roca volcánica
Nombre	Escoria volcánica

4.2.3. Características del suelo y vegetación

La capa de suelo es muy pobre y la mayor parte es hierba con algunos árboles. Todo el cono está conformado por escoria de distinta granulometría, por lo que no se analizan las características como suelo sino como roca. Cabe aclarar que en el ensayo de suelos que se realizó, se determinó que es roca sin cohesión en forma natural (como un montículo de arena apilada), por lo que para el ensayo de laboratorio no se llevó a cabo uno triaxial, sino que se determinó el ángulo de fricción interna utilizando una fórmula para rocas.

De una muestra de este material se hicieron los siguientes ensayos de laboratorio: granulometría, porcentaje de humedad, peso específico, relación de vacíos; dando los siguientes resultados.

Tabla V. Tabla que muestra los resultados de los ensayos del suelo

ENSAYOS DE MECÁNICA DE SUELOS PARA MATERIAL GRANULAR	
Tipo de material: escoria volcánica.	Fuente: conos cineríticos, barrio El Reducto.
Granulometría: % de grava 50.2 % de arena 48.6 % de limo 1.2	Condiciones de humedad: material seco en estado natural. Presentan una gran regularidad de tamaño y se comportan como material suelto.
Peso específico: 2.35 gr/cm ³	Cohesión: casi nula, material suelto en estado natural.
Porcentaje de vacíos (Cr.): 52.20%	Ángulo de fricción interna: $\phi = 37.83^\circ$

Ángulo de fricción interna: el ángulo de fricción interna en suelos se determina por medio de un ensayo triaxial, en materiales granulares se determina a través de su porcentaje de vacíos o compacidad relativa (Cr).

La relación entre ángulo de fricción interna de un suelo granular y la compacidad relativa del mismo es expresada por Meyerhof por medio de la siguiente expresión:

Para suelos granulares con menos del 5% de arena fina y limo:

$$\phi = 30 + 0.15 * Cr.$$

Cr = en porcentaje

$$Cr = 52.20 \%$$

$$\phi = 37.83^\circ$$

4.3. Factores activadores

4.3.1. Precipitación

Como puede observarse en la figura 10, todo el cono se compone por capas de escoria volcánica constituida por grano grueso y fino. El grano fino actúa como material cementante y favorece la estabilidad, pero durante la época lluviosa el agua lava este material y desestabiliza el talud.

Dentro de la colonia se encuentran construcciones formales –concreto- y sencillas –madera o lámina-, en las construcciones formales no se presenta ningún problema, la razón de esta aparente estabilidad, es que dichas viviendas funcionan como muro de contención. Donde no ocurre esto, el agua ha ido erosionando el suelo, como se observa en la figura 11, donde la tubería de drenaje ha quedado al descubierto en poco tiempo.

Figura 11. La siguiente imagen muestra como los drenajes se han ido erosionando



Figura 12. Casas-muro, barrio El Reducto



4.3.2. Registros sísmicos

Como se indicó en el capítulo 3, todo el departamento de Santa Rosa está influenciado por los sistemas de fallas: Jalpatagua, Chixoy-Polochic, Motagua, Mixco, Santa Catarina Pinula, así como la zona de subducción al sur del país.

De mayor importancia es la tectónica local, constituida por la falla de Jalpatagua y otras transversales y longitudinales que, en tiempos históricos han producido eventos sísmicos destructivos, como el terremoto del 8/3/1913 que destruyó la cabecera departamental, Cuilapa.

La traza de la falla de Jalpatagua coincide con la cadena de grupos de volcanes cineríticos que se extienden desde el borde limítrofe con El Salvador hasta la esquina sudeste del cuadrángulo de Nueva Santa Rosa y Amatitlán (Egger, 1971). Estos conos de escoria ocurren en grupos alineados de norte a sur y en conos aislados cercanos a trazas de falla. (Bohnenberger, 1968)

Por lo que la actividad sísmica de la zona puede desencadenar una serie de deslizamientos, afectando a las construcciones sencillas y formales debido a que se encuentran cimentadas sobre arena.

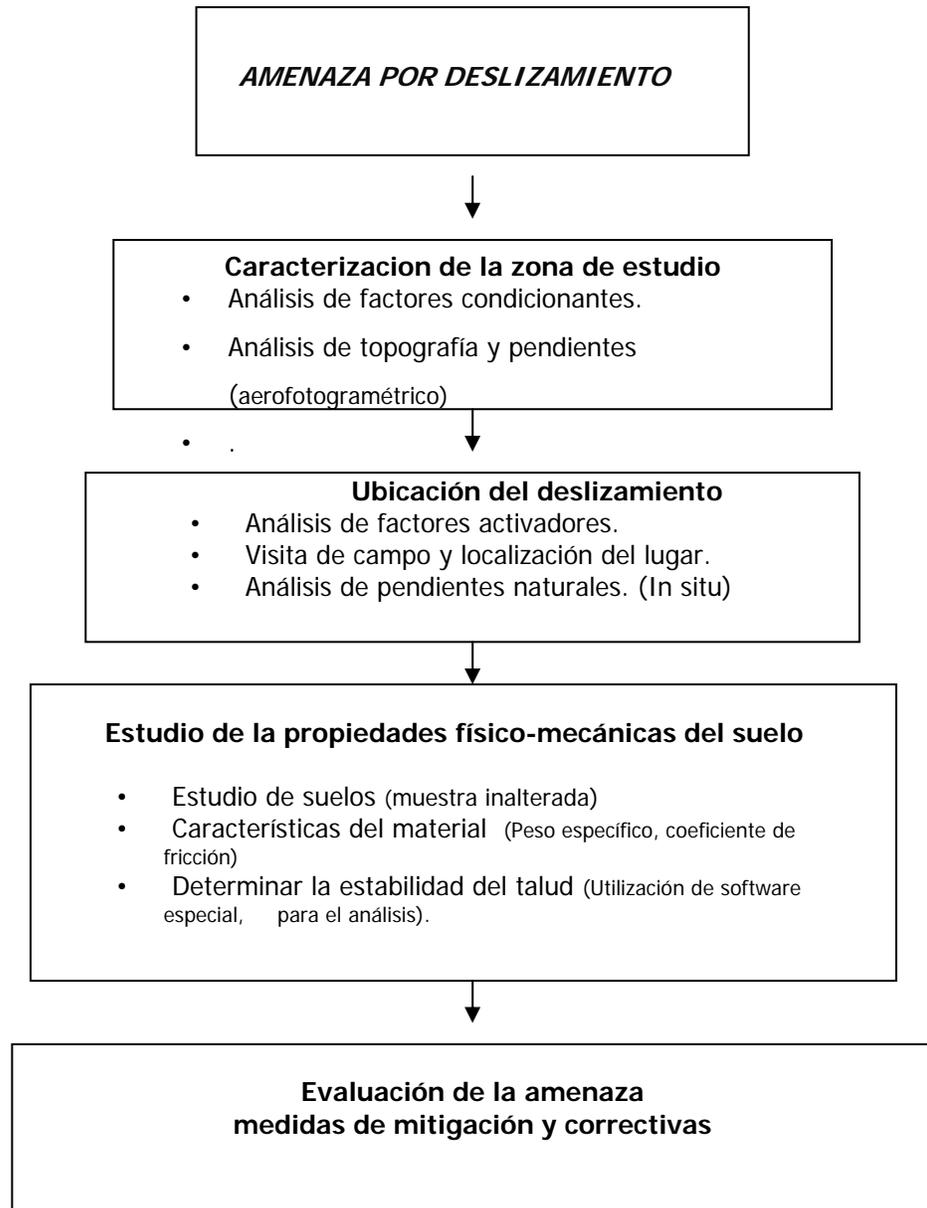
4.3.3. Actividad humana en el área de estudio

El capítulo 1 hace referencia a la inestabilidad de laderas por el hombre y se incluyeron algunos factores que desencadenan los mismos, a continuación se presentan los factores que producen inestabilidad en los conos estudiados.

