

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS**

The seal of the University of San Carlos of Guatemala is a circular emblem. It features a central figure of a woman in a red dress and white headpiece, holding a book. Above her is a golden crown. To the left and right are golden castles and a red lion rampant. Below the central figure is a knight on a white horse, holding a spear and a red banner. The background is a blue sky with white clouds. The seal is surrounded by a circular border containing the Latin text: "CONSPICUA CAROLINA ACADEMIA COACTEMALENSIS INTER CÆTERAS ORBIS".

**ZONIFICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ACHIGUATE – GUACALATE:
UNA PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DE CRITERIOS PARA LA REDUCCIÓN
DEL RIESGO A DESASTRES**

RAFAEL IGNACIO ANLEU FORTUNY

Guatemala, julio de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS

**ZONIFICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ACHIGUATE – GUACALATE:
UNA PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DE CRITERIOS PARA LA REDUCCIÓN
DEL RIESGO A DESASTRES**

TESIS

PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA
DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA
DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

POR

RAFAEL IGNACIO ANLEU FORTUNY

En el acto de investidura como

**INGENIERO AGRÓNOMO
EN
RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

EN EL GRADO ACADEMICO DE
LICENCIADO

Guatemala, julio 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RECTOR
Lic. CARLOS ESTUARDO GÁLVEZ BARRIOS

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO	Ing. Agr. FRANCISCO JAVIER VÁSQUEZ VÁSQUEZ
VOCAL I	Ing. Agr. WALDEMAR NUFIO REYES
VOCAL II	Ing. Agr. WALTER ARNOLDO REYES SABRIA
VOCAL III	Ing. Agr. DANILO ERNESTO DARDÓN ÁVILA
VOCAL IV	P. For. MIRNA REGINA VALIENTE
VOCAL V	Br. NERY BOANERGES GUZMÁN AQUINO
SECRETARIO	Ing. Agr. EDWIN ENRIQUE CANO MORALES

Guatemala, julio 2008

Señores
Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos

De conformidad con lo establecido en la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el agrado de someter a su consideración el trabajo de tesis titulado:

**ZONIFICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ACHIGUATE – GUACALATE:
UNA PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DE CRITERIOS PARA LA REDUCCIÓN
DEL RIESGO A DESASTRES**

Presentado como requisito previo a optar al título de Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales Renovables en el grado académico de Licenciado.

Esperando que el presente trabajo merezca su aprobación

Atentamente

Rafael Ignacio Anleu Fortuny

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Porque me diste la vida...
Mama	Por enseñarme a caminar por mi mismo...
Abue	Por enseñarme a querer y a soportar sin dejar de reir...
Juana	Por enseñarme a volar...
Bea	Por enseñarme que hay un momento para todo en la vida...
Mano	Por enseñarme a ser hermanos...
Mau, Nin	Por enseñarme a vivir...

TESIS QUE DEDICO A

Guate

Porque la mitad de mi ser te la debo...

CONRED

Por las oportunidades que me diste...

La magja

Por los años de aprender juntos y compartir tantas ideas, risas y m...

4.2 MARCO REFERENCIAL.....	33
4.2.1 UBICACIÓN.....	33
4.2.1.1 Ubicación Geográfica.....	33
4.2.1.2 Ubicación Política.....	33
4.2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CUENCA.....	33
4.2.2.1 Geología.....	35
4.2.2.2 Fisiografía.....	36
4.2.2.3 Zonas de Vida.....	37
4.2.2.4 Hidrografía.....	38
4.2.2.5 Edafología.....	39
4.2.2.6 Población.....	42
5. OBJETIVOS	44
5.1 GENERAL.....	44
5.2 ESPECÍFICOS.....	44
6. METODOLOGÍA	45
6.1 DEFINICIÓN E IDENTIFICACIÓN DE AMENAZAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	45
6.2 CARACTERIZACIÓN DE AMENAZAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	45
6.2.1 AMENAZA SÍSMICA.....	46
6.2.2 AMENAZA VOLCÁNICA.....	46
6.2.3 AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS.....	48
6.2.4 AMENAZA DE FLUJOS DE ESCOMBROS.....	50
6.2.5 AMENAZA DE INUNDACIONES.....	53
6.3 DEFINICIÓN DE USOS.....	54
6.4 SELECCIÓN Y DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA LA ZONIFICACIÓN.....	55
6.4.1 CAPACIDAD DE USO.....	55
6.4.2 PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AMENAZAS A NIVELES ACEPTABLES.....	56
6.5 ZONIFICACIÓN.....	59
6.5.1 CAPACIDAD DE USO.....	59
6.5.1.1 Mapa Base.....	59
6.5.1.2 Profundidad del Suelo.....	59
6.5.1.3 Pendiente del Terreno.....	59
6.5.1.4 Región Natural.....	60
6.5.2 PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AMENAZAS A NIVELES ACEPTABLES.....	60
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	61
7.1 DEFINICIÓN DE SISTEMA A ANALIZAR.....	61
7.2 DEFINICIÓN E IDENTIFICACIÓN DE AMENAZAS.....	61
7.3 CARACTERIZACIÓN DE AMENAZAS.....	64

7.3.1	AMENAZA DE SISMOS.....	64
7.3.2	AMENAZA DE ACTIVIDAD VOLCÁNICA.....	65
7.3.3	AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS.....	70
7.3.4	AMENAZA DE FLUJOS DE ESCOMBROS.....	75
7.3.4.1	Flujos de Escombros Asociados a Volcanes.....	76
7.3.4.2	Flujos de Escombros Recientes Asociados a Volcanes.....	77
7.3.4.3	Flujos de Escombros no Asociados a Volcanes.....	84
7.3.5	AMENAZA DE INUNDACIONES.....	87
7.3.6	AMENAZA DE VENDAVALES	90
7.3.7	COMPARACIÓN ENTRE AMENAZAS.....	90
7.4	ZONIFICACIÓN.....	91
7.4.1	DEFINICIÓN DE USOS.....	91
7.4.2	CRITERIOS PARA LA ZONIFICACIÓN.....	92
7.4.2.1	Capacidad de Uso.....	93
7.4.2.2	Probabilidad de Ocurrencia de Amenazas a Niveles Aceptables.....	96
8.	CONCLUSIONES	107
9.	RECOMENDACIONES	109
10.	BIBLIOGRAFÍA	110
11.	ANEXO	115

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1: Funciones de daños para inundaciones con acumulación de sedimentos	9
Tabla 2: Probabilidades de muerte aceptables según algunos autores y normativas.....	10
Tabla 3: Relación empírica entre VEI, altura de la columna eruptiva (H) y recorrido de flujos piroclásticos en km.....	24
Tabla 4: Municipios y departamentos con territorio dentro de la cuenca del río Achiguate – Guacalate.	33
Tabla 5: Geología de la cuenca del río Achiguate – Guacalate.	35
Tabla 6: Fisiografía general de la cuenca del río Achiguate.	36
Tabla 7: Zonas de vida de la cuenca del río Achiguate.....	37
Tabla 8: Distribución de la población por municipios en la cuenca del río Guacalate – Achiguate	42
Tabla 9: Criterios aplicados para seleccionar los fenómenos volcánicos que pueden ser aplicados para la zonificación de uso.....	47
Tabla 10: Métodos utilizados para estimar la probabilidad de ocurrencia de las amenazas mapeables en la cuenca del río Achiguate.....	53
Tabla 11: Criterios que definen la asignación a categorías de capacidad de uso.....	55
Tabla 12: Combinaciones de altura de inundación y probabilidad de ocurrencia utilizadas para el análisis de sensibilidad.	57
Tabla 13: Funciones de daño utilizadas para cada uso del suelo definido.	58
Tabla 14: Listado de amenazas naturales cuya posibilidad de ocurrencia se evaluó para la cuenca del río Achiguate...	61
Tabla 15: Listado de fuentes de información disponibles sobre desastres, causados por amenazas naturales.	62
Tabla 16: Número de reportes de daños por departamento, amenaza y siglo con base en las fuentes de la tabla 15.	63
Tabla 17: Caracterización de la amenaza sísmica para Guatemala.	64
Tabla 18: Relaciones H/L utilizadas por Escobar y Anleu para modelar erupción con altura de columna de 4300 msnm. en el volcán de Fuego.	67
Tabla 19: Probabilidad de ocurrencia para distintas magnitudes de IEV y mapa de amenaza asociado.....	68
Tabla 20: Relación entre la aceleraciones pico del terreno en el área de estudio, producto del terremoto de 1976 y los modelos de amenaza sísmica disponibles, aplicando dos modelos de conversión Intensidad – PGA.....	72
Tabla 21: Registro histórico documentado de ocurrencia de flujos de escombros dentro del área de la cuenca del río Achiguate	75
Tabla 22: Registro histórico de flujos de escombros asociados al Volcán de Agua.	76
Tabla 23: Probabilidad de ocurrencia para flujos de escombros de distintos volúmenes provenientes del volcán de Agua.....	76
Tabla 24: Detalle de los flujos de escombros asociados a volcanes en el siglo XXI.....	77
Tabla 25: Registros de lluvias diarias en las estaciones cercanas a los sitios en donde ocurrieron flujos de escombros en el siglo XXI.....	78
Tabla 26: Análisis de frecuencia de la precipitación máxima anual para las estaciones El Capitán, El Tablón y Los Tarrales.	80
Tabla 27: Probabilidad de ocurrencia de flujos de escombros (lahares) en el Volcán Santiaguito de acuerdo a niveles de lluvia observados en el Observatorio Vulcanológico Santiaguito	81
Tabla 28: Tabla comparativa de características geomorfológicas de cuencas en donde se han registrado flujos de escombros.....	85
Tabla 29: Estudios sobre amenazas de inundaciones en la cuenca del río Achiguate.	87
Tabla 30: Clasificación de rasgos geomorfológicos aplicado en el estudio de JICA (2003) para determinar niveles relativos de amenaza de inundación.	88
Tabla 31: Ubicación de las secciones de control para la comparación de los estudios de amenaza de inundación realizados por JICA y congruencia de límites de áreas de inundación.....	89
Tabla 32: Relación probabilidad de ocurrencia – área por amenaza.	90
Tabla 33: Categorías de uso definidas.....	91
Tabla 34: Categorías de capacidad de uso, de acuerdo a la metodología del INAB.	93
Tabla 35: Áreas por categoría de capacidad de uso para la cuenca del río Achiguate.	94
Tabla 36: Porcentajes de daño de acuerdo a la función de daño, niveles teóricos de inundación y costo estimado de reposición por unidad de área.	96
Tabla 37: A) Aplicación de la ecuación de Daño esperado para el uso Agricultura limitaciones y la serie 1 de la tabla 12. B) Aplicación de la ecuación de Daño esperado para el uso Agricultura limitaciones y la serie 3 de la tabla 12.	97

Tabla 38: Posiciones relativas de acuerdo a las pérdidas esperadas en tres combinaciones distintas de períodos de retorno.	98
Tabla 39: Probabilidad aceptable de afección para cada uso del suelo.	99
Tabla 40: Criterios auxiliares aplicados sobre la capacidad de uso, para usos que utilizan el suelo como sustrato.	100
Tabla 41: Combinaciones posibles de criterios y usos permisibles en cada combinación.....	102
Tabla 42: Zonas de Aptitud de acuerdo a las combinaciones de criterios y usos permisibles determinados en la Tabla 40.....	103
Tabla 43: Discusión sobre el desempeño de la zonificación para quince puntos distribuidos en la cuenca del río Achiguate.....	105
Tabla 44: Resumen de la evaluación de desempeño de la Zonificación.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tendencia de indicador de desarrollo que define la ocurrencia de un desastres	4
Figura 2: Fases de un desastre.....	5
Figura 3: Ciclo simplificado de los desastres.	6
Figura 4: Relaciones entre desarrollo y desastres.....	7
Figura 5: Regiones de riesgo propuestas por Helm.....	11
Figura 6: Pago que una persona requeriría por aceptar riesgo adicional y pago que una persona efectuaría por eliminar un riesgo	12
Figura 7: Determinación del óptimo económico para un rango de eventos dado	13
Figura 8: Uso múltiple de los recursos.....	19
Figura 9: Relación de límites entre la actividad humana y el entorno natural.	20
Figura 10: Relación de fenómenos y daños asociados a los sismos	22
Figura 11: Amenazas asociadas a los edificios volcánicos.....	23
Figura 12: Relaciones entre magnitud y frecuencia de erupciones en el Holoceno a nivel global.....	24
Figura 13: Esquema de un deslizamiento típico.....	25
Figura 14: Zonificación de la intensidad de amenaza de deslizamientos, caso Abanico Cheekye, Columbia Británica....	27
Figura 15: Geomorfología típica de cuencas en donde se presentan flujos de escombros.....	28
Figura 16: Límites de inicio de generación de flujos de escombros a partir del ángulo de laderas y el área de la cuenca, propuesto por Van Dine (1985).	29
Figura 17: Relación entre ocurrencia de deslizamientos como función de la duración y lluvia acumulada.....	30
Figura 18: Relación caudal, canal y área de inundación.	31
Figura 19: Relaciones estratigráficas en llanuras aluviales; secuencia hacia la formación de dos terrazas, con uno, dos y tres episodios de sedimentación	32
Figura 20: Municipios de la cuenca del río Achiguate – Guacalate.....	34
Figura 21: Geología general de la cuenca del río Achiguate – Guacalate.....	35
Figura 22: Fisiografía general de la cuenca del río Achiguate.....	36
Figura 23: Zonas de vida de la cuenca del río Achiguate.....	38
Figura 24: Hidrografía de la cuenca del río Achiguate	40
Figura 25: Taxonomía de suelos de la cuenca del río Achiguate.....	41
Figura 26: Población de la cuenca del río Achiguate.	43
Figura 27: Amenaza sísmica Shah & Kiremidjian (1977) y Ligorría (1995) para $T_r = 500$ años (período de retorno). Isoaceleración en porcentaje de gravedad.....	65
Figura 28: Amenazas para el Volcán de Fuego.....	66
Figura 29: Amenazas para el Volcán de Fuego.....	67
Figura 30: Mapa de amenaza de flujos piroclásticos para un $T_r > 700$, aplicando dos variantes del cono de energía. ..	68
Figura 31: Amenaza para el Volcán de Fuego	69
Figura 32: Depósitos de colapsos del complejo Fuego - Acatenango.	69
Figura 33: Deslizamientos mapeados por Harp (1976) en la cuenca del Río Achiguate y su relación con la geología del área.	70
Figura 34: Frecuencia relativa de ocurrencia deslizamientos por unidad geomorfológica y rango de pendientes, basado en los deslizamientos mapeados por Harp en 1976.....	71
Figura 35: Deslizamientos mapeados por JICA (2001) en la cuenca del río Achiguate.....	73
Figura 36: Relación entre pendiente del terreno y frecuencia de deslizamientos para JICA y Harp.	74
Figura 37: Distribución del flujo de escombros de El Porvenir en el año 2002, según el modelo LAHAR Z, para volúmenes de 50,000 y 100,000 m ³	82
Figura 38: Depósito del flujo de escombros de Panabaj en el año 2005	82
Figura 39: Mapa de amenaza de flujos de escombros asociados a edificios volcánicos.	83
Figura 40: Topografía en los alrededores de Antigua Guatemala, mostrando condiciones típicas de cuencas torrenciales.	84
Figura 41: Microcuencas de la cuenca del río Achiguate, no asociadas a volcanes que presentan condiciones para la ocurrencia de flujos de escombros.	86
Figura 42: Comparación entre características morfométricas promedio de las microcuencas del río Achiguate que drenan al valle de Antigua y las características de las microcuencas Paso de San Luis y Pensativo.....	87
Figura 43: Comparación de los mapas de amenaza de inundaciones disponibles para la cuenca del río Achiguate.....	89

Figura 44: Relación probabilidad de ocurrencia – área para las amenazas caracterizadas.....91
Figura 45: Mapa de capacidad de uso del suelo para la cuenca del río Achiguate.95
Figura 46: Mapa de Zonas de Aptitud (ZAP) por combinación de criterios de Capacidad de Uso (INAB) y
Probabilidad de Ocurrencia de Amenazas.104

**“ZONIFICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ACHIGUATE – GUACALATE:
UNA PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DE CRITERIOS PARA LA REDUCCIÓN
DEL RIESGO A DESASTRES”**

**“ZONING OF THE ACHIGUATE – GUACALATE RIVER BASIN:
A CRITERIA INTEGRATION PROPOSAL FOR DISASTER RISK REDUCTION”**

RESUMEN

La cuenca del río Achiguate – Guacalate es un espacio geográfico en donde conviven población y recursos naturales. Bajo las condiciones actuales, dicha interacción supone la degradación de los recursos naturales, pero también la ocurrencia de desastres, o más concretamente grandes pérdidas económicas y de vidas humanas. La causa fundamental de estos desequilibrios, radica en que la población realiza sus actividades en espacios geográficos con características naturales no apropiadas para las mismas.

Para la cuenca del Río Achiguate – Guacalate, se ha verificado la ocurrencia de inundaciones, erupciones volcánicas, deslizamientos, sismos y heladas; todos eventos que amenazan las distintas actividades del hombre. La caracterización espacial y temporal de estas amenazas, permite que sean utilizadas como un elemento más para la planificación del uso apropiado del territorio. Sin embargo surge la interrogante sobre como deberían integrarse a esta planificación, aspecto que el presente trabajo resuelve a través de una propuesta de zonificación de uso apropiado de la tierra.

La zonificación propuesta en este trabajo parte de la idea fundamental que la actividad del hombre debe desarrollarse dentro de los límites establecidos tanto por el impacto que la actividad del hombre puede tener sobre el entorno (límite superior), como por el impacto que el entorno o amenazas naturales pueden tener sobre la actividad del hombre (límite inferior). Dado que con facilidad se identificó a la capacidad de uso del suelo como el medio a través del cual establecer el límite para reducir el impacto sobre el entorno, el trabajo se centró en establecer el límite para reducir el impacto del entorno sobre la actividad humana y la interacción de ambos límites.

Para ello la metodología involucró la identificación de amenazas que podrían ocurrir dentro de la cuenca, utilizando un primer filtro en la forma de criterios elementales sobre condiciones que se cumplen o no, para luego realizar un inventario de los eventos de desastres que han ocurrido en la cuenca a causa de las amenazas identificadas a través del primer criterio. Por este proceso se identificó que en la cuenca se presentan las amenazas por actividad volcánica, deslizamientos, flujos de escombros e inundaciones. Aunque se identificó la ocurrencia amenaza por sismos, esta no se consideró para la zonificación porque en principio esta se maneja por medio de regulación en las características estructurales de las edificaciones. En el caso de los fuertes vientos, esta amenaza no se consideró simplemente porque no se encontró información suficiente como para realizar una zonificación sobre la ocurrencia de la misma.

Una vez identificadas las amenazas que se han presentado en la cuenca, se homogenizó la caracterización espacial y temporal de las amenazas naturales que se presentan en la cuenca; siendo estas, la actividad volcánica, deslizamientos, flujos de escombros e inundaciones. Estableciéndose, con base en estudios

especializados sobre las mismas e información complementaria, las áreas que podrían ser afectadas por eventos de distintas magnitudes y la probabilidad de ocurrencia asociada a las mismas.

Partiendo del objetivo de establecer una zonificación para el uso apropiado, se hizo necesario definir los distintos usos a los cuales podría estar sujeta una zona cualquiera de la cuenca. Por lo que se definieron 12 categorías de uso, respecto de las cuales es importante mencionar que representan categorías macro y que no están asociadas estrictamente a usos urbanos.

Posteriormente se definieron dos criterios que representan los límites dentro de los cuales se debe desarrollar la actividad humana. Se seleccionó la capacidad de uso del suelo como el criterio que limita el impacto que la actividad del hombre puede tener sobre el entorno. Y lo que se define como la probabilidad de ocurrencia de amenazas a niveles aceptables, como el criterio que limita el impacto que el entorno puede tener sobre la actividad del hombre. La definición de este segundo criterio y la definición del como interactúa con la capacidad de uso del suelo para dirigir la actividad del hombre es el aporte más significativo de este trabajo.

Una vez definidos estos criterios, se aplicaron a las variables expresadas espacialmente sobre la cuenca y se establecieron lo que se denominó Zonas de Aptitud – ZAP –, que representan la gama de usos que de acuerdo a esta propuesta, deberían permitirse en cada unidad de área del territorio. De las 21 ZAP que teóricamente podrían presentarse en un espacio geográfico cualquiera bajo estos criterios, se presentaron 17 dentro de la cuenca del Río Achiguate – Guacalate.

Por último para evaluar el desempeño de la propuesta, se tomaron 15 puntos ubicados de manera aleatoria dentro de la cuenca, identificándose para los mismos la ZAP correspondiente con sus respectivos usos permisibles. Evaluándose estas contra consideraciones teóricas y prácticas sobre la validez de la misma. Un ejemplo de lo anterior lo representa el punto número 8 de la Tabla 43, que se encuentra a ~1 Km. del cráter del volcán de Fuego y al ser clasificado en la categoría ZAP – 15, permite su uso para pastizales, lo cual parece inapropiado dadas las condiciones del área que incluyen ausencia de suelo, fuertes pendientes y una alta amenaza. Esto implica sin duda alguna, que es necesario evaluar y revisar los criterios, así como la información de base para su aplicación.

De lo anterior se derivan las recomendaciones sobre la necesidad de revisar y complementar la caracterización de los suelos de la cuenca del río Achiguate, fijar criterios para la elaboración de mapas de amenaza, fundamentados en la aplicación de los mismos y con ello homogenizar la información disponible sobre la probabilidad de ocurrencia de las amenazas. Y de manera más amplia, la necesidad de predefinir criterios que determinen las necesidades de generación de información, dentro de un proceso iterativo, en el que se mejoran los criterios con base en investigación realizada sobre la información generada.

1. INTRODUCCIÓN

Recientemente la temática de la reducción de riesgos a desastres ha cobrado relevancia dentro del contexto del desarrollo nacional, producto fundamentalmente de los dos últimos desastres que Guatemala ha sufrido; el ocurrido tras el paso del Huracán Mitch en 1998 y más recientemente, el ocurrido tras el paso de la Tormenta Tropical Stan en 2005. Actualmente, existe claridad sobre el impacto que los desastres tienen en el desarrollo de un país, así como sobre las causas de los mismos. Dentro de estas causas, a veces de manera implícita, otras veces de manera explícita, se reconoce la exposición como una condición que debe cumplirse para que ocurra un desastre y la cual básicamente significa que un elemento o sistema de interés para el hombre ocupe un espacio geográfico que puede ser afectado por una amenaza en particular. Desde hace muchos años, se ha determinado que ciertas formas en que el hombre ocupa el territorio y hace usos de los recursos que en el se encuentran, han generado la degradación de los mismos. Ha sido práctica común, en estos años identificar a esta degradación como uno de los principales agentes causales de los desastres, y no está demás indicar que muchas veces de manera infundada o por medio de una pobre conceptualización.

Sin embargo lo que si es claro es que tanto la degradación de los recursos naturales de un territorio dado y la exposición ante amenazas, y posterior desastre, son elementos que suponen una serie limitante para el desarrollo en un área como puede ser la cuenca del Río Achiguate.

Ante esta lógica, se han hecho esfuerzos por intentar conciliar mecanismos como el manejo de cuencas y la gestión de riesgos (y en otros la gestión ambiental), con el objeto de reducir los desastres y reducir esta limitante del desarrollo. Sin embargo no se ha logrado con éxito, en parte por la falta de herramientas apropiadas, producto de una clara conceptualización.

Es bajo este contexto que se ha desarrollado una propuesta de zonificación para el uso adecuado del territorio dentro de la cuenca del río Achiguate, pero que más allá de la propuesta de zonificación per se, tiene su mayor aporte en una propuesta de como conciliar los dos elementos ante mencionadas; la reducción de la degradación de los recursos (suelos en particular) y la reducción del riesgo a desastres. Haciendo uso de la metodología de capacidad de uso del suelo y del desarrollo de un criterio de riesgo en donde se utiliza las pérdidas que distintas amenazas implicarían para usos hipotéticos, se presenta un mapa en donde se definen las zonas aptas para distintas combinaciones de uso. Del producto final es importante reconocer dos aspectos muy importantes que limitan su aplicación: la falta de información sobre amenazas naturales desarrollada de acuerdo a criterios previamente establecidos; y la falta de una clasificación legalmente establecida de usos de la tierra.

Cabe por último mencionar que la metodología empleada puede aplicarse para cualquier espacio territorial, ya que en definitiva no se utiliza ningún criterio dependiente de la cuenca, lo cual aunado al hecho que la distribución espacial de las amenazas naturales (con excepción de las inundaciones) no responden a los límites de cuencas, hacen cuestionable la validez de considerar a la cuenca como la unidad de planificación idónea para reducir el riesgo.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Tanto los procesos físicos, como los recursos naturales y la población, conviven en un espacio geográfico, dentro del cual se da una interacción dinámica expresada como la utilización de los recursos naturales para satisfacer las necesidades de la población. Proceso que en la mayoría de los casos provoca la degradación y agotamiento de los recursos naturales, pero en distinta magnitud dado que en dicho espacio existen condiciones variables que determinan la facilidad con que los recursos se degraden. Por otro lado, dentro de este espacio geográfico también se presentan una serie de eventos, que amenazan las actividades del hombre ya asentadas o aquellas que pudieran asentarse en la misma zona afectada por los eventos.

Bajo las dos ideas anteriores, la falta de una zonificación para el uso apropiado del territorio para la cuenca del Río Achiguate – Guacalate, permite la elaboración de una propuesta de zonificación basada en criterios, que permitan reducir el impacto que las actividades tienen sobre el entorno y a la vez reduciendo el riesgo que estas sean dañadas por fenómenos extremos del entorno.

El manejo de los recursos naturales dentro del contexto de una cuenca hidrográfica no es nada nuevo en el mundo y en Guatemala se conoce de su importancia desde hace más de 25 años, cuando instituciones como el INDE, el IGN, el INSIVUMEH de la mano del Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano, la Universidad de San Carlos y algunas otras instituciones desarrollaron estudios en las cuencas hidrográficas del país, con el fin de generar la información básica para la planificación del uso, aprovechamiento y manejo de los recursos naturales. Una de las cuencas sujetas de estudio es la del Río Achiguate – Guacalate. Parte de la información pertinente para la planificación del desarrollo, lo constituye la información sobre amenazas naturales. En la cuenca del Río Achiguate – Guacalate, ocurren una serie de procesos que pueden representar una amenaza para las actividades socioeconómicas: sismos, inundaciones, deslizamientos, actividad volcánica, etc., y que deben incorporarse dentro de una propuesta de zonificación.

3. JUSTIFICACIÓN

La cuenca del Río Achiguate – Guacalate representa una zona de mucha importancia para el país. En ella se ubica uno de los principales polos de desarrollo turístico, la Antigua Guatemala; el principal puerto del Pacífico, el Puerto Quetzal; el principal punto de retransmisión de telecomunicaciones en el Volcán de Agua; la ruta que conduce de la ciudad capital de Guatemala al Puerto Quetzal y la Ruta CA – 2 que conduce al suroccidente del país y la frontera con México con puentes sobre los ríos Achiguate y Guacalate; una importante actividad agrícola y una población equivalente al 2.6% del total para el país, en una superficie que representa el 1.2% del total nacional.

A pesar de la importancia que reviste la cuenca del río Achiguate – Guacalate, y los problemas que se generan por el mal manejo de sus recursos naturales, no existe un marco estratégico para el desarrollo dentro de la misma. Si se considera a la cuenca como una unidad natural de planificación y que todos los procesos físicos y sociales ocurren dentro de un espacio, la zonificación para uso apropiado del territorio es una herramienta de suma importancia para la planificación del desarrollo y de un plan de manejo de recursos naturales dentro de la misma.

En cualquier territorio ocurren eventos o fenómenos naturales extremos, que pueden representar una amenaza para el desarrollo humano. Para la cuenca del Río Achiguate – Guacalate, se ha verificado la ocurrencia de inundaciones, erupciones volcánicas, deslizamientos, sismos y heladas; todos eventos que amenazan las distintas actividades del hombre. La caracterización espacial y temporal de estas amenazas, permite que sean utilizadas como un elemento más para la planificación del uso apropiado del territorio. El contar con este elemento para la planificación, reviste mayor importancia en la medida en que el potencial de producir daños se incrementa al asentarse más población y más de sus actividades productivas en las áreas de posible afección.