- Cortes con pendientes casi verticales
- Remoción de la capa de suelo, dejando el subsuelo al descubierto y favoreciendo la erosión
- Explotación del material para agregado de concreto, provocando desestabilización en los terrenos contiguos
- Drenajes que se han ido erosionando a pasos acelerados
- Mala evacuación de aguas pluviales, no cuentan con un sistema eficiente
- Construcciones formales de concreto en lugares inadecuados, sobrecargando la ladera
- Desconocimiento de la situación de riesgo dentro de la misma población y dentro de las autoridades municipales y gubernamentales

En la siguiente figura, se presenta una secuencia de los pasos a realizar para el análisis de estabilidad de un talud o ladera, hasta ahora se ha llegado a hacer el estudio de las propiedades físico-mecánicas del material, obteniendo del laboratorio las propiedades mínimas necesarias del suelo.

Figura 13. Secuencia del análisis de amenaza por deslizamiento



4.4. Estabilidad del talud

Con la información que se obtuvo a partir del análisis de los factores condicionantes y activadores y, con los datos de laboratorio obtenidos, la siguiente etapa del estudio será la integración de los datos, para determinar la estabilidad del talud.

Los métodos de análisis conocidos actualmente son los siguientes:

Modelos matemáticos: elementos finitos y relación dinámica.

Equilibrio límite: gráfico analítico.

Los modelos matemáticos son aplicables hoy en día, a problemas de sistemas discontinuos y tridimensionales simples. Actualmente, se hace necesario el uso de programas por computadora para el cálculo de estabilidad, por lo laborioso de dichos métodos.

El análisis de equilibrio límite es el más utilizado actualmente, justamente porque un análisis no debe ser más complejo que el nivel de conocimiento del propio talud. Un análisis de equilibrio límite considera que las fuerzas que tienden a inducir ruptura son exactamente balanceadas por los esfuerzos resistentes. A fin de comparar la estabilidad de taludes en condiciones diferentes de equilibrio límite se define un factor de seguridad (FS) como la relación resultante de las fuerzas solicitantes y resistentes al deslizamiento. A una condición de equilibrio límite corresponde un factor de seguridad unitario.

$$F.S. = \frac{\text{Fuerzas resistentes}}{\text{Fuerzas actuantes}} \geq 1.2$$

Un factor de seguridad mayor que 1 indica el porcentaje de estabilidad del talud, así para $F.S. = 1.2$, éste es estable un 20% más que la resistencia mínima. Muchos autores han convenido que una $F.S. = 1.2$ es aceptable.

Con la ayuda de la subdirección de Amenazas Geoambientales del Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear de Colombia (INGEOMINAS) se determinaron los factores de seguridad para la zona de estudio.

Se utilizó el programa PCSTABL5 desarrollado en la Universidad de Purdue, el cual utiliza el método de equilibrio límite en dos dimensiones.

El cálculo del factor de seguridad se encuentra por medio de los métodos: Simplificado de Bishop (el que se fundamenta en el análisis de tajadas, utilizado para superficies de falla circulares), el simplificado de Janbú (que es utilizado para analizar la influencia que producen las condiciones de sumergencia parcial y drenado y el efecto que producen la tensión de agrietadura y la sobrecarga) y el método de Spencer (aplicable a todo tipo de superficies).

Los datos de entrada del programa son:

- Pesos unitarios del suelo en estado seco, húmedo y saturado
- Ángulo de fricción interna
- Cohesión del material

Lo que se desea saber al utilizar el PCSTABL5, es el cambio del factor de seguridad del talud con el cambio de nivel freático; por encontrarse el suelo en estado seco y suelto -en condiciones naturales- se obtuvo un solo peso unitario. A partir del dato proporcionado, se asumieron diferentes pesos unitarios que simularan la existencia de agua en el talud.

Se determinó el factor de seguridad de talud para las siguientes condiciones.

- Saturado (altura de 47 metros)
- Con nivel alto de saturación (altura de 37 metros)
- Con nivel medio de saturación (altura de 27 metros)
- Con nivel bajo (altura de 17 metros)
- Con nivel freático al pie del talud
- Talud en condición seca

Para los pesos unitarios asumidos, y con las condiciones de saturación indicadas anteriormente se obtuvieron los siguientes resultados y gráficas que indican los planos de falla, para cada situación. Se obtienen distintos planos de falla y para cada plano un factor de seguridad, indicándose el más crítico con flechas, la línea discontinua indica el nivel freático.

Tabla VI. Factores de seguridad para diferentes pesos unitarios

PESOS UNITARIOS (KN/M3)	SATURADO	NIVEL ALTO	NIVEL MEDIO	NIVEL BAJO	NIVEL DE BASE	SECO
13	0.88	1.307	1.593	1.752	1.752	1.752
15	0.88	1.309	1.583	1.752	1.752	1.752
17	0.88	1.311	1.573	1.752	1.752	1.752
20	0.88	1.313	1.561	1.734	1.752	1.752

Figura 14. Planos de falla en talud saturado para un peso unitario de 13 kN, las flechas indican el plano crítico y la línea discontinua el nivel freático

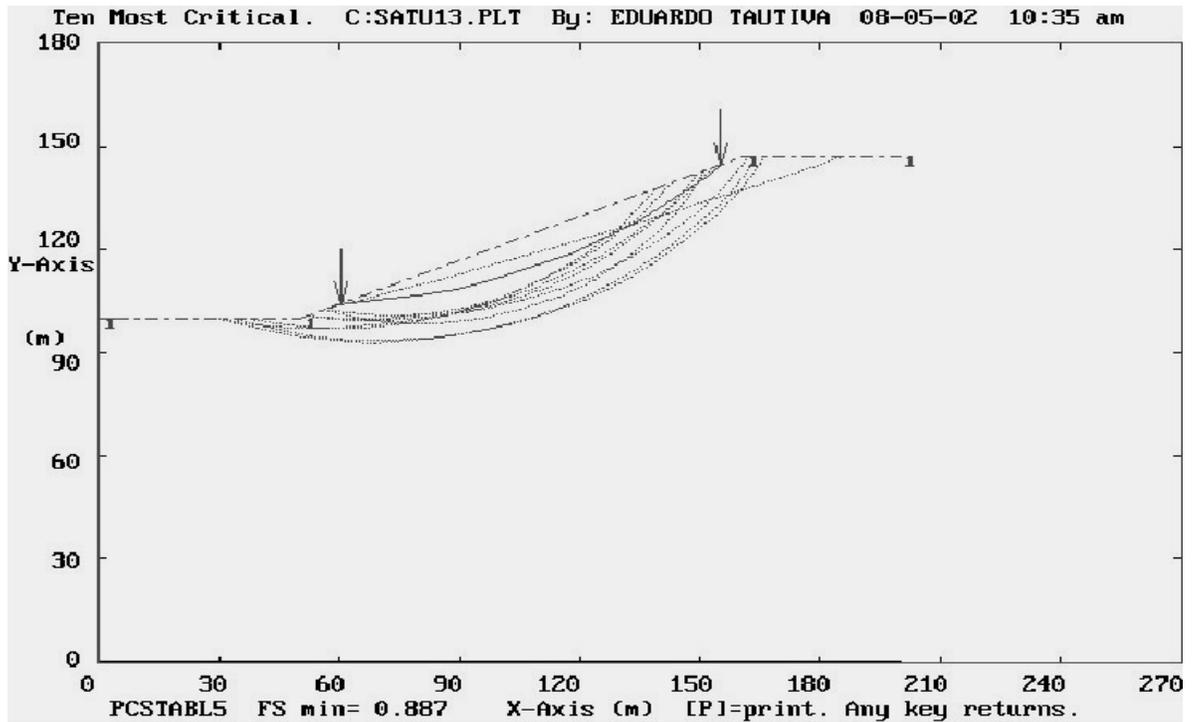


Figura 15. Planos de falla en talud con nivel freático alto para un peso unitario de 13 kN. Las flechas indican el plano crítico y la línea discontinua el nivel freático

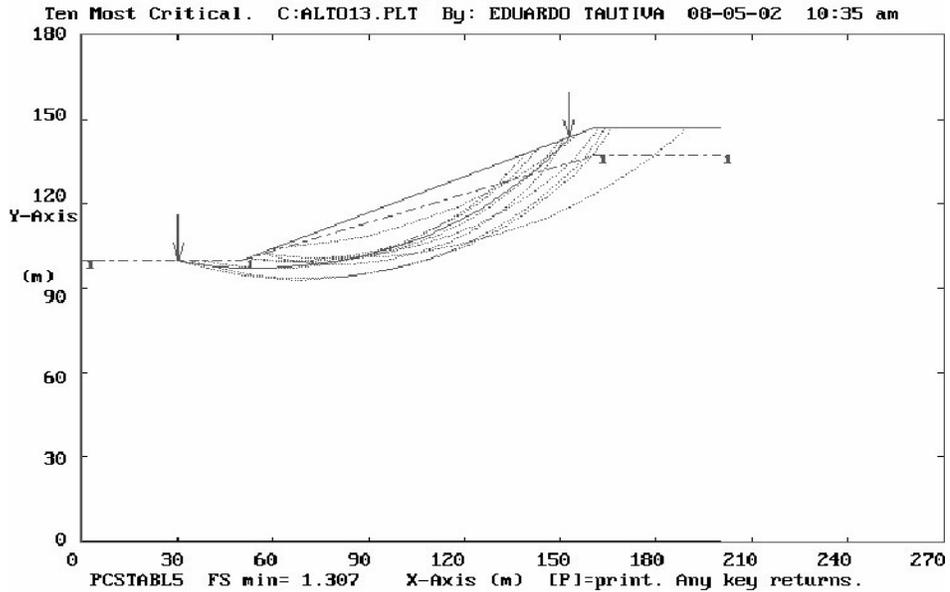


Figura 16. Planos de falla en talud con nivel freático medio para un peso unitario de 13 kN. Las flechas indican el plano crítico y la línea discontinua el nivel freático

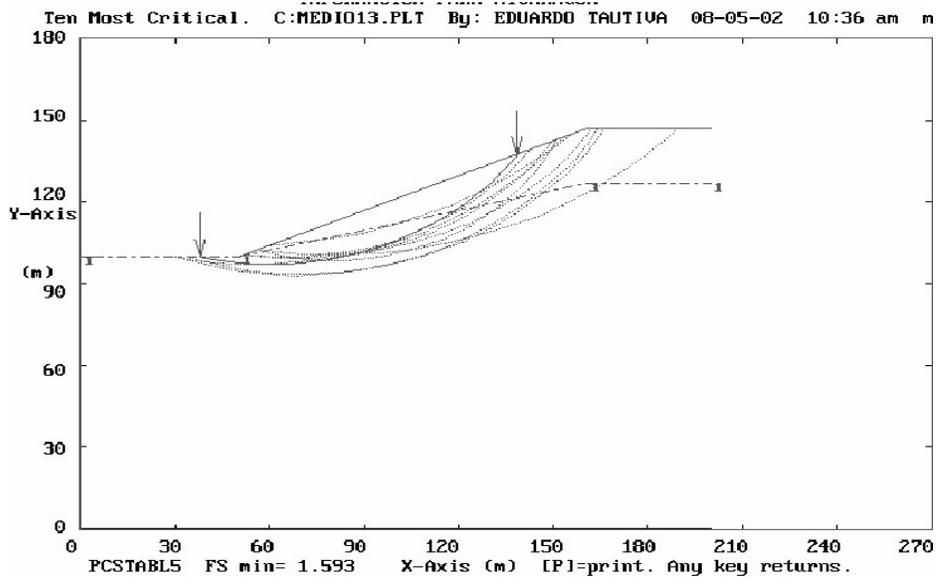


Figura 17. Planos de falla en talud con nivel freático bajo para un peso unitario de 13 kN. Las flechas indican el plano crítico y la línea discontinua el nivel freático

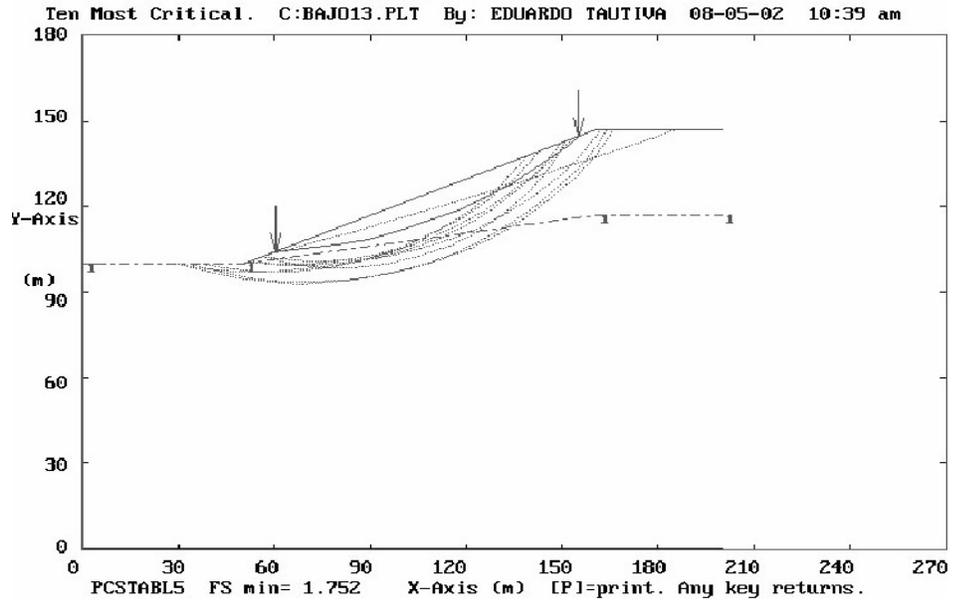
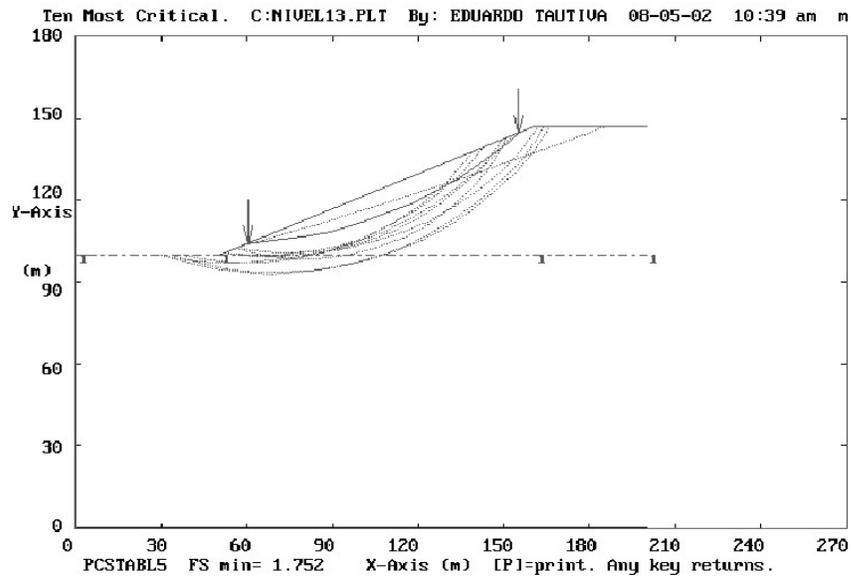


Figura 18. Planos de falla en talud con nivel freático al pie del talud para un peso unitario de 13 kN. Las flechas indican el plano crítico y la línea discontinua el nivel freático



Según los resultados del programa PCSTABL5, el talud es bastante estable F.S. 1.75 en condiciones naturales y sin factores externos. El tipo de material en la zona de estudio se considera como suelo no cohesivo –material granular-, lo que provoca que al menor esfuerzo éste tienda a deslizarse.