En el medio guatemalteco es reconocido que la recopilación y sistematización de información, suponen un esfuerzo muy grande, dificultándose así la aplicación de la misma. El ordenamiento y sistematización de la información en cualquier ámbito, es un paso fundamental para hacerla fácilmente disponible para su uso y aplicación, y además para la difusión del conocimiento; esto evita duplicidad de esfuerzos y por consiguiente la pérdida de recursos, permite su aplicación para conocer cambios temporales, pero fundamentalmente contribuye a evitar que se pierda.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 MARCO CONCEPTUAL

4.1.1 DESASTRES Y EL CICLO DE LOS DESASTRES

4.1.1.1 Desastre

El diccionario Océano (54) define un desastre como "desgracia grande". Stephenson (60) lo define como un hecho o serie de hechos que resultan en víctimas y/o daño o pérdida de la propiedad, infraestructura, servicios esenciales o medios de supervivencia, a un nivel mucho mayor de la capacidad normal de la comunidad afectada para dar abasto sin ayuda.

Wilches-Chaux (69) indica que un desastre es un evento identificable en el tiempo y el espacio, en el cual una comunidad ve afectado su funcionamiento normal, con pérdidas de vidas y daños de magnitud en sus propiedades y servicios, que impiden el cumplimiento de las actividades esenciales y normales de la sociedad. Por su parte G. Romero y A. Maskrey, citados por Villagrán (67), conciben al desastre como la serie de daños y problemas de carácter económico, social y tecnológico provocados por un fenómeno natural de gran magnitud.

Todos estos conceptos identifican al desastre como una problemática de la sociedad e incluso hay quienes consideran agregarle a estos conceptos, la medida en que se frena o reduce el desarrollo de una determinada sociedad, como característica inmediata de un desastre (Figura 1); debido al desvío de fondos para la atención

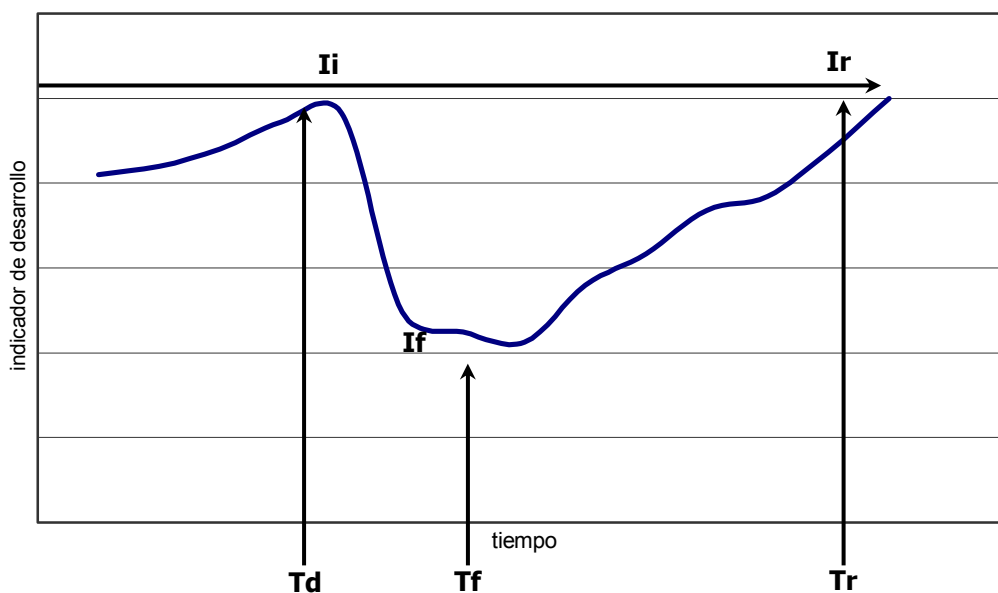


Figura 1: Tendencia de indicador de desarrollo que define la ocurrencia de un desastres (Adaptado de Villagrán, 2002).

Donde:

I_i = nivel del indicador de desarrollo al momento de la ocurrencia del evento generador del desastre.

I_f = nivel del indicador de desarrollo alcanzado como consecuencia del evento generador del desastre.

$I_f - I_i$ = impacto directo del evento \approx magnitud del desastre.

T_d = momento de ocurrencia del evento generador de desastre.

T_r = momento en que el indicador de desarrollo alcanza el nivel previo a la ocurrencia de desastre.

$T_r - T_d$ = tiempo de recuperación.

$\frac{I_r - I_f}{T_r - T_f}$ = tasa de recuperación, que depende de la capacidad de regeneración de la sociedad afectada.

del desastre, debido a los daños directos en infraestructura de servicio y medios de producción, al impacto psicosocial, etc. Que no debe confundirse con las relaciones entre el desarrollo y los desastres, que se dan posteriores al desastre propiamente dicho, y que se identifican en el inciso 4.1.3.

4.1.1.2 El Ciclo de los Desastres

El estudio de los desastres ha logrado identificar al agente causal de los mismos, que la teoría del desastre concibe actualmente como la convergencia en tiempo y espacio de dos componentes: la amenaza y la vulnerabilidad de determinado sistema. Donde la amenaza es un evento natural, causado por el hombre o por ambos, y que tiene potencial para producir daño. Y la vulnerabilidad son todas aquellas características de un sistema que lo hacen susceptible de sufrir daño ante la acción de determinado evento o proceso (amenaza).

De esta teoría y tomando como base el instante en el cual se manifiesta el evento que provoca el desastre, se puede hablar de un ANTES, UN DURANTE y UN DESPUÉS DEL DESASTRE, que Villagrán (67) esquematiza en la Figura 2 y que da paso a la idea del ciclo de los desastres (Figura 3).

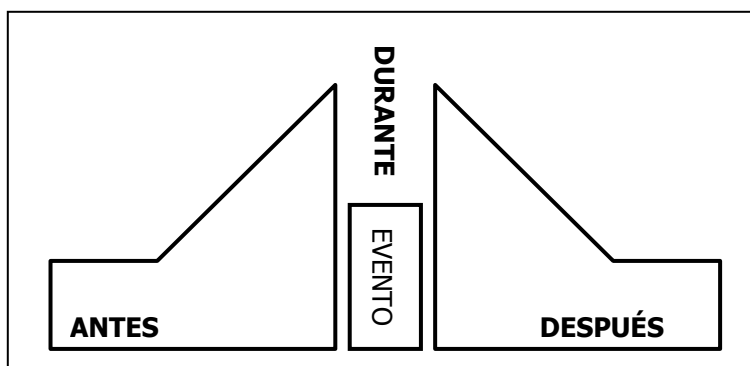


Figura 2: Fases de un desastre (Adaptado de Villagrán, 2002).

Posterior a la ocurrencia de un desastre y antes de uno nuevo, se presenta la oportunidad de que el riesgo se incremente o se reduzca, es por ello que se le considera como una espiral. Hacia donde se tome ese paso, dependerá de la toma de decisiones, las que se ejemplifican y explican en el inciso 4.1.6. El punto de partida de dicha espiral tendría que ser la construcción de una situación de **riesgo**, como algo que antecede al desastre, brindando la oportunidad para integrar el riesgo ante desastres como un elemento más en la planificación del desarrollo sostenible.

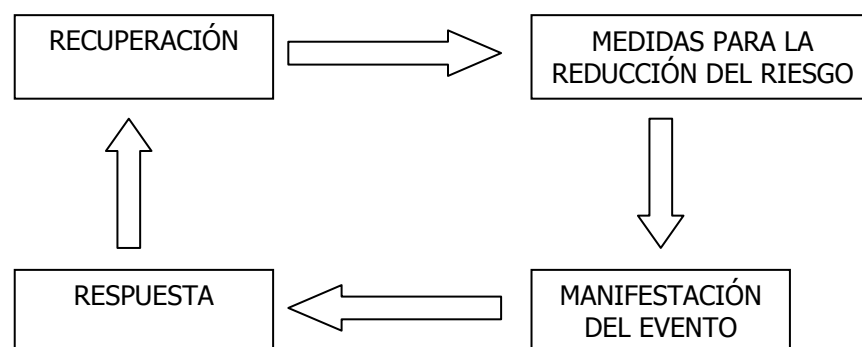


Figura 3: Ciclo simplificado de los desastres.

4.1.1.3 El Riesgo ante Desastres

Un concepto de riesgo se encuentra en un diccionario como: contingencia o posibilidad de que suceda un daño, desgracia o contratiempo (54). Históricamente se ha manejado en la economía para calificar una situación en la que existen una serie de resultados posibles y a los que se les puede asignar una probabilidad (valor numérico) de ocurrencia. Sin embargo en términos cotidianos se refiere a aquella situación en la que uno de los resultados compromete a quien toma la decisión, en términos de pérdidas.

Riesgo ante desastres puede conceptualizarse como: grado de pérdidas previstas en vidas humanas, personas lesionadas o heridas, pérdidas materiales y perturbaciones de la actividad económica debidas a un fenómeno determinado (69). Este último término es de vital importancia, ya que distintos fenómenos afectarán en forma distinta al sistema que está expuesto al mismo.

Siguiendo la conceptualización del desastre que se hizo en el párrafo anterior, el riesgo ante desastres se compone de dos factores, la amenaza y la vulnerabilidad. Con la diferencia que la convergencia en el tiempo no se ha dado, pero es latente. Dentro de esta misma concepción, la construcción de una situación de riesgo es un proceso socio-económico, y "un fenómeno de la naturaleza (y obviamente uno de origen humano) sólo adquirirá la condición de amenaza cuando su ocurrencia se prevea en un espacio ocupado por una comunidad que debe afrontar las consecuencias de dicho fenómeno". La vulnerabilidad se predica, entonces, frente a los fenómenos determinados que adquieran para esa comunidad el carácter de amenazas (69). Un ejemplo de construcción de riesgo, es el emplazamiento de viviendas de adobe en una zona sísmica.

Dado que para que exista riesgo y luego ocurran desastres es necesario que los dos factores del riesgo, la amenaza y la vulnerabilidad se presenten sobre un mismo espacio, entonces la caracterización espacial de las amenazas debería permitir identificar áreas sujetas a la ocurrencia de las mismas y tras la definición de criterios, la identificación de áreas que no deberían ser ocupadas para determinada actividad.

4.1.2 EL DESARROLLO SOSTENIBLE Y LA REDUCCIÓN DEL RIESGO ANTE DESASTRES

Stephenson (60) indica que por mucho tiempo se ha ignorado la relación de causa y efecto entre los desastres y el desarrollo. Los programas para el desarrollo no fueron evaluados dentro del contexto de desastres, ni desde los efectos que el desastre producía en los programas de desarrollo, ni se observaba tampoco si los programas de desarrollo aumentaban la posibilidad de un desastre o si aumentaban los efectos de los potenciales daños del desastre (como se indican en el inciso anterior). Igualmente identifica cuatro formas de esta relación (Figura 4):

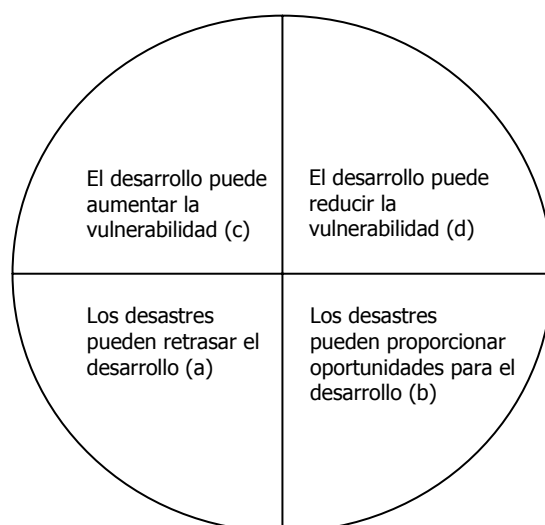





Figura 4: Relaciones entre desarrollo y desastres (Stephenson, 1991).

-  a. Los desastres retardan los programas de desarrollo destruyendo años de iniciativas de desarrollo.
P. ej.: Servicios públicos destruidos.
-  b. La reconstrucción después de un desastre otorga oportunidades importantes para iniciar programas de desarrollo.
P. ej.: Un programa de autoconstrucción de viviendas destruidas por un terremoto, enseña nuevos oficios, refuerza el orgullo comunitario y la dirección.
-  c. Los programas de desarrollo (tradicional) pueden aumentar la vulnerabilidad a los desastres.
P. ej.: Centros de desarrollo económico atraen grandes cantidades de población, la cual termina ocupando áreas bajo amenaza.



- d. Los programas de desarrollo pueden ser diseñados para disminuir la susceptibilidad a los desastres y sus consecuencias negativas. p. ej.: Proyectos de vivienda, elaborados bajo códigos de construcción sismorresistente.

De acuerdo con Stephenson (60), el desarrollo requiere transformaciones institucionales y estructurales de las sociedades para acelerar el crecimiento económico, reducir los niveles de desigualdad y erradicar la pobreza absoluta. Con el tiempo, los efectos de los desastres pueden seriamente degradar el potencial a largo plazo de un país para mantener el desarrollo constante, obligando a los gobiernos a modificar substancialmente sus prioridades económicas y programas para el desarrollo.

El concepto de desarrollo intenta comunicar la idea que la biosfera puede ser más productiva o "mejor" en algún sentido, lo cual depende de factores ecológicos, políticos, culturales, y tecnológicos. El concepto de sostenible se refiere al mantenimiento o prolongación de un proceso o actividad sobre el tiempo. Cardona (4) citando a Duque, indica que "parte del mejoramiento de las condiciones de vida del ser humano es lograr un mayor nivel de seguridad y supervivencia en relación con las acciones y reacciones del entorno, lo cual se logra a través de la comprensión de la interacción del mismo con el medio ambiente". De aquí se desprende que la prevención es una estrategia fundamental para el desarrollo sostenible, dado que permite compatibilizar el ecosistema natural y la sociedad que lo ocupa y explota, dosificando y orientando la acción del hombre sobre el medio ambiente y viceversa (4).

La planeación del desarrollo sólo puede tener consistencia si se llevan a cabo programas económicos y sociales vertidos sobre un espacio geográfico respecto al cual se tiene una clara visión del ordenamiento territorial a mediano y largo plazo. Es decir, si existe una coherencia y simultaneidad de los diversos tipos de planeación y programación sectorial con las diversas escalas de ordenamiento del territorio (3).

4.1.3 LA GESTIÓN DEL RIESGO A DESASTRES

Un concepto de gestión de riesgo a desastres fue dado por la Organización de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres (en la actualidad Organización para la Coordinación de Asistencia Humanitaria) en 1989 como el "conjunto de políticas, decisiones administrativas y actividades operativas que aplicadas antes, durante o después de los desastres, tienen por finalidad evitar la ocurrencia de los mismos o reducir sus consecuencias". Un documento no publicado de la Secretaría Ejecutiva de CONRED (14), plantea que la gestión de riesgo a desastres puede concebirse cómo un proceso de cambio social dirigido, el cual tiene los siguientes componentes:

4.1.3.1 Diagnostico de la situación actual

Esto significa cuantificar la probabilidad de pérdidas de vidas humanas, económicas o de calidad de vida. En este componente, se identifican tres pasos:

- a. Definir sistema a analizar y riesgo por evaluar: en el caso del riesgo a desastres se suele tratar con sistemas sociales, desde el individuo hasta un país, y con sistemas de interés social como lo son los sistemas de agua

potable, vivienda y otros. Por otro lado es necesario definir cual de los tres tipos de riesgo antes mencionados se evaluará.

- b. Identificar y caracterizar las amenazas: es decir nombrar las amenazas que pueden presentarse en un territorio dado, existiendo dos formas fundamentales en que se identifican las amenazas. La primera es mediante los antecedentes y registros históricos, y la segunda es mediante la investigación e identificación teórica de condiciones bajo las que pueden ocurrir determinadas amenazas. La caracterización de amenazas implica establecer la probabilidad de ocurrencia de la misma, la magnitud asociada a la misma y el área que puede ocupar.
- c. Evaluar las condiciones de vulnerabilidad y riesgo ante estas amenazas: para este último paso es necesario tener un conocimiento previo de la relación entre la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. Una de las formas más utilizadas para establecer lo anterior son las funciones de daño. En estas se establece el grado de daño que distintas magnitudes de la amenaza pueden causar para determinada característica que define la vulnerabilidad. Existen un sinnúmero de características de distinta naturaleza que definen la vulnerabilidad, sin embargo normalmente se pueden encontrar unas pocas que explican la mayor parte las posibles pérdidas (riesgo). En la Tabla 1, se muestran algunas funciones de daño ante inundaciones utilizada en el diseño del Proyecto de Control de Inundaciones: los ríos Achiguat y Pantaleón, realizado por la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) en 1985 (32).

Tabla 1: Funciones de daños para inundaciones con acumulación de sedimentos (JICA, 1985).

Porcentaje de daño sobre bienes sumergidos, incluyendo acumulación de sedimentos.								
Bienes	Altura de Inundación en metros							
	0.125 m	0.375 m	0.625 m	0.875 m	1.125 m	1.375 m	1.625 m	2.500 m
Casa	0.117	0.227	0.288	0.339	0.387	0.438	0.512	0.659
Bienes de la casa	0.075	0.173	0.250	0.322	0.393	0.460	0.560	0.749
Caña de azúcar	0.650	0.900	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Pastos	0.500	0.750	0.900	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Maíz	0.650	0.900	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Algodón	0.600	0.900	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Banano	0.150	0.400	0.600	0.750	0.900	1.000	1.000	1.000
Árboles frutales	0.100	0.150	0.250	0.300	0.400	0.450	0.600	0.750
Café	0.300	0.600	0.750	0.900	1.000	1.000	1.000	1.000
Hortalizas (altiplano)	0.800	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Esta tabla debe interpretarse como sigue: si una unidad de área de **árboles frutales** es afectada por una altura de inundación de 0.375 metros, se puede esperar una pérdida del 15%, mientras que si se tratara de **banano**, se esperaría una pérdida del 40%. Esta función de daño, toma en consideración dos variables que caracterizan la amenaza, la altura de inundación y la deposición de sedimentos. La variable que define la vulnerabilidad es el tipo de cultivo. Estas funciones no se limitan a relaciones entre aspectos físicos, existen

funciones que incluyen variables sociales. Zhai, et. al. (70) encontraron que para el caso de inundaciones en una zona urbana de Japón la tenencia y la ocupación de la vivienda, juegan un papel importante en la determinación de las pérdidas económicas.

Una verdadera estimación de riesgo debe considerar la contribución, tanto de eventos pequeños y muy frecuentes, como de eventos grandes y poco frecuentes. Es fácil comprender que un lugar cualquiera, esta sujeto a ser afectado por eventos de distinta magnitud y de distinta probabilidad de ocurrencia, cada uno de los cuales contribuye en cierta medida al riesgo. Al estimar la contribución de cada uno de estos eventos para un período de tiempo específico, comúnmente para un año, se encontrará el riesgo de daños promedio esperados por año, a lo largo de muchos años (10). Sin embargo el hacer este tipo de evaluaciones puede no justificarse salvo en casos extraordinarios y por consiguiente es necesario recurrir a indicadores.

4.1.3.2 Comparación con el "cómo se quiere estar"; definir el riesgo aceptable.

Douglas citado por Cardona (5) indica que, sin importar como se mida el riesgo y cual sea la concepción sobre el mismo, es necesario tener un punto de referencia para estimar cuando determinadas pérdidas puedan ser significativas o no, aceptables o no para quienes deben sufrirlas. En términos generales, se reconoce que la definición de estos umbrales de aceptabilidad es un asunto de costo beneficio, y la decisión final dependerá de la percepción y la actitud, tanto frente al riesgo como a las alternativas para su manejo en un determinado período de tiempo. Se han hecho esfuerzos para identificar estos umbrales de riesgo, en la línea de lo que la sociedad considera como aceptable (Ver Tabla 2).

Tabla 2: Probabilidades de muerte aceptables según algunos autores y normativas.

AUTOR	PROBABILIDAD DE MUERTE ACEPTABLE	CONDICIONES
Starr ¹	0.0001	Riesgos voluntarios en países desarrollados.
Starr ¹	0.000001 – 0.00000001	Riesgos involuntarios en países desarrollados.
Norma NEHRP (EEUU) ¹	0.0001	Por colapso de estructuras en sismos
Wiggins ¹	0.000001	Costo óptimo para normativa del Oeste de EEUU.
Chief Medical Officer ²	0.001	Con beneficios por tomar ese riesgo en el Reino Unido.
1. Tomado de Cardona (2001). 2. Tomado de Newhall (2001).		

Existe discusión de carácter ético, sobre si la definición de tales niveles de seguridad deben hacerlas las autoridades competentes; quienes la defienden se fundamentan en que estas son instituciones aprobadas por la sociedad (en un estado democrático) elegidas para asumir responsabilidades y decisiones en nombre del colectivo. Dentro de todo lo

anterior, la definición de normas de construcción o de uso de la tierra por parte de autoridades competentes, implica de alguna manera la definición de riesgo aceptable (5).

Estos enfoques son parciales, en el sentido que pasan por alto la magnitud total del impacto y que en buena medida definen la concepción de los desastres. Esto puede ilustrarse con el siguiente ejemplo de las condiciones de riesgo en el Volcán de Fuego. Se ha estimado que en una comunidad de los alrededores, una persona tiene una probabilidad anual de 0.001 de morir por una erupción, media vez la erupción no permita reaccionar a la población y se habite en el lugar el 100% del tiempo. Esta es la misma probabilidad que existe de que mueran aproximadamente 33,000 personas (13). Para comparar, cabe preguntarse ¿cual es la probabilidad que en Guatemala mueran 25,000 personas en un mismo día, de causas cotidianas como un infarto, o incluso en un accidente?. Helm citado por Cardona (5) encontró una relación lineal inversa entre la magnitud y la tolerancia, y propone los siguientes límites y categorías de riesgo.

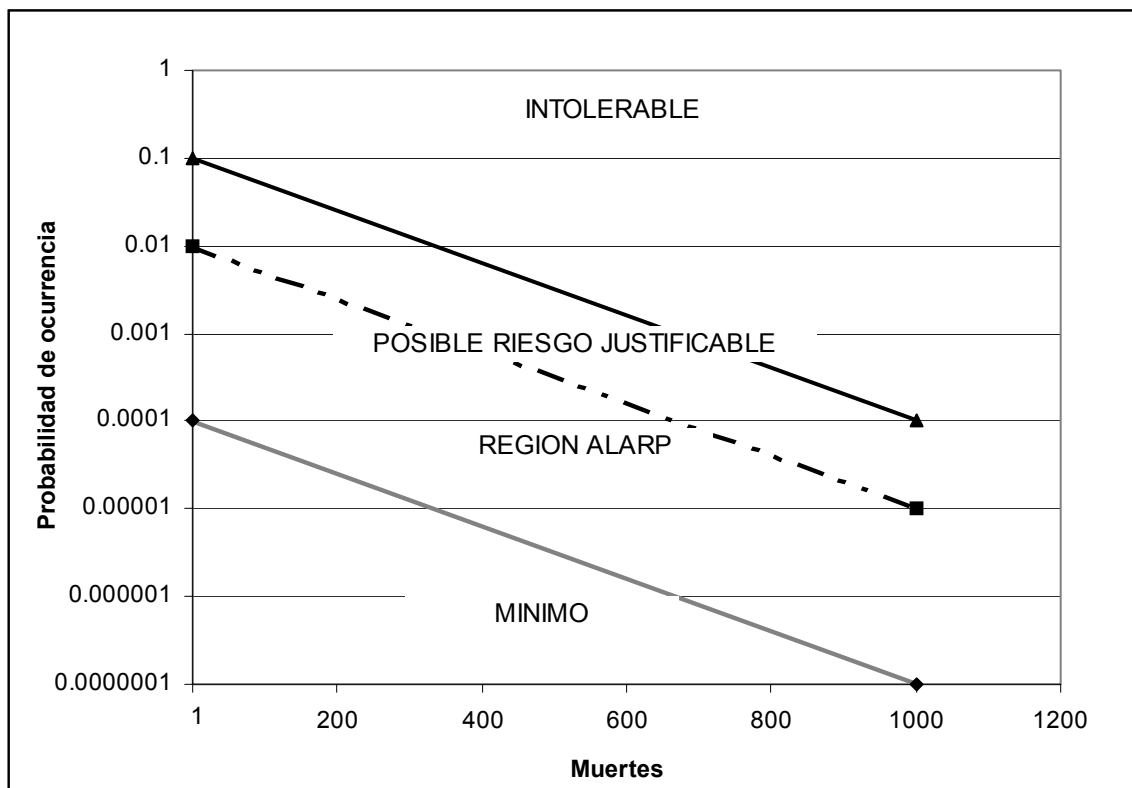


Figura 5: Regiones de riesgo propuestas por Helm (Cardona, 2001).

- INTOLERABLE: Región en donde la alta frecuencia de sucesos y la severidad de sus consecuencias exceden la aceptabilidad local del número de muertos por accidentes industriales o eventos similares. En esta región "el riesgo no puede ser justificado excepto en circunstancias extraordinarias".
- POSIBLEMENTE INJUSTIFICABLE: El riesgo es "tolerable solo si su reducción no es práctica o si su costo es desproporcionado en relación con el mejoramiento logrado". Esta región es la parte alta de una región denominada ALARP (as low as reasonably posible = tan bajo como sea razonablemente posible), que significa que el riesgo es tolerado en la medida que se toman medidas prácticas razonables para reducirlo.

- REGION BAJA DE ALARP: Región donde el riesgo no es despreciable, pero es "tolerable si el costo de su reducción puede exceder en mucho el mejoramiento obtenido mediante medidas de mitigación".
- AMPLIAMENTE ACEPTADO: En esta región por debajo de la línea mínima, la frecuencia y magnitud son tan bajas que pueden ser despreciados.

Nótese que las condiciones de riesgo en el volcán de Fuego por su frecuencia y magnitud se ubican dentro de la región INTOLERABLE.

Existe otro enfoque, basado en el costo óptimo, que en el caso de las pérdidas económicas (riesgo), puede ser relativamente simple establecer un nivel de aceptabilidad, basándose en la optimización de las utilidades, con las mayores dificultades provenientes de la correcta valoración de los costos y beneficios indirectos. Pero al tratarse de pérdida de vidas humanas, la definición de estos umbrales entraña una dificultad mayor, dados los conflictos que suscita valorar la vida humana. Howard citado por Cardona (5), presenta una alternativa que no valora la vida directamente y caracteriza dos aspectos; el primero que muestra el pago que un individuo requeriría por aceptar un riesgo adicional al que comúnmente enfrenta y el segundo, el pago que un individuo estaría dispuesto a efectuar voluntariamente para evitar un riesgo. Los resultados obtenidos por Howard se presentan en la Figura 6.