Los factores que hacen que se presente inestabilidad son: la ocupación del hombre que urbaniza en una zona de alto riesgo, la lluvia que erosiona el material suelto y los sismos locales que se producen con cierta frecuencia asociados a la falla de Jalpatagua.

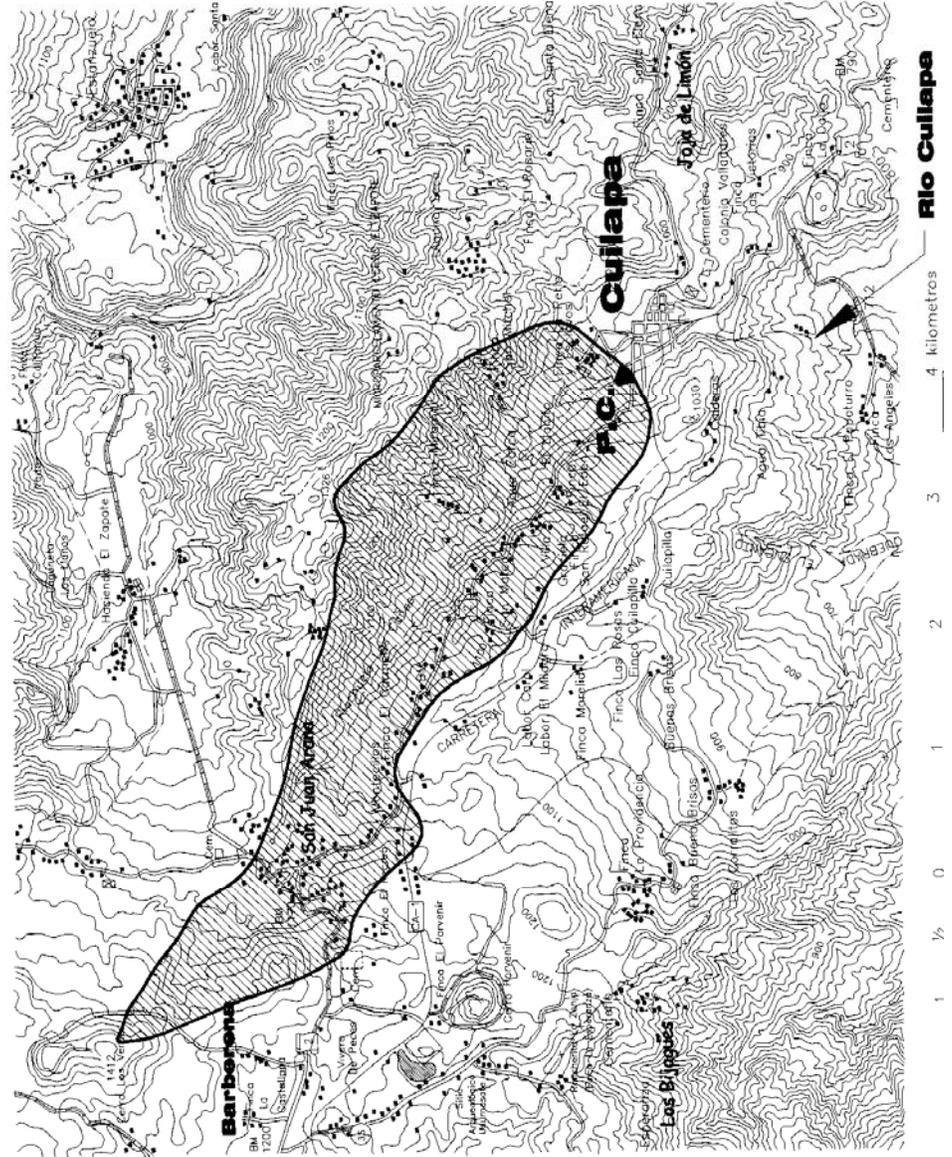
5. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO

La información contenida en este capítulo es la siguiente. Análisis de la cuenca y sus características, seguido del análisis de lluvias máximas y curvas de duración-frecuencia-intensidad (D-F-I), para finalizar con datos sobre el caudal máximo que puede esperarse para la cuenca del río Cuilapa, así como otros aspectos que se detallan a continuación.

5.1. Descripción de la cuenca

El riachuelo Las Cañas o río Cuilapa es un afluente del río Los Esclavos, la cuenca del río mide aproximadamente 6.8 km de longitud y tiene un área de 7.3 km² a partir del punto de control ubicado en las coordenadas latitud 14°16' – 14°17' y longitud 90°18'. Ver figura 19.

Cuenca del riachuelo Las Cañas o río Cuillapa.



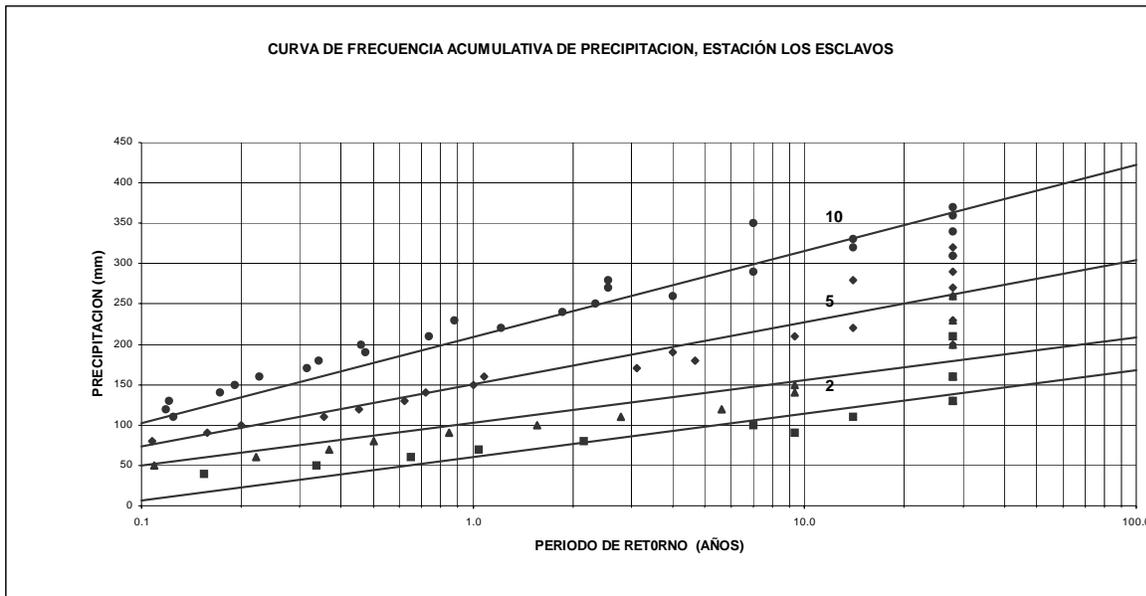
5.2. Análisis de lluvias máximas

Desde el punto de vista de la planificación para la atención de emergencias y desastres es importante la variación de las lluvias en el tiempo o determinación de los períodos de mayor incidencia y por consiguiente de mayores riesgos. Los patrones de lluvia combinados con otros factores como: características de los suelos, condiciones topográficas y geológicas, área de la cuenca etc., determinan la cantidad de lluvia que formará la escorrentía.