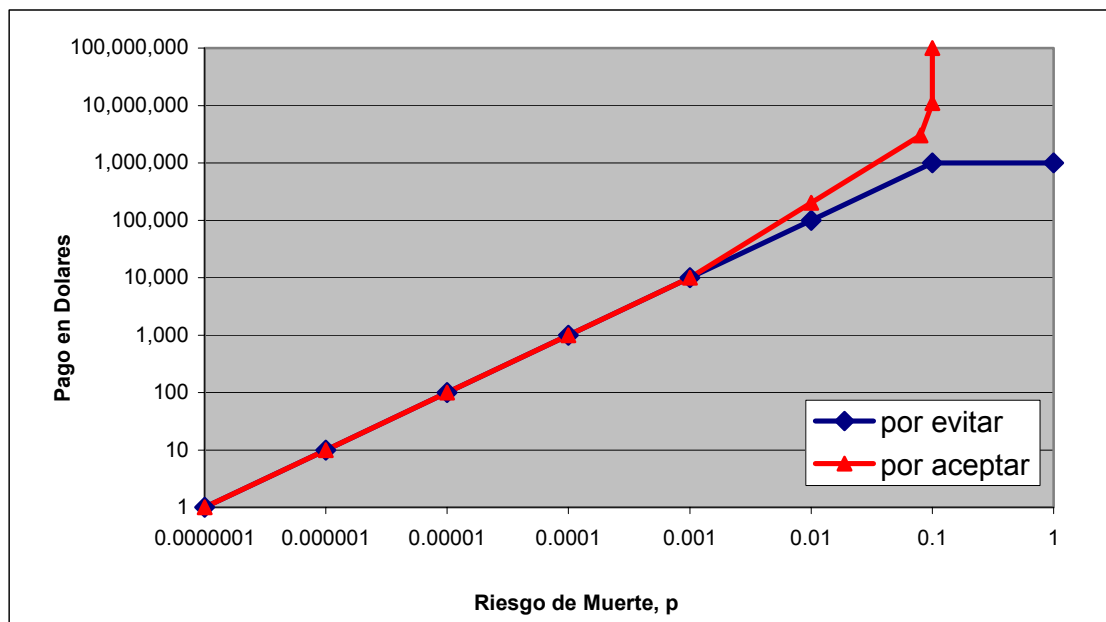


Figura 6: Pago que una persona requeriría por aceptar riesgo adicional y pago que una persona efectuaría por eliminar un riesgo (Cardona, 2001).

Trabajos como este pueden orientar al estado en cuanto a la cantidad de recursos que se deben invertir para reducir el riesgo de pérdida de vidas, bajo determinadas condiciones de riesgo.

La definición de riesgo aceptable sobre la base del óptimo económico se determina estimándose los costos de las posibles pérdidas para distintos eventos (amenazas) dentro de un rango de estos y luego sumando a estas pérdidas, los costos de inversión para "librarse" del posible daño que estos eventos podrían suponer. A medida que el período de

retorno de diseño se incrementa, la inversión por realizar se incrementa, pero los daños esperados disminuyen debido a que se proporciona una mejor protección (10). Sumando el valor de la inversión y los costos de los daños esperados anualmente, puede encontrarse el período de retorno (inverso de la probabilidad de ocurrencia) de diseño que tenga los menores costos totales (Ver Figura 7).

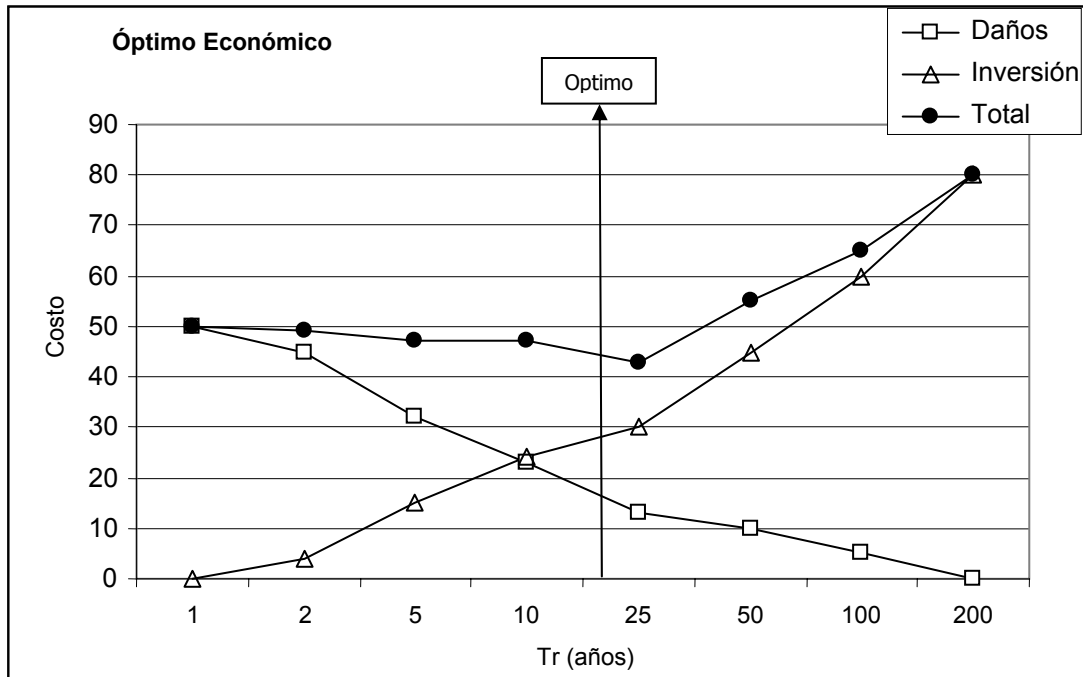


Figura 7: Determinación del óptimo económico para un rango de eventos dado (Adaptado de Chow, 2000).

4.1.3.3 Análisis de las causas del problema

El establecimiento de las relaciones causa efecto puede en muchos casos ser algo intuitivo, pero no por ello intrascendente. Por ejemplo, se sabe que la causa directa de muertes más importante por la ocurrencia del terremoto de 1976 fue el colapso de viviendas, y que estas fallaron porque no fueron diseñadas y construidas para resistir sismos (66). De aquí que la respuesta a un problema de riesgo ante sismos puede ser muy simple y decirse que con tener diseños y construcciones sismorresistentes sería suficiente, y en gran medida esto es cierto, pero luego surge la pregunta de ¿cómo lograr esto?. De esta se derivan otras mas, por ejemplo ¿por que gran cantidad de personas construyen con adobe?, nuevamente una respuesta relativamente simple es por falta de recursos. De aquí se podría pensar que con una mejora en los ingresos económicos de las personas el problema del riesgo sísmico podría resolverse en buena medida. Sin embargo Monzón (52) indica que una preocupación actual para el riesgo ante sismos, son las viviendas que originalmente fueron construidas de un nivel y ahora tienen dos o tres niveles, muchas de las cuales han sido ampliadas gracias a las remesas familiares y una evidente mejoría en los ingresos económicos.

Otro de los aspectos importantes en este paso de la gestión del riesgo, lo constituye la identificación de responsabilidades y las capacidades para su cumplimiento. La Constitución Política de la República en el capítulo VII,

artículo 253, inciso C, establece que las municipalidades deben atender el ordenamiento territorial de su jurisdicción. De aquí que si se identifica que no existe un esquema de ordenamiento territorial en un municipio dado, no pueden aducirse sus causas a alguna condición de la población, es claro que sería por falta de atención por parte de la municipalidad. Claro que luego cabe preguntarse por qué la falta de atención, y surgirán una serie de respuestas como desconocimiento, falta de recursos para realizarlos, hasta negligencia. Muchas de estas convergerán sobre la línea de cual es la capacidad existente para cumplir estas responsabilidades. De lo anterior es fácil comprender como el siguiente paso es plantearse los cambios que se deben realizar y como se deben realizar, sobre la base de un modelo que defina las responsabilidades de los distintos actores. En este sentido Bollin (1), indica que los criterios para la distribución de competencias deben ser, en principio en donde se encuentra la necesidad y la capacidad para el mejor cumplimiento de la misma. Pero dentro del marco de la descentralización debería tener prioridad la necesidad y apoyarse a los actores locales con recursos personales, técnicos y económicos para que desempeñen de la mejor manera sus funciones. Es importante mencionar que esto es parte de lo que algunos autores llaman Vulnerabilidad Social.

4.1.3.4 Plantear las soluciones: ¿qué cosas y cómo deben hacerse para estar cómo se quiere?

El planteamiento de opciones de solución deberá surgir de un correcto planteamiento del problema del riesgo, para que realmente consigan reducirlo. Idealmente las opciones de solución pueden considerarse como proyectos, y cumplir con evaluaciones de prefactibilidad y factibilidad, con indicadores de viabilidad económica, social y técnica. Pero que incluyen dentro del análisis costo-beneficio la medida en que se reduciría el riesgo al ejecutarse la opción de solución.

Una vez planteadas las opciones estas podrán ser elegidas en base a una serie de criterios preestablecidos para cada uno de los indicadores. Una vez seleccionada, esta deberá diseñarse y ejecutarse. Para casos particulares el plantear las opciones y evaluarlas puede ser también algo relativamente simple; el caso de una comunidad en riesgo por deslizamientos en una zona rural, es un ejemplo claro. Suponiendo que ya se ha estimado el grado de riesgo y se ha determinado que este es inaceptable, se puede pensar en dos opciones: estabilizar el terreno o trasladar a la comunidad. En Guatemala la estabilización de laderas representa costos tan elevados que superan de 10 a 100 veces el valor de lo que puede perderse en el ámbito rural. De esta cuenta la opción económicamente más viable es el traslado, sin embargo es necesario tener en cuenta el contexto social para minimizar los impactos negativos que el mismo traslado puede tener. Los casos de El Palmar en Quetzaltenango y Santa Catarina Ixtahuacán en Sololá, son una muestra de como las relaciones sociales fueron alteradas por un traslado, desembocando en conflictos sociales y la fragmentación de la población (50).

Pero normalmente no son casos aislados los que se dan y es necesario el establecimiento de una estrategia y una política para su tratamiento. Cardona (5) indica que el riesgo es un problema de política pública, que implican un proceso de aprendizaje continuo y la clara distribución de responsabilidades. Esto implica a un nivel nacional, establecer una estructura capaz de sostener el proceso de gestión de riesgo mismo que integre todos los niveles,

desde lo nacional hasta lo local, y que contenga responsabilidades definidas, asignación de recursos y mecanismos apropiados de control.

4.1.3.5 Ejecutar las acciones planteadas

Aunque en principio esto puede resultar obvio, es necesario reafirmarlo, considerando que en muchas ocasiones estas acciones planteadas no se ejecutan. Dentro de la ejecución, es de gran importancia establecer los mecanismos de control pertinentes que permitan asegurar que esta se está realizando conforme lo diseñado.

4.1.4 PROBABILIDAD

Al tratar el riesgo, surge siempre el concepto de probabilidad y por consiguiente es fundamental comprender lo que representa y algunas de las propiedades analíticas asociadas a la misma. Una variable aleatoria X es una variable descrita por una distribución de probabilidad. Esta distribución determina la posibilidad de que una observación x de la variable, caiga en un rango especificado de X (10). Así la probabilidad puede considerarse como una medida de la incertidumbre de que algo ocurra o no ocurra.

Un conjunto de observaciones se denomina una muestra y se supone que estas se sacan de una hipotética población infinita con propiedades estadísticas constantes. Sin embargo las propiedades estadísticas de una muestra a otra, sacadas de una misma población pueden variar. Al conjunto de todas las muestras se le llama espacio muestral y un evento es un subconjunto del espacio muestral. La probabilidad de un evento es la posibilidad de que este ocurra cuando se hace una observación de la variable aleatoria, y esta probabilidad puede estimarse.

Si en una muestra de n observaciones se tiene n_a valores en el rango del evento A , entonces la frecuencia relativa de A es n_a/n . A medida que el tamaño de la muestra aumenta, la frecuencia relativa se convierte progresivamente en una estimación mejor de la probabilidad del evento.

Las probabilidades de eventos obedecen ciertos principios:

Probabilidad total: si el espacio muestral Ω está completamente dividido en m eventos o áreas no traslapadas A_1, A_2, \dots, A_m , entonces

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_m) = P(\Omega) = 1$$

Complementariedad: se sigue que si \bar{A} es el complemento de A , es decir, $\bar{A} = \Omega - A$, entonces

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A)$$

Probabilidad condicional: suponiendo la existencia de dos eventos A y B. El evento de que tanto A como B ocurran es su intersección $A \cap B$. Si $P(B/A)$ es la probabilidad condicional de que ocurra B dado que ya ha ocurrido A, entonces la probabilidad conjunta de que A y B ocurran $P(A \cap B)$, es el producto de $P(B/A)$ y la probabilidad de que A ocurra, es decir

$$P(B|A) = P(A \cap B) / P(A)$$

Si la ocurrencia de B no depende de la ocurrencia de A, entonces se dice que los eventos son independientes y $P(B|A) = P(B)$. Así para eventos independientes

$$P(A \cap B) = P(A) P(B)$$

4.1.5 LA CUENCA CÓMO UNIDAD DE PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

4.1.5.1 Cuenca Hidrográfica

García Pelayo citado por Herrera (24) define a la cuenca como un territorio cuyas aguas fluyen a un mismo río, lago o mar. La FAO la define como una unidad fisiográfica que corresponde al área de acopio de un sistema de cursos de agua definidos por el relieve (24). Sin embargo mas importante que una definición, es el hecho de que en este espacio geográfico se expresan al máximo las interrelaciones entre los recursos naturales agua, suelo, bosque y subsuelo; por lo que se considera como la unidad natural ideal para el manejo de los recursos naturales.

Los recursos naturales están íntimamente relacionados entre sí y con el sistema de vida del hombre, y es por esta razón, que la cuenca se convierte en la unidad ideal para el manejo de los recursos naturales (18). El agua en movimiento comunica los eventos en la cuenca y es el agente más importante en los procesos dentro de la cuenca cómo:

- a. Intemperización de materiales geológicos
- b. Formación y degradación de suelos
- c. Transporte de sedimentos
- d. Desarrollo de la vegetación

4.1.5.2 El Manejo de Cuencas

Las interrelaciones ya mencionadas, son el fundamento de los principios y fortalezas del manejo de los recursos naturales dentro de una cuenca hidrográfica. En resumen la cuenca es el contexto biofísico dentro del cual se lleva a cabo el desarrollo de las sociedades y el manejo de cuencas es por lo tanto el proceso de organizar y guiar el uso de la tierra y de otros recursos dentro de la misma, para obtener bienes y servicios deseados; en forma tal que estas interrelaciones que aseguran su disponibilidad, sean alteradas lo menos posible o mejoradas de ser posible (2).

Este manejo de los recursos de una cuenca, para producir más de un tipo de producto o amenidad, refleja el concepto de uso múltiple. Una perspectiva de uso múltiple es necesaria para alcanzar la sostenibilidad en el manejo integrado

de cuencas. La clave está en diseñar estrategias de manejo de estas zonas, que incrementen y diversifiquen las fuentes de ingresos a través de la producción de recursos naturales y agrícolas, pero bajo condiciones que promuevan los objetivos de conservación de suelo y agua (2).