La estación más cercana a la ciudad de Cuilapa es la estación Los Esclavos localizada en el kilómetro 63, en las coordenadas latitud $14^{\circ}15'10''$ y longitud $90^{\circ}16'42''$.

Basándose en los datos recopilados de precipitación diaria durante los años **1969 a 2000** en la estación Los Esclavos. Se elaboró una Curva de Frecuencia Acumulativa de Precipitación (ver figura 20).

Figura 20. Curva de frecuencia acumulativa de precipitación de la estación Los Esclavos, Cuilapa, Santa Rosa



Para explicar de mejor manera las lluvias que se pueden esperar, se presenta la siguiente tabla, que contiene datos de precipitación acumulada para lluvias de 1, 2, 5 y hasta diez días con distintos períodos de retorno. Así para una lluvia de 10 días consecutivos, con período de retorno de 10 años se esperan 316 mm de precipitación.

Tabla VII. Precipitación acumulada, para periodos de retorno dados

Tr (años)	Pr (1 día) mm	Pr (2 días) mm	Pr (5 días) mm	Pr (10 días) mm
1	60	103	151	209
2	76	119	174	241
5	98	140	205	284
10	114	156	228	316
20	130	172	251	348

Los datos analizados se consideran vigentes a pesar de que sólo llegan hasta el año 2000, ya que según datos recientes del INSIVUMEH, las lluvias que se han presentado para los años 2001 a 2003, no han excedido a la de mayor valor que fue en el año 1982, el 17 de Septiembre con 209.22 mm de precipitación, y por lo tanto se encuentran dentro del rango de frecuencias ya existente.

También se ha observado que, de los datos de precipitación diaria de los años 1969 a 2003, los meses de mayor precipitación son agosto y septiembre.

Este dato es importante, ya que asociado a la lluvia se presentan problemas de deslizamientos en el área de estudio, como el deslizamiento ocurrido el 7 de septiembre del 2001 que se mencionó en el capítulo anterior.

5.3. Análisis de curvas de duración-frecuencia-intensidad

Para el cálculo de caudales con diferentes períodos de retorno y áreas tributarias menores a 1 km², se requiere de la intensidad de lluvia para diferentes duraciones utilizando el método racional. La intensidad de lluvia se obtiene a partir de las curvas de duración-intensidad-frecuencia.

Por la falta de información cercana al área en estudio, es difícil disponer de este tipo de curvas por lo que se tomaron las curvas deducidas por Rafael Alberto Zuñiga Arana en su tesis: Evaluación de la metodología para curvas de intensidad de lluvia, año 1979.

Las curvas fueron deducidas a partir de las siguientes fórmulas y su gráfica se muestra en la figura 21:

$$\text{Tr} = 1 \text{ año}; \quad i = \frac{861.45}{(t+10)^{0.75}}$$

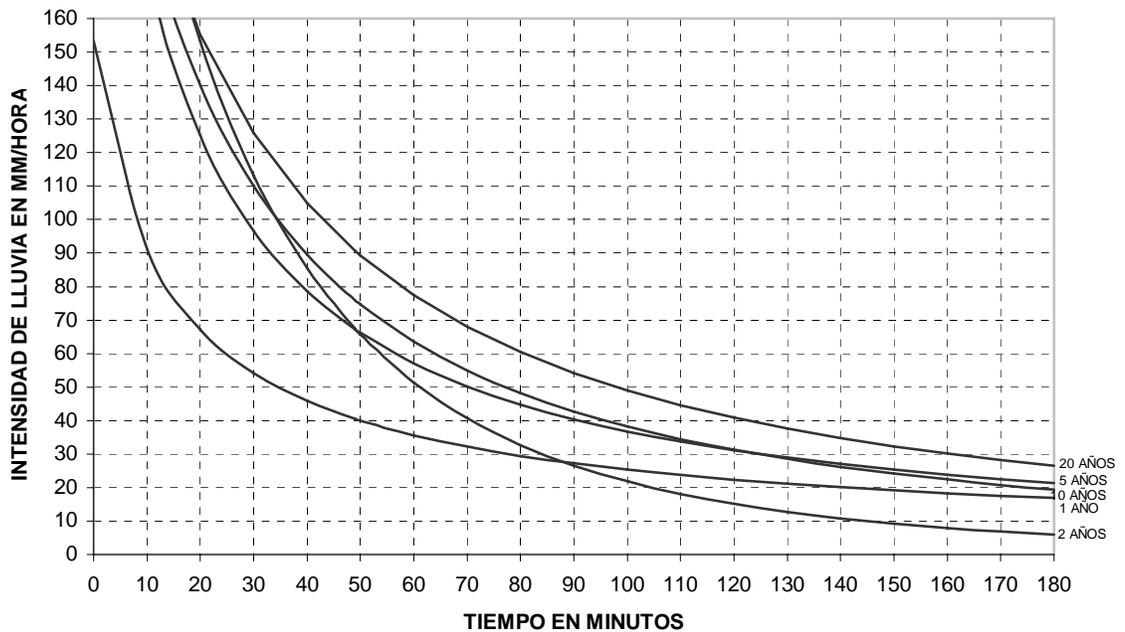
$$\text{Tr} = 2 \text{ años}; \quad i = \frac{2.8 \cdot 10^{10}}{(t+105)^{3.94}}$$

$$\text{Tr} = 5 \text{ años}; \quad i = \frac{4876.75}{(t+15)^{1.03}}$$

$$\text{Tr} = 10 \text{ años}; \quad i = \frac{46837.4}{(t+35)^{1.45}}$$

$$\text{Tr} = 20 \text{ años}; \quad i = \frac{40648.41}{(t+40)^{1.36}}$$

Figura 21. Curvas de Intensidad de lluvia para El Pino, Santa Rosa



Fuente: Tesis, Rafael Alberto Zúñiga.

Para la obtención de la intensidad por medio de las fórmulas, se hace necesario obtener el tiempo de concentración, que se obtuvo a partir de la fórmula de Kirpich, donde L es la longitud de la cuenca y S la pendiente de la misma.

$$T_c = 0.02L^{0.77}S^{-0.385}$$

El tiempo de concentración a partir de los datos de la cuenca es de 49 minutos. Con estos datos se procede al cálculo de la intensidad de lluvia para los periodos de retorno dados.

Tabla VIII. Intensidad de lluvia esperada para la estación El Pino

Años	C	I
1	0.3	40
2	0.3	67
5	0.3	67
10	0.3	76
20	0.3	91

5.4. Análisis de caudales máximos

Para obtener los caudales de crecida que se esperan en Cuilapa, se hizo un análisis comparativo entre los valores obtenidos del método racional y el método del caudal índice.

5.4.1. Disponibilidad de información

Para el estudio hidrometeorológico se utilizaron los registros de la estación Los Esclavos, ya que los datos de otras estaciones en el departamento no son representativos porque se utilizaron por poco tiempo.

5.4.2. Métodos para la obtención del caudal máximo

Los métodos para la obtención del caudal máximo que se utilizan son:

a. Método Racional: uno de los métodos empleados para la obtención de los caudales máximos de crecida fue el método racional:

$$Q_m = CIA/3.6$$

Donde:

C = coeficiente de escorrentía que está en función del relieve, suelo y uso de la tierra

I = Intensidad de la tormenta de diseño (mm/hr)

A = Área de la cuenca tributaria

El coeficiente de escorrentía está en función de la pendiente de la cuenca la cual es de 7.3 % y según los valores de coeficiente C para tierras agrícolas.

La capacidad de infiltración de las unidades litológicas que conforman la cuenca (andesita, basaltos y aluvión) se ha considerado como media y para pendientes entre 5 y 10% y tierra con pasto con capacidad media de infiltración el valor de C= 0.35.

A continuación, se muestran los valores de caudales máximos de crecida que se esperan en la zona en estudio, utilizando el método racional.

Tabla IX. Caudales esperados para el río Cuilapa, método racional

Años	C	I	A	Q (m3/s)
1	0.35	40	7.3	28
2	0.35	67	7.3	48
5	0.35	67	7.3	48
10	0.35	76	7.3	54
20	0.35	91	7.3	65

b. Método del caudal índice: el método del caudal índice consiste en determinar una relación entre los caudales máximos registrados, asociados con una probabilidad de recurrencia y parámetros morfométricos de las respectivas cuencas.

Los datos que se presentan a continuación fueron proporcionados por el ingeniero Elfego Orozco, de un estudio inédito para el río Pansalic. Las cuencas utilizadas en el análisis fueron las que drenan al océano Pacífico, dentro de las cuales se encuentra la del río Los Esclavos, del cual el río Cuilapa es un afluente.

Las fórmulas que se obtuvieron de este estudio se aplican al río Cuilapa y son los siguientes:

$$QMM = 0.32A^{1.25}$$

$$Q_{Tr} = K_{Tr} * QMM$$

Donde:

QMM = se refiere al promedio aritmético de las respectivas series de caudales anuales máximos instantáneos.

Q_{Tr} = el caudal para el período de retorno Tr

K_{Tr} = el caudal índice o estandarizado su valor se muestra en la tabla X para períodos de retorno (Tr) dados.

Para el río Cuilapa el caudal máximo medio es:

$$QMM = 3.84 \text{ m}^3/\text{s}$$

La tabla X muestra los caudales estimados con este método para el río Cuilapa.

Tabla X. Caudales esperados para el río Cuilapa, método del caudal índice

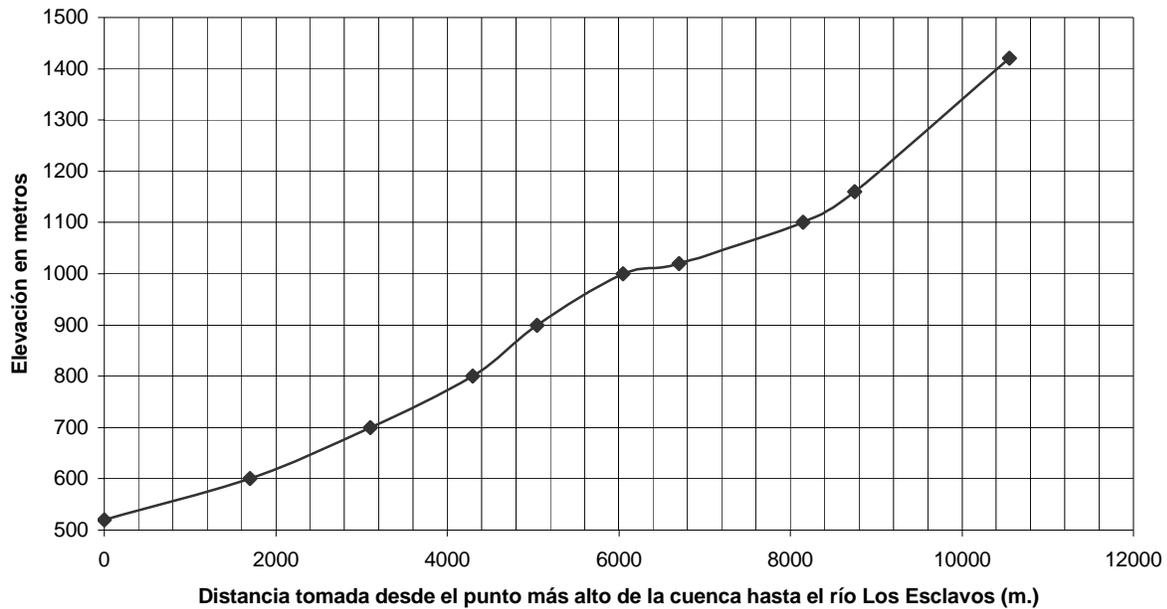
Tr	P (%)	P (%)	Ktr (-)	Qtr (m3/s)
100	1	99	5.10	20
50	2	98	4.45	17
30	3.33	96.67	4.03	15
25	4	96	3.85	15
20	5	95	3.70	14
10	10	90	3.05	12
5	20	80	2.45	9
2	50	50	1.65	6

La diferencia de caudales entre el método racional y el método del caudal índice radica en que para cuencas con un área de hasta un 1 km² es aplicable el método racional, por lo que el método de caudal índice es el más aplicable a la cuenca en estudio.

5.5. Análisis de perfil del río Cuilapa

En base al mapa topográfico del cuadrángulo de Cuilapa escala 1:50000, se estimó el perfil del río desde que nace hasta el río Los Esclavos que es donde desemboca (ver figura 22).

Figura 22. Perfil del río Cuilapa



La capacidad de una corriente, que es la cantidad de material que puede transportar bajo ciertas circunstancias dadas y la competencia, que es el tamaño máximo de la partícula que puede mover, aumentan considerablemente en la época de las inundaciones. La cantidad de material que un río puede transportar depende, entre otros factores, de la topografía de la cuenca y regularmente el material transportado se deposita aguas abajo.

El río Cuilapa desemboca en el río Los Esclavos, y por estar la ciudad asentada entre las cotas 1000 y 800, es probable que no se presenten problemas de inundación ya que la pendiente favorece que el agua circule a mayor velocidad.

Según informes de la población, no ha habido problemas de inundación en el sector, pero podría presentarse alguno de estos eventos provocado por la ocupación de las márgenes del río o el depósito de basura en el canal natural.

La siguiente fotografía está tomada a partir del punto de control de la cuenca. Fue tomada durante la época lluviosa correspondiente al año 2001, se escogió esta fecha ya que la mayor parte del tiempo, el río se encuentra seco.

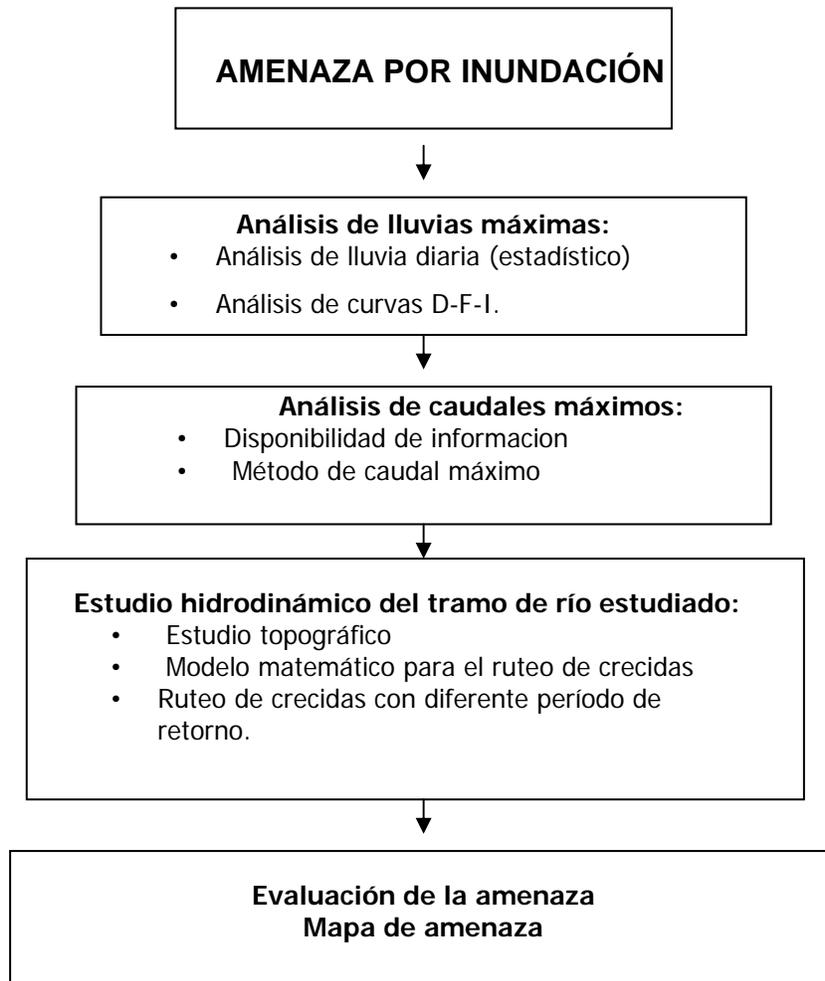
Figura 23. Vista del río Cuilapa, en el punto de control



La figura 24 muestra los pasos a seguir en un estudio de amenaza por inundación. Para el presente trabajo, sólo se llegó al análisis de caudales debido a la poca disposición de información y equipo para trabajar.