A. Concepto de Uso Múltiple

El concepto de uso múltiple puede ser aplicado ya sea a porciones de tierra o a un recurso natural en particular. Aplicado a porciones de tierra, se refiere al manejo de una diversidad de productos de recursos naturales, amenidades o combinaciones de estos. Las relaciones entre productos pueden ser complementarias, suplementarias o competitivas. En una relación complementaria, los productos se incrementan juntos; en una suplementaria, los cambios en uno no afectan al otro; y en una competitiva, un producto debe ser sacrificado para obtener más de otro (2).

Aplicado a un recurso en particular se refiere a la utilización del mismo para varios propósitos. El agua por ejemplo puede ser usada para riego, operaciones industriales, generación de energía y recreación; el bosque puede ser usado para producir madera, pulpa y combustible; el forraje puede ser usado por el ganado o por especies de vida silvestre y como estabilizador del suelo. Aquí también los distintos usos de un mismo recurso, pueden tener relaciones complementarias, suplementarias o competitivas (2).

B. Objetivos del Uso Múltiple

El objetivo del uso múltiple, es manejar la mezcla de recursos naturales, para lograr la mejor combinación de usos presentes y futuros. La maximización de los beneficios de un recurso en particular se ha vuelto más importante a medida que se incrementa la competencia por productos de recursos naturales limitados e interrelacionados (2).

Cada cuenca no necesariamente debe ser manejada para todos los posibles productos de recursos naturales simultáneamente. En cambio, la mayoría de cuencas son usadas para una amplia gama de productos y amenidades de recursos naturales, dictado por los niveles relativos de oferta y demanda. El uso múltiple puede ser alcanzado por una o más de las siguientes opciones:

- Uso concurrente y continuo de una diversidad de productos de recursos naturales obtenibles en una cuenca en particular, requiriendo de la producción de productos y servicios en la misma área.
- Alternando o rotando el uso de varios productos de recursos naturales (o una combinación de los mismos) en una cuenca.
- Separación geográfica de usos o combinaciones de usos, para que el uso múltiple se logre a través de un mosaico de unidades de manejo dentro de la cuenca, con cualquier unidad de tierra en particular, siendo usada para lo que es más apta.

Todas estas son opciones legítimas de uso múltiple y por lo tanto, deben ser aplicadas en las combinaciones más apropiadas. En la medida de lo posible, un uso múltiple efectivo debe acomodar el espectro completo de las necesidades de hoy, a la vez que se asegure la provisión de los requerimientos de mañana (2).

C. Tipos de Uso Múltiple

Como ya se mencionó, el uso múltiple puede orientarse a los distintos usos de un recurso en particular o a los distintos recursos dentro de un área (Figura 8). En el primer caso, el manejo debe hacerse sobre la base del conocimiento de las interrelaciones que describen como el manejo de un recurso afecta el uso de otro, o como determinado uso afecta otros usos del mismo recurso. En el segundo caso, se integran el conocimiento de estas interrelaciones con la dinámica de las demandas locales, regionales y nacionales (2).

La implementación del uso múltiple, generalmente involucra el desarrollo, aplicación y evaluación de prácticas de manejo que alteran la producción de recursos naturales o agrícolas. Sin embargo estos impactos pueden extenderse a otros productos y/o amenidades. Muchos productos son demandados y estos deben ser ubicados eficientemente para maximizar los beneficios a la sociedad. Igualmente se deben minimizar los impactos adversos, como inundaciones, contaminación del agua, etc. Comúnmente, prácticas de manejo de los recursos, diseñadas para alterar la producción de bienes y amenidades, son recomendados por varios grupos de interés. Algunas de estas prácticas pueden poner en juego otros valores asociados al recurso o peor aún, pueden ser irrevocables en el corto plazo y no pueden deshacerse si resultan ser una equivocación (2). Por eso, para integrar de manera efectiva el uso múltiple y el manejo de cuencas, se necesita lo siguiente:

- Mediciones en sitio, de la producción de recursos naturales y agrícolas, para las alternativas de prácticas de uso múltiple siendo consideradas.
- Conocimiento de los costos y beneficios asociados con cada alternativa y
- Reconocimiento de las externalidades, eso es, los efectos fuera de sitio de las alternativas en consideración.

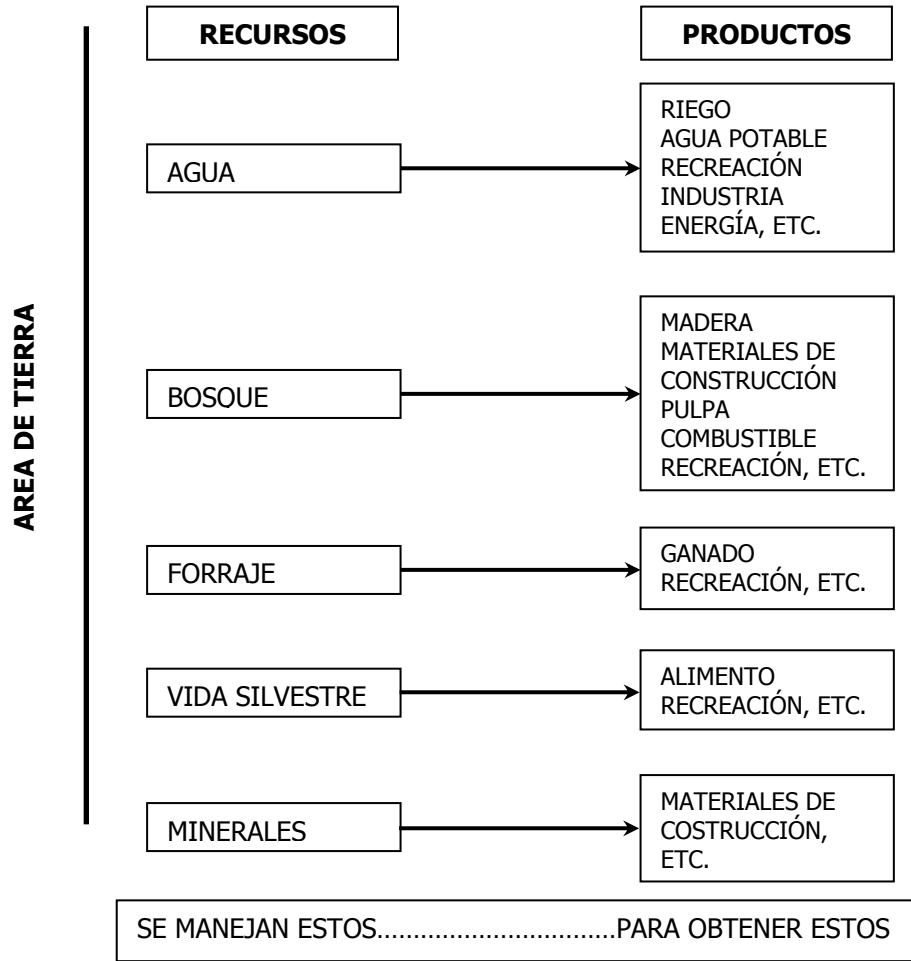


Figura 8: Uso múltiple de los recursos (Brooks et. al., 1998).

4.1.6 ZONIFICACIÓN PARA EL USO CORRECTO

De acuerdo con la teoría del riesgo a desastres, para que este se presente, es condición necesaria que la amenaza y la vulnerabilidad ocurran en un mismo territorio, por consiguiente si se evita la ocupación de áreas amenazadas, el riesgo se elimina. Este planteamiento es en la teoría simple, pero se complica ante la necesidad de hacer uso del territorio para fines de habitación o producción. Así, es necesario establecer restricciones en la ocupación de determinadas áreas, sobre la base de la probabilidad que estas tengan de ser afectadas por determinada amenaza, el daño o pérdidas que podrían causar y lo que se defina como riesgo aceptable.

Si se entiende entonces el manejo de cuenca como el proceso de organizar y guiar el uso de la tierra y de otros recursos dentro de la misma, para obtener bienes y servicios deseados, entonces es fácil comprender el vinculo que puede existir entre la reducción del riesgo a desastres y el manejo de cuencas. Sin embargo existe un aspecto importante de conciliar; tradicionalmente se piensa en el manejo de cuenca como un medio para organizar las actividades productivas del hombre, de manera tal que se evite el deterioro de los recursos naturales y el entorno. Por su parte, la reducción del riesgo a desastres pretende evitar el deterioro de las actividades productivas del hombre

ante la incidencia del entorno natural. Esto podría parecer antagónico, pero a juicio del autor, simplemente son estos los límites dentro de los cuales se debe desarrollar la actividad humana, como se esquematiza en la Figura 9.

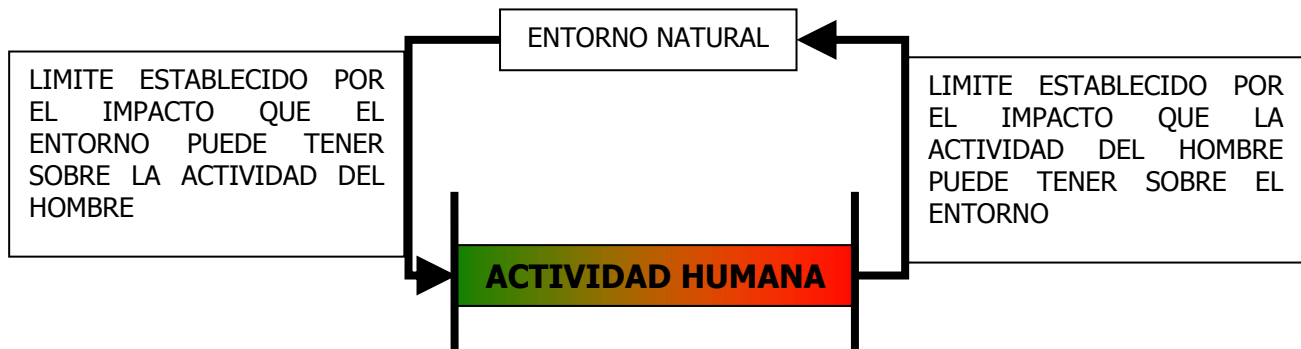


Figura 9: Relación de límites entre la actividad humana y el entorno natural (elaboración propia).

4.1.6.1 Criterios de zonificación

De acuerdo con lo anterior, entonces deberán desarrollarse dos grupos de criterios de distinta naturaleza para limitar una sola cosa, la actividad del hombre. En el caso del impacto que la actividad humana puede tener sobre la disponibilidad de los recursos agua y suelo (entorno), existen dos herramientas, que de hecho definen el deterioro permisible de los mismos. En el caso del agua se refiere a la protección de zonas de recarga hídrica y en el caso del suelo a el uso del mismo de acuerdo a su "capacidad de uso". La recarga hídrica es la acción de ingreso de agua hacia un cuerpo de agua subterránea, y una zona de recarga hídrica son aquellas áreas en donde ocurre el ingreso del agua hacia los cuerpos de agua subterránea. Una definición teórica, indica que una zona de recarga es una zona a partir de la cual el agua se aleja, o bien la zona desde la cual divergen las líneas de flujo. La definición de estas áreas es un trabajo extenso que se aleja de los alcances del presente trabajo.

En el caso del suelo, la herramienta existente son las metodologías para la determinación de capacidad de uso de la tierra. De acuerdo con Klingebiel y Montgomery (25) la capacidad de uso de la tierra es la "determinación en términos físicos, del soporte que tiene una unidad de tierra de ser utilizada para determinados usos o coberturas y/o tratamientos. Generalmente se basa en el principio de la máxima intensidad de uso soportable sin causar deterioro físico del suelo". Sobre este concepto, el INAB desarrolló una metodología de clasificación de tierras por capacidad de uso, en donde establece las siguientes categorías de uso, ordenadas de mayor a menor intensidad:

- (A) Agricultura sin limitaciones
- (Am) Agricultura con mejoras
- (Aa) Agroforestería con cultivos anuales
- (Ss) Sistemas silvopastoriles
- (Ap) Agroforestería con cultivos permanentes
- (F) Tierras forestales para producción
- (Fp) Tierras forestales de protección

De acuerdo al principio en que se basa la metodología del INAB, una unidad de tierra clasificada dentro de una categoría de uso intensivo no excluye el hecho de que pueda ser utilizada para otra categoría menos intensiva. Lo contrario no se considera técnicamente posible, es decir, una unidad clasificada con capacidad de uso forestal, no soporta usos más intensivos, tales como los agrícolas o pecuarios sin que se ponga en riesgo la estabilidad del recurso suelo (25).

Para determinar la categoría de uso, que como máximo una unidad de tierra es capaz de soportar, la metodología del INAB hace uso de tres variables fundamentales. La primera de ellas es lo que se ha denominado "regiones naturales" que es una zonificación del país que pretende considerar variables geológicas, topográficas, climáticas y edáficas. La segunda es la profundidad efectiva del suelo y la pendiente máxima del terreno. Estas se evalúan sobre una serie de matrices que relacionan las tres variables para definir el uso máximo que una unidad de tierra es capaz de soportar. Adicionalmente a esto se incluyen la pedregosidad y el drenaje como factores que pueden modificar la capacidad de uso de la tierra, debido a los problemas de manejo y productividad que estos factores suponen (25).

Dado que la capacidad de uso de la tierra pretende la conservación del recurso suelo, las categorías de uso se han definido pensando en el uso del suelo para actividades productivas primarias (agrícola y forestal) y dentro de estas se ha utilizado el criterio de cobertura vegetal. A mayor y más compleja, mayor protección se proporciona al suelo contra la erosión. Este criterio pierde valor cuando se trata de otras actividades del hombre, como por ejemplo la habitación. Queda claro que una vivienda proporcionaría una protección muy alta ante la erosión del suelo sobre el criterio de la cobertura, sin embargo el suelo queda inutilizable para otros fines.

El segundo grupo de criterios está dado por el nivel de riesgo aceptable para cada actividad, definidos ya sea por percepción, es decir el nivel de seguridad que se espera tenga esta o por determinación de un óptimo económico (Ver inciso 4.1.4).

4.1.6.2 Amenazas Naturales

La caracterización de amenazas supone la determinación de la relación entre la magnitud de los eventos y su probabilidad de ocurrencia, y el área geográfica que eventos de determinada magnitud pueden ocupar. En este sentido el área que una amenaza en particular puede ocupar o sobre la que puede incidir es dependiente de su magnitud. En la caracterización de las amenazas, es importante mencionar que existe una relación inversa entre la probabilidad de ocurrencia y la magnitud de las mismas. Así, los eventos más frecuentes son de menor magnitud, y los eventos de menor frecuencia son de mayor magnitud (60).