Por lo tanto, con la información que se tiene, se concluye que para el río Cuilapa el nivel de amenaza por inundación debido a los fenómenos hidrometeorológicos es baja.

Figura 24. Orden lógico de un estudio de amenaza por inundación



6. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En el presente capítulo se describen los volcanes que pueden constituir una amenaza para la ciudad de Cuilapa. Se incluye un ejemplo para la evaluación de peligrosidad volcánica aplicada al volcán Tecuamburro, utilizando el método de Yokoyama, dicho método toma en cuenta la población que podría ser afectada, así como la historia eruptiva del macizo.

6.1. Índices para la identificación de riesgo volcánico

Para la identificación del riesgo volcánico se utilizó el propuesto por Yokoyama, et al en el año 1984, que cita Paniagua Pérez en su estudio: Síntesis de algunos volcanes activos y peligrosos en América Central.

Se muestra el índice del peligrosidad del volcán Tecuamburro.

(*) Por cada respuesta “Sí” anotar 1 punto

Por cada respuesta “No” anotar 0 puntos.

AMENAZA		PUNTAJE*
1	Productos eruptivos con alto contenido de sílice (Andesita/dacita/riolita).	0
2	Mayor actividad explosiva en los últimos 500 años.	0
3	Mayor actividad explosiva últimos 5000 años.	0
4	Flujos piroclásticos últimos 500 años.	0
6	Tsunami destructivo últimos 500 años.	0
7	Área de destrucción últimos 500 años > 10 km ²	0
8	Área de destrucción últimos 50000 años > 100 km ²	0
9	Ocurrencia de frecuentes enjambres sísmicos de origen volcánico.	1
10	Ocurrencia significativa deformación del terreno dentro de los últimos 50 años.	0
Subtotal		1
VULNERABILIDAD		
1	Población en riesgo > 100	1
2	Población en riesgo > 1000	1
3	Población en riesgo > 10 000	1
4	Población en riesgo > 100 000	0
5	Población en riesgo > 1 000 000	0
6	Muertes históricas por erupciones	0
7	Evacuación como resultado de erupciones históricas.	0
Subtotal		3
Total		4

Un índice de peligrosidad cercano a 15 puntos se considera de alto riesgo, conforme disminuye de mayor a menor, así va disminuyendo el índice de peligrosidad.

El siguiente mapa (Figura 25) presenta los principales focos eruptivos cuaternarios de Guatemala, para ubicar mejor la zona de estudio y los volcanes analizados. En la figura se identifica el área de estudio por medio de un círculo y dentro de él, se pueden observar localizados algunos conos cineríticos, los cuales fueron analizados en el capítulo de deslizamientos.

6.2. Descripción de los volcanes que pueden afectar el área de estudio

La descripción de los volcanes Fuego y Pacaya se transcribe del estudio: Síntesis de algunos volcanes activos y peligrosos en América Central, realizado por Sergio Paniagua Pérez en 1,999.

6.2.1. Volcán de Fuego

- Latitud 14°29' N; longitud 90°53' O; altitud 3763 m.s.n.m.; altura 2400 m; Distancia de ciudad de Cuilapa: 72.5 km al Este.
- Tipo de actividad: erupciones violentas en la parte alta del volcán.
- Tipo de erupción: Estromboliana – Vulcaniana.
- Índice de Peligrosidad: 14 (de Yokoyama et al., 1984)
- Morfología: es un estratovolcán complejo, gemelo con el volcán de Acatenango.

6.2.1.1. Historia eruptiva

Basado principalmente en Meyer Abich, 1956, Stoiber, 1974. Rose et al, 1988. Muestra actividad ocasional desde el siglo XVI, sin embargo, se considera que es el volcán más activo de Guatemala.

Se incluyen solamente las erupciones que han afectado el área de estudio por estar dentro del radio de acción de las mismas.

Año 1717: gran erupción con lanzamiento de cenizas. Sus depósitos alcanzaron el departamento del Petén y El Salvador. La erupción duró cuatro meses.

Año 1932: fuerte erupción de cenizas acompañada de violentos terremotos, las cenizas caen hasta en El Salvador y Honduras; en ciudad de Guatemala cayeron 138 kg/m² de cenizas por hora. Se derrumbó la parte alta del cráter y se produjeron avalanchas ardientes; desde tal fecha el cráter está abierto hacia NE.

Año 1999: 21 de mayo. Fuerte erupción vulcaniana, con lanzamiento de cenizas que llegan a El Salvador y E y SE de Guatemala. Flujos piroclásticos alcanzan unos 8.5 km de distancia con dirección al E y SE del volcán, a través de las quebradas El Jute y Lajas.

6.2.1.2. Zonas de riesgo de caída de tefra

Un estudio reciente realizado por USGS del año 2001, afirma que los depósitos de caída de tefra provenientes del volcán de Fuego podrían ocurrir a distancias de hasta 100 kilómetros en dirección del viento. Con base en las erupciones históricas, los depósitos de tefra podrían tener un grosor de 5 centímetros, o más dentro de un radio de 50 kilómetros desde la fuente, 10 centímetros o más a una distancia de 25 kilómetros de la fuente y de 20 cm o más dentro de una distancia de 15 kilómetros hasta la fuente. La tefra y la ceniza –de dimensiones menores a los 2mm- puede propagarse en cualquier dirección, sin embargo, es más probable que lo haga del este al sureste en los meses de diciembre a mayo y del oeste al sureste en los meses de junio a diciembre. Las caídas de tefra de 10 a 20 cm o más pueden provocar potencialmente que los techos colapsen.

El colapso de los techos es más probable si las lluvias acompañan a la tefra, por lo que esta se encuentra húmeda. La ceniza puede filtrarse en conductos pequeños y contaminar los depósitos de agua descubiertos, también su acumulación en techos puede provocar colapso.

6.2.2. Volcán de Pacaya

- Latitud 14°23' N; longitud 90°36' O; altitud: 2552 m.s.n.m.; altura 1000 m; Pacaya está situado a 37.5 Km al oeste de la ciudad de Cuilapa
- Tipo de actividad: explosión normal de cráter central o lateral
- Tipo de erupción: estromboliana
- Índice de peligrosidad: 13 (de Yokoyama et al., 1984)
- Morfología: estratovolcán complejo con varias cúspides, posee dos conos de escorias jóvenes en su cima suroeste que han estado activos en tiempos históricos. Las anteriores estructuras se conocen como: Cerro Chino, el Inactivo y el denominado Cono Mackenney, que se encuentra activo desde 1966. A pie noroeste del volcán se extiende un complejo de cúpulas de lava.

6.2.2.1. Historia eruptiva

Basado principalmente de Matías, 1992, Kitamura & Matías, 1995, INSIVUMEH, 1995, Smithsonian Institution Bull. V.20, 1995; V22, 1997; V23 y 24, 1999.