A. Sismos

Un sismo se puede considerar como el movimiento de una porción de la Tierra sólida, generado por la propagación de ondas elásticas. Las ondas elásticas se generan debido a la respuesta elástica que el material que compone la litosfera y el manto presenta al romperse, cuando este es deformado mas allá de su resistencia a la falla (57). Partiendo de esta definición, se deriva una particularidad de los sismos, en el sentido que por si mismos no representa una amenaza para la vida humana en forma directa. Son los fenómenos asociados a los sismos y su interacción con obras civiles las que realmente representan amenazas para la vida humana. Por otro lado, para las obras civiles los sismos si representan una amenaza. En la Figura 10 se muestran los fenómenos asociados a los sismos y su relación con los daños que pueden producir.

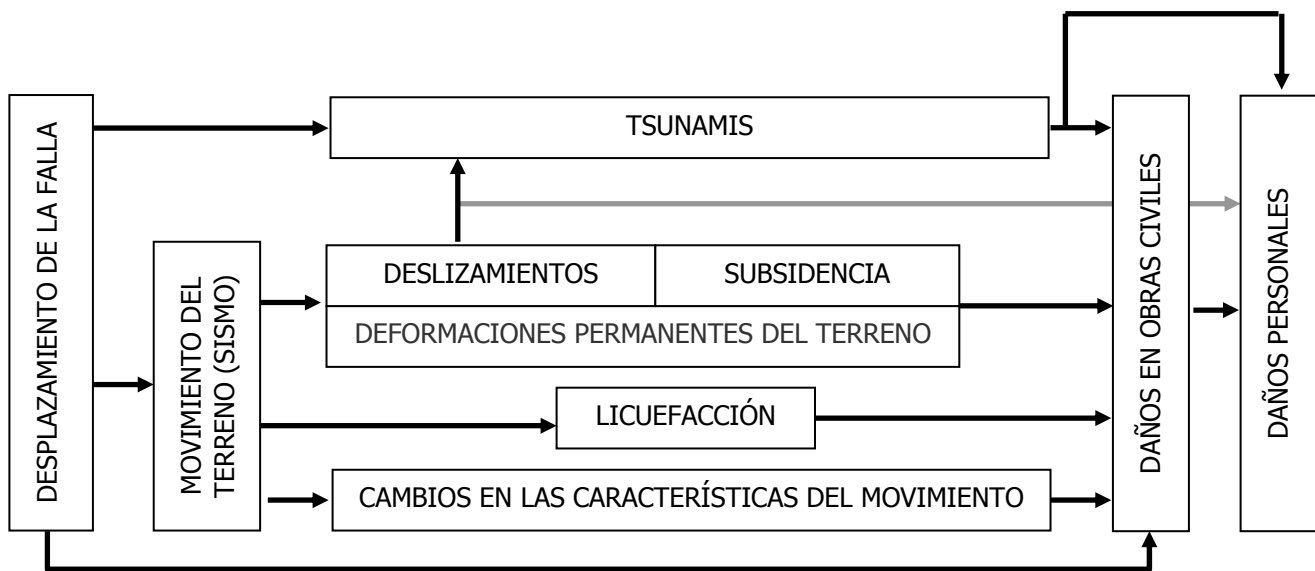


Figura 10: Relación de fenómenos y daños asociados a los sismos (basado en Molina, Et. Al., 1996).

Debido a que tanto tsunamis, deslizamientos y la subsidencia pueden ser producidos por otros procesos, estos se tratan como amenazas en forma independiente, y en su análisis se consideran los desplazamientos de falla y los sismos como “disparadores”.

Normalmente para el movimiento sísmico, no se establecen zonificaciones con restricciones respecto a la ocupación del área, sino mas bien con respecto a las características de las obras civiles que podrían ser emplazadas en estas zonas. En principio, a juicio del autor, esto responde a tres consideraciones: primero que el movimiento como tal, no implica cambios permanentes en el terreno; esto se puede reconocer fácilmente si se compara con la amenaza de deslizamientos, la cual implica la remoción (cambio) del terreno mismo y su deposición en otro sitio. La segunda consideración es el concepto de “normalidad” en las cualidades de las construcciones; esto se refiere a que existe la idea generalizada que la tecnología constructiva (materiales, estructuras, diseño, etc.) de uso común, puede y debe ser capaz de soportar movimientos sísmicos de determinada magnitud. La tercera consideración, es que la amenaza sísmica abarca grandes áreas continuas y por consiguiente las restricciones de uso son impracticables. Esto deja únicamente la licuefacción como parte de la amenaza sísmica susceptible de ser zonificada y aplicar restricciones de

uso. De acuerdo con el Soil Liquefaction Web Site de la Universidad de Washington (33), el fenómeno de licuefacción ocurre preferentemente en suelos de granulometría uniforme y no cohesivos (gravas, arenas y limos), con granos redondeados, poco consolidados y bajo condiciones de saturación.

B. Actividad Volcánica

Un volcán se define como cualquier abertura en la superficie de la Tierra a través de la cual es extruído magma (12), mientras que el cono que se genera por la acumulación de material expulsado, se conoce como edificio volcánico. El volcán como tal no representa una amenaza, sino los fenómenos asociados a los mismos y al edificio volcánico, en especial en períodos de actividad volcánica. De acuerdo con Wallance, Et. Al. (68), los fenómenos volcánicos que representan amenazas son: la caída de tefra, los flujos y oleadas piroclásticas, los flujos de lava, los gases volcánicos, las avalanchas de escombros, deslizamientos y lahares (o flujos de escombros).

En la Figura 11 se muestran las distintas amenazas asociadas a los edificios volcánicos, tanto durante períodos de actividad como en ausencia de la misma. La mayor parte de estos son causados por la emisión (erupción) de roca fundida o magma, pero otros como los deslizamientos y lahares (flujos de lodo y escombros), pueden ocurrir sin estar asociados a la emisión de material. Aunque todos estos procesos tienen una fenomenología distinta, para fines de planificación del uso de la tierra pueden agruparse espacialmente de acuerdo a las implicaciones de riesgo que presentan. Así por ejemplo un área que puede ser afectada por flujos de lava y flujos piroclásticos no requiere diferenciaciones entre ambas, porque es válido asumir que su capacidad de producir daño es similar.

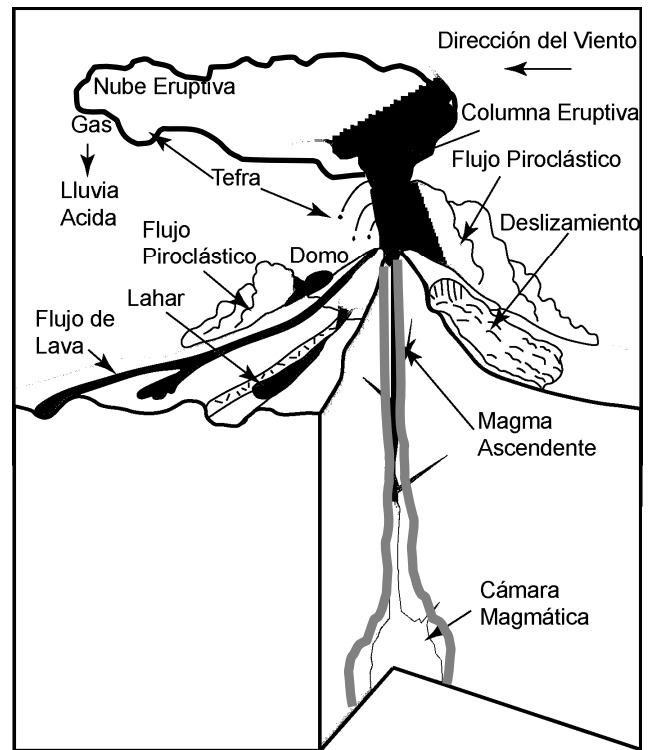


Figura 11: Amenazas asociadas a los edificios volcánicos (Wallance, 2001).

En la determinación de las áreas que podrían ser afectadas por todos estos, con excepción de los lahares, se utilizan los reportes históricos y el registro geológico. De acuerdo con Newhall (53), utilizando como base los registros históricos y geológicos, se puede estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos de distintas magnitudes, expresadas por medio del Índice de Explosividad Volcánica o VEI por sus siglas en inglés (Volcanic Explosivity Index). La figura 12 muestra la relación entre magnitud expresada como VEI y frecuencia de erupciones en el Holoceno a nivel global, la cual muestra que en el rango de VEI 2 a 7, la frecuencia se duplica con una reducción unitaria del VEI.

Una vez establecida la probabilidad de una erupción de determinada magnitud, es posible establecer las áreas que pueden ser afectadas por distintos fenómenos, ya sea en base a los eventos históricos o a relaciones empíricas obtenidas del registro histórico global. La tabla 3 muestra la probabilidad de excedencia encontrada para erupciones de distinto VEI, caída vertical de la columna eruptiva y el recorrido de flujos piroclásticos.

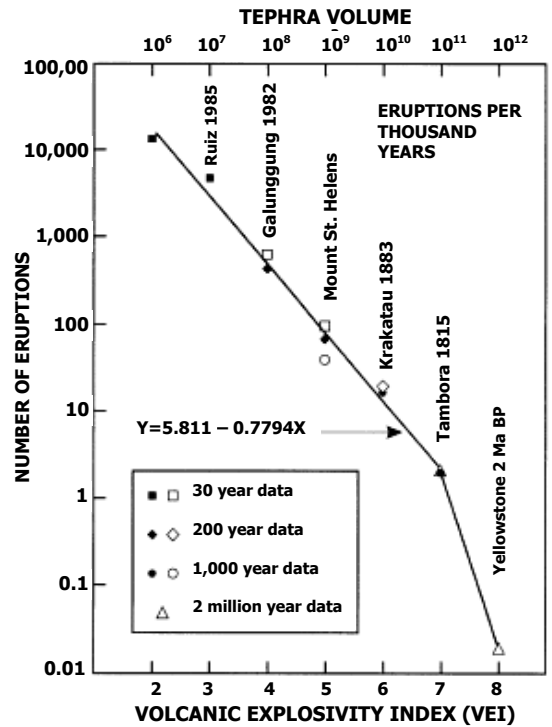


Figura 12: Relaciones entre magnitud y frecuencia de erupciones en el Holoceno a nivel global (Newhall, 2001).

Tabla 3: Relación empírica entre VEI, altura de la columna eruptiva (H) y recorrido de flujos piroclásticos en km. (Newhall, 2001).

Flujos ordenados de acuerdo al VEI y la caída vertical de la columna eruptiva.

	n	Probabilidad de excedencia										
		0.95	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05
VEI 1-2, todas H	78	1.1	1.5	2.3	3.0	3.7	4.4	5.3	6.3	7.3	9.9	11.8
H=0-1.0 Km	23	1.1	1.3	1.5	1.6	2.3	3.0	3.5	4.1	5.0	6.3	
H=1.1-1.9 Km	24	0.9	1.1	2.0	2.4	2.8	3.1	3.4	4.6	5.2	5.9	9.0
H≥2 Km	31	4.1	4.4	4.9	6.5	6.9	7.2	7.4	8.2	10.5	11.9	13.5
VEI 3, todas H	31	3.0	3.9	4.7	5.2	5.6	6.0	6.6	7.6	9.5	13.1	16.9
H=0-1.0 Km	8			3.6	3.9	4.6	5.2	5.4	5.6	5.8		
H=1.1-1.9 Km	7			3.9	5.5	6.0	6.5	6.9	7.3	7.7		
H≥2 Km	16	4.6	4.8	5.2	5.8	6.5	7.6	9.0	10.9	12.8	14.5	15.2
VEI 4-5, todas H	49	2.7	4.4	7.2	8.6	9.9	11.1	12.5	14.5	17.7	24.9	31.3
H=0-1.0 Km	13		2.2	3.1	6.0	8.7	11.5	13.6	15.5	18.6	28.0	
H=1.1-1.9 Km	20	3.1	4.1	6.5	8.2	8.6	9.5	11.8	13.3	14.8	21.1	34.2
H≥2 Km	15	7.3	7.7	8.1	8.5	9.6	12.5	14.6	17.4	21.6	28.1	33.0
VEI 6-8, H asumida >>2	33	11.0	16.1	22.7	30.4	40.0	47.0	52.6	58.6	67.2	95.9	122.9
Todos VEI 4 y mayor, todas H	82	3.7	6.2	8.8	10.8	13.3	16.8	21.1	32.5	49.3	63.0	88.8

Esta tabla debe interpretarse como sigue: para un VEI entre 1 y 2, una altura de columna eruptiva entre 0 y 1.0 Km, un poblado ubicado a 1.1 Km de distancia del cráter tiene una probabilidad de ser alcanzado o excedido de 0.95.

C. Deslizamientos – Movimientos en Masa

El término deslizamiento se ha utilizado tradicionalmente para identificar los movimientos de laderas. Sin embargo en ocasiones se considera inadecuado debido a que muchos tipos de movimientos de laderas, no involucran el que el material se deslice sobre una superficie. Por consiguiente un termino genérico que se considera mas apropiado, es simplemente el de movimientos en masa, los cuales pueden ser de rocas, detritos o tierra (70). Pero que se diferencian de la erosión de suelos en que esta última trata sobre el movimiento de partículas, mientras que la primera trata sobre el movimiento de grandes porciones de material (de allí el término movimientos en masa). Un deslizamiento se compone de una zona de remoción y una zona de acumulación o de depósito, ambas de vital importancia para la caracterización de la amenaza en el campo.

Como se esquematiza en la Figura 13, para que ocurra un deslizamiento, debe presentarse un desequilibrio entre las fuerzas que promueven el movimiento del terreno (actuales) y las que resisten el movimiento (resistentes). Estas fuerza son función del peso del terreno y, la cohesión y el ángulo de fricción interna, los cuales a su vez están determinados por una serie de factores.