Se incluyen solamente las erupciones que han afectado el área de estudio por estar dentro del radio de acción de las mismas.

Año 1995: 17 de septiembre, una columna de erupción freatomagmática de 1 km de altura, depositó 3 cm de fina ceniza en Santa Elena Barillas y fino polvo volcánico en Barberena y proximidades de Cuilapa.

6.2.3. Volcán Tecuamburro

- Latitud: 14°09' N; longitud 90°24' W; altitud: 1845 m.s.n.m.; altura 800 m. A una distancia de 21.25 km al sur de la ciudad de Cuilapa.
- Tipo de Actividad: no se tiene un récord de actividad.
- Índice de peligrosidad: 4 (de Yokoyama et al., 1984)
- Morfología: estrato volcán pequeño o como un gran domo endógeno y exógeno mixto.

Basándose en lo anterior, puede decirse que la amenaza volcánica no constituye uno de los mayores riesgos en la ciudad de Cuilapa, la caída de tefra y ceniza volcánica se pueden presentar proveniente de los volcanes de Fuego y Pacaya, para lo cual deberán tomarse las medidas pertinentes.

CONCLUSIONES

1. La amenaza sísmica es la que puede producir mayores daños a largo o mediano plazo en la ciudad de Cuilapa, debido a que está ubicada dentro del área de influencia de la falla de Jalpatagua, no cuenta con un reglamento de construcción que incluya la aceleración del terreno en el diseño sismorresistente, y tener el mayor número de habitantes así como infraestructura de importancia.
2. Los conos cineríticos o de escoria volcánica, habitados se consideran la amenaza geológica latente dentro de la ciudad, debido a los siguientes factores: la población que habita esta zona altamente inestable, las lluvias que lavan el material fino y erosionan las tuberías de drenaje, agua potable y los cimientos de las construcciones. Y por último, la actividad sísmica asociada a la falla de Jalpatagua que provocaría deslizamientos en los lugares más vulnerables.
3. El análisis de amenaza por inundación es el de menor impacto en la población por el clima del lugar, que hace que el río esté la mayor parte del tiempo seco y porque no se han registrado grandes avenidas. Este factor puede variar si se obstruye el cauce del río (por basura, ripio, etc.) que lo represaría durante el invierno, siendo así no sería una amenaza natural sino una amenaza inducida por el hombre.

4. La caída de ceniza volcánica provenientes de los volcanes Pacaya y Fuego pueden afectar a la población ocasionando colapso de techos por sobrecarga y contaminación del agua. Este evento dependerá del tipo de erupción de dichos volcanes, por lo que se considera de menor impacto.

5. El volcán Tecuamburro no ha presentado actividad por lo que se considera inactivo y por la distancia hacia la zona de estudio no se considera de amenaza.

RECOMENDACIONES

1. Revisión y adaptación de las normas estructurales de diseño y construcción, recomendadas para la república de Guatemala por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica –AGIES- en el año 2002 para la Ciudad de Cuilapa, con los valores de aceleración indicados.
2. Realizar una evaluación de vulnerabilidad estructural en las edificaciones de importancia, para realizar las medidas correctivas pertinentes.
3. Considerar los conos de escoria volcánica como zona no habitable, debido a su gran inestabilidad por sobrecarga, lluvia y sismos.
4. Evitar en los conos de escoria, actualmente habitados, la descarga de aguas que favorezcan la erosión del suelo y por consiguiente la inestabilidad de los mismos.
5. Proteger las márgenes del río de sedimentos que puedan represarlos.
6. Para evitar el colapso de techos, por caída de ceniza, se aconseja limpiarlos inmediatamente.
7. Informar a las autoridades y a la comunidad, de las amenazas geológicas a las que están expuestos, sus consecuencias y las medidas que pueden llevarse a cabo para disminuir su impacto negativo.

8. Promover estrategias de planificación territorial para evitar que el futuro se habiten zonas de alto riesgo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Araña, Vicente et al. **Volcanología**. Madrid: editorial Rueda, 1984.
2. Bohnenberger, Otto H. **Los focos eruptivos Cuaternarios de Guatemala**. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI). Trabajos técnicos presentados en la segunda reunión de Geólogos de América Central. Publicaciones Geológicas del ICAITI. Número II 1969.
3. Cameron, Barry I. **Melt generation and magma evolution in southeastern Guatemala**. Department of Geology and environmental Geosciences. Illinois, 1998.
4. Chavarría Palacios, Federico Guillermo. Análisis de amenaza sísmica en el departamento de Santa Rosa. Tesis Ing. Civil Guatemala, universidad de San Carlos, Facultad de ingeniería, 1999.
5. Duffield W. A. et al. **An evaluation of the geothermal potential of the Tecumburro volcano area of Guatemala**. Guatemala: 1991.
6. Espídola, J. M. **Las catástrofes geológicas**. Instituto de Geofísica, México, UNAM 1990.
7. Merritt, Frederick S. et al. **Manual del Ingeniero Civil**. Tomo III. 4ta. Edición. México: editorial Mc Graw-Hill.1999.
8. Guidicini, Guido y Nieble Carlos Manuel. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2da. Edición. Brasil: editorial Edgar Blücher Ltda. 1984.
9. Insivumeh. **Volcán Pacaya**. Folleto informativo.
10. Kirkby , M. J. y Morgan ,R. P. C. **Erosión de Suelos**. Tercera Reimpresión. México D. F. : Editorial Limusa, S.A. de C. V., 1994
11. León Chávez, Edgar Rolando. Metodología para estudios hidrogeológicos en rocas volcánicas. Tesis Ing. Civil Guatemala, universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería 1989.

12. López, Daniel José. Estudio geotécnico para la evaluación de la amenaza por deslizamiento en la colonia El Incienso y La Ruedita, zona 3 de la ciudad de Guatemala. Tesis Ing. Civil Guatemala, universidad de San Carlos, Facultad de ingeniería, 2000.
13. Muñoz Ramírez, Edgar Rolando. Algunas consideraciones sobre el vulcanismo en Guatemala. Tesis Ing. Civil Guatemala, universidad de San Carlos, Facultad de ingeniería, 1996.
14. Novelo, David. Amenaza volcánica. Web Site:
http://www.cepredeac.org/04_temas/volcan/amenaza.htm 29 -01- 04
15. Ops. **Fundamentos para la mitigación de desastres en establecimientos de salud.** Washington, 2000.
16. Ops. **Mitigación de desastres naturales en sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario.** Washington, 1998.
17. Orozco, Elfego. **Gestión holística del problema de inundaciones.** Congreso, 1999.
18. Paniagua Pérez, Sergio. **Síntesis de algunos volcanes activos y peligrosos en América Central, prevención, preparación y mitigación.** Universidad de Costa Rica, Escuela C. A. de Geología. 1999.
19. Pérez Arias, Carlos Leonel et al. **Cartografía de amenaza por deslizamientos en los barrios marginales del sur de la capital.** Guatemala, CESEM 1991.
20. Sifontes, Francis Polo. **Monografía de Cuilapa.** Editorial: Cenaltex, 1984.
21. Tul Miranda, Audulio Geremías. Diseño de canales para sistemas de drenaje agrícola. Tesis Ing. Civil Guatemala, universidad de San Carlos, Facultad de ingeniería, 1993.
22. <http://www.cne.go.cr/PALMARES.htm> 3-3-04
23. <http://www.segeplan.gob.gt> 20-9-03
24. Vallance J.W. et al. **Riesgos volcánicos en los volcanes Fuego y Acatenango, Guatemala.** Vancouver, Washington, 2001.

25. Zúñiga Arana, Rafael Alberto. Evaluación de la metodología para curvas de intensidad de lluvia. Tesis Ing. civil Guatemala, universidad de San Carlos, Facultad de ingeniería, 1979.