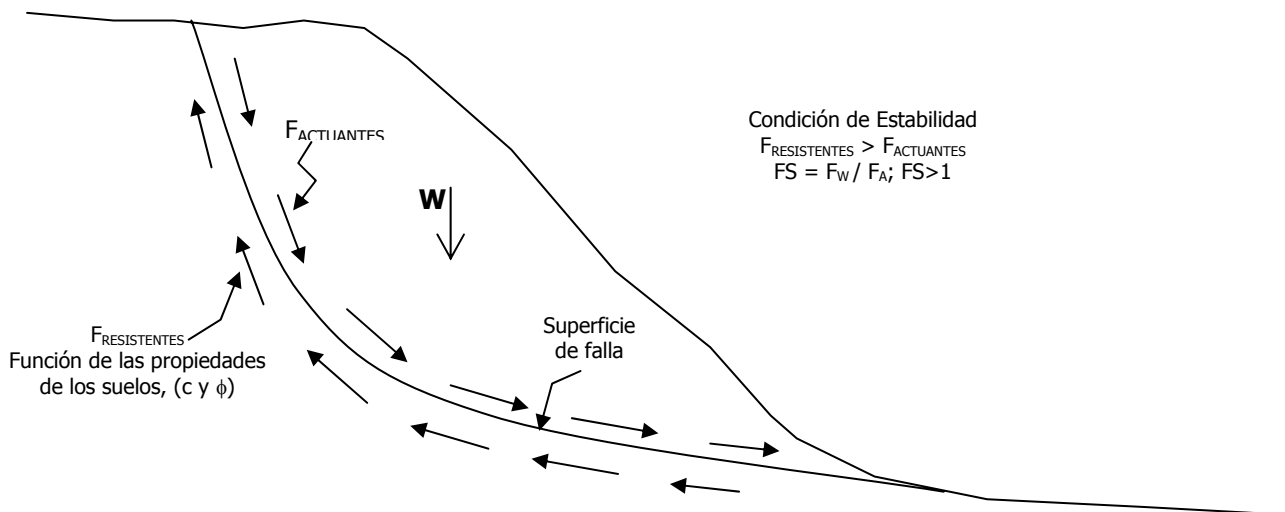


Figura 13: Esquema de un deslizamiento típico (Mendoza , M., Dominguez, L., 2004).

De acuerdo con Varnes (65), estos factores pueden dividirse en factores internos o inherentes al material que puede movilizarse y en factores externos o que pueden causar cambios desfavorables en las condiciones necesarias para que se de el movimiento. A estos últimos se les conoce comúnmente como “disparadores”.

Entre los factores inherentes al material, se señalan a la geología, litología, estructura, geomorfología, condiciones hidrológicas y la vegetación como los factores que determinan la ocurrencia de deslizamientos. Como disparadores, básicamente se reconocen dos como los de mayor importancia, los sismos y la lluvia, aunque existen algunos otros de menor relevancia. Para establecer el grado de amenaza o simplemente para dividir un área entre segura o insegura, inevitablemente requiere que la información sobre la que se basa esta clasificación, sea a su vez clasificada o calificada en una forma cualitativa o semi-cuantitativa. Para realizar esta clasificación se han tomado una gran diversidad de

enfoques, utilizando fundamentalmente la sobreposición de dos o mas factores que determinan la ocurrencia de deslizamientos. Una de las más utilizadas es la combinación de litología y pendiente. Una de las formas de mejorar sustancialmente la clasificación sobre la estabilidad relativa de las unidades geológicas es determinando el porcentaje de área ocupada por depósitos de deslizamientos (65).

Como ya se mencionó existe también la posibilidad de establecer estas clasificaciones de una manera semi-cuantitativa, siendo uno de los enfoques mas utilizados el de la calificación numérica, en forma empírica, de los factores contribuyentes a la ocurrencia de deslizamientos, utilizándose luego distintos algoritmos matemáticos para su combinación y determinación de un valor único final. El método numérico mas utilizado para evaluar la estabilidad de laderas es el de un análisis de ingeniería convencional para determinar lo que se conoce como "factor de seguridad" para sitios específicos, utilizando valores sobre las propiedades de los suelos, perfiles estratigráficos adecuados e información hidrológica pertinente. Toda la información vaciada en el calculo determinístico de un factor de seguridad, conlleva incertidumbres, tanto en las mediciones como en la medida en que estos representan las propiedades de una masa no homogénea. Debido a lo anterior, últimamente se ha hecho un considerable esfuerzo en la aplicación de métodos probabilísticas para la evaluación de estabilidad de laderas en sitios específicos. Simultáneamente se han aplicado técnicas estadísticas modernas a grandes volúmenes de información cualitativa y cuantitativa sobre aspectos geológicos, geomorfológicos, topográficos y otros que se consideran importantes en la determinación de la estabilidad de las laderas, obtenida sobre áreas y no sobre sitios específicos (65).

Hungr citado por Mendoza , M. (49) propone la evaluación de la amenaza de deslizamientos siguiendo el enfoque de las evaluaciones de amenaza sísmica y de inundaciones, en el que propone que los deslizamientos sean caracterizados por su intensidad, la que puede definirse como "un conjunto de parámetros cuantitativos o cualitativos distribuidos espacialmente, con los que se puede determinar el potencial que tiene un fenómeno de deslizamiento para causar daños". Para definir esta intensidad, se mencionan la velocidad máxima de movimiento y el volumen del deslizamiento, como los elementos más importantes y que permiten determinar una magnitud física que permita caracterizar la amenaza. Una analogía puede hacerse con las avalanchas de nieve, sobre las cuales se utiliza a la presión dinámica (48) como magnitud física para describir la amenaza. De acuerdo con el IUGS, citado por Mendoza, M. (49), la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos puede expresarse en términos de:

- El número de deslizamientos de una cierta característica que podría ocurrir en el área de estudio, por año.
- La probabilidad de que una ladera en particular experimente deslizamiento en un periodo dado, por ejemplo un año, y
- Las fuerzas motoras que exceden las fuerzas resistentes en términos de probabilidad o confiabilidad, sin relacionar el análisis a una frecuencia anual.

Y para estimar estas probabilidades, se puede recurrir entre otros a la evidencia geomorfológica y la relación a la frecuencia e intensidad con el factor desencadenante.

Siguiendo con el enfoque de Hungr, la probabilidad de que en un sitio se alcance una intensidad dada (P_i), está dada por la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento (P_h) por la probabilidad de impacto espacial (P_s).

$$P_i = P_h \times P_s$$

El caso en la Figura 14 muestra un ejemplo de determinación de probabilidad espacial, en el que esta se determinó estimando un ancho de canal de flujo potencial y se dividió entre el área total del abanico.

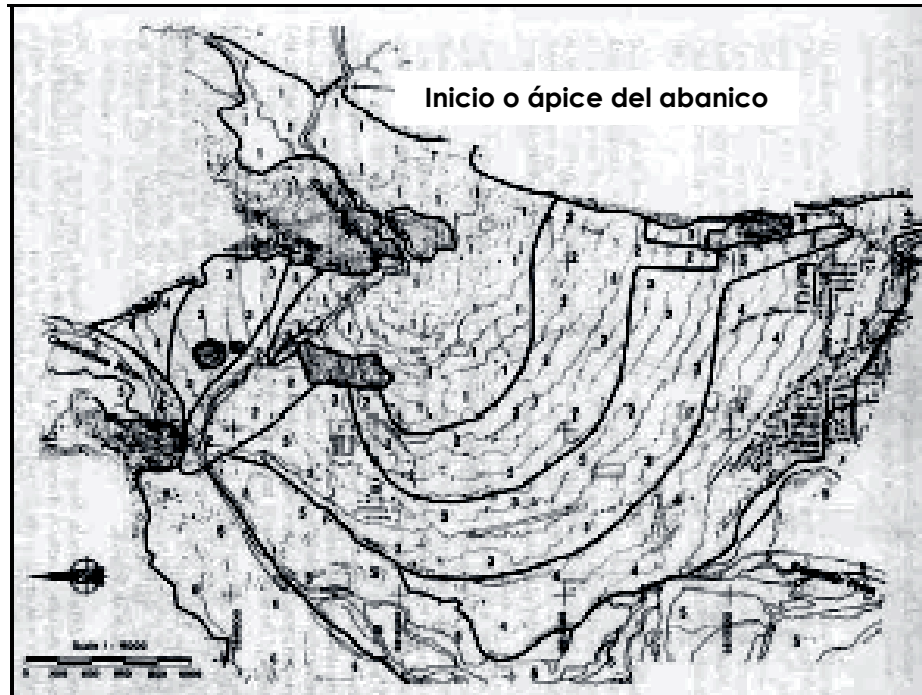


Figura 14: Zonificación de la intensidad de amenaza de deslizamientos, caso Abanico Cheekye, Columbia Británica (Hungr, 1997).

D. Flujos de Escombros y Lahares

Los flujos de escombros (también llamados lavas torrenciales en España), son flujos con concentraciones de sólidos entre el 35 y el 80% (dependiendo de la naturaleza de los mismos), cuyo movimiento es controlado por el sedimento, dejando de comportarse como un fluido (11, 50). Cuando los sólidos acarreados son finos, se les suele llamar flujos de lodo. El término lahares se refiere a flujos de escombros que característicamente ocurren en edificios volcánicos.

La generación de flujos de escombros generalmente están asociados a la ocurrencia de deslizamientos, que acarrear material al lecho de los ríos, formando diques que represan el río. Al romperse estos diques, el material depositado y material erosionado del lecho del río, son acarreados a altas velocidades, formándose así los flujos de escombros (34). Así, los principales factores que determinan la ocurrencia de flujos de escombros son la geomorfología, la geología y las lluvias. Las cuencas en donde se presentan flujos de escombros muestran una morfología característica con una cuenca de recepción como zona de remoción, una garganta como zona de transporte y un cono de deyección o abanico aluvial (Ver Figura 15).

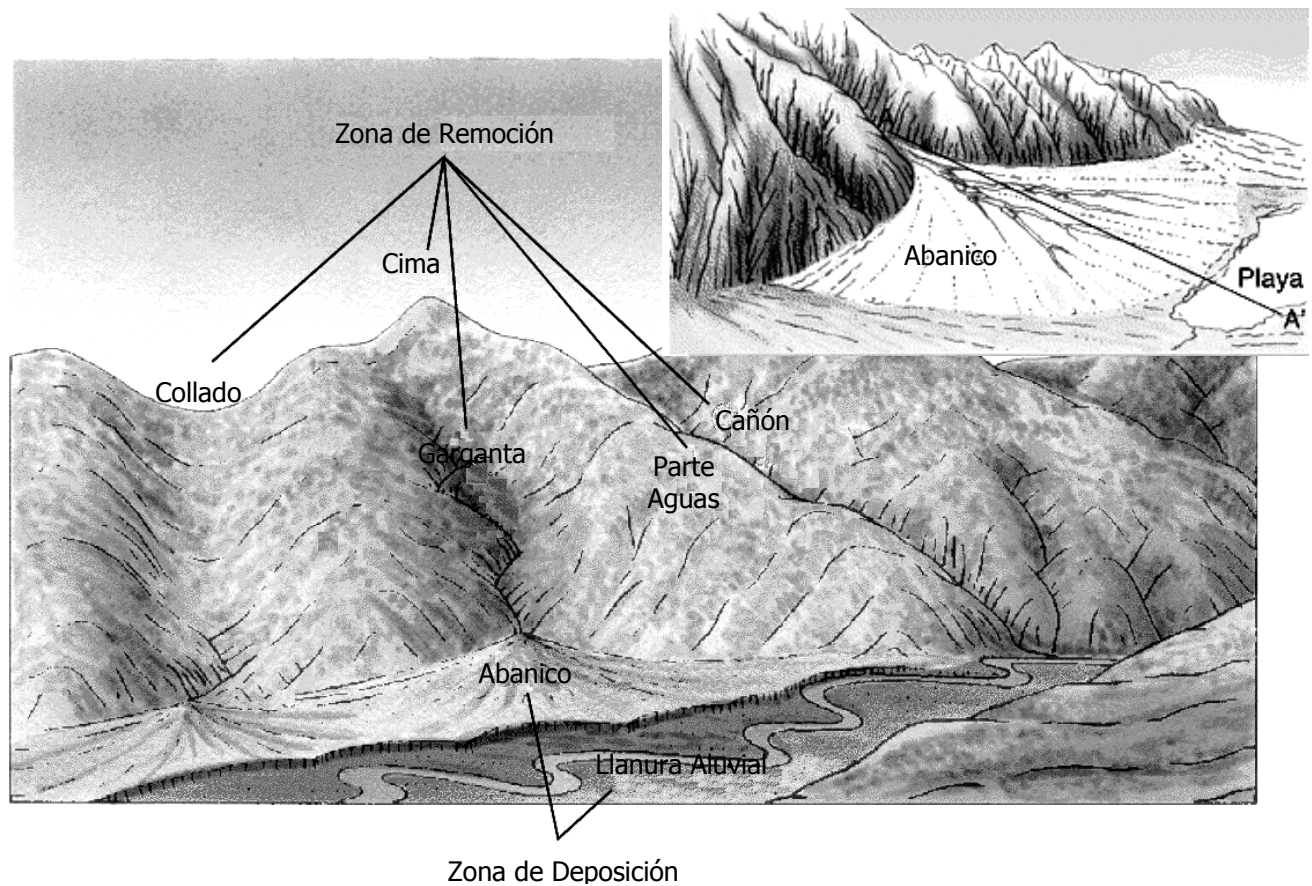


Figura 15: Geomorfología típica de cuencas en donde se presentan flujos de escombros (adaptado de Strahler, 1999).

Una de las principales condiciones para la ocurrencia de flujos de escombros, es la existencia de fuertes pendientes. En términos generales, a mayor el ángulo, mayor es la probabilidad que se generen flujos de escombros. Los ángulos de laderas mínimos para la ocurrencia de estos, ha sido observado entre los 20 y 25 grados, sin embargo la pendiente mínima del lecho del río puede variar, como una función del área de la cuenca. Esto, debido a las altas concentraciones de agua en cuencas pequeñas, en donde se restringe el flujo en cañones angostos. Sobre este razonamiento, Van Dine (64) propone pendientes límite para el inicio, transporte y sedimentación, como una función del área de la cuenca (Ver Figura 16).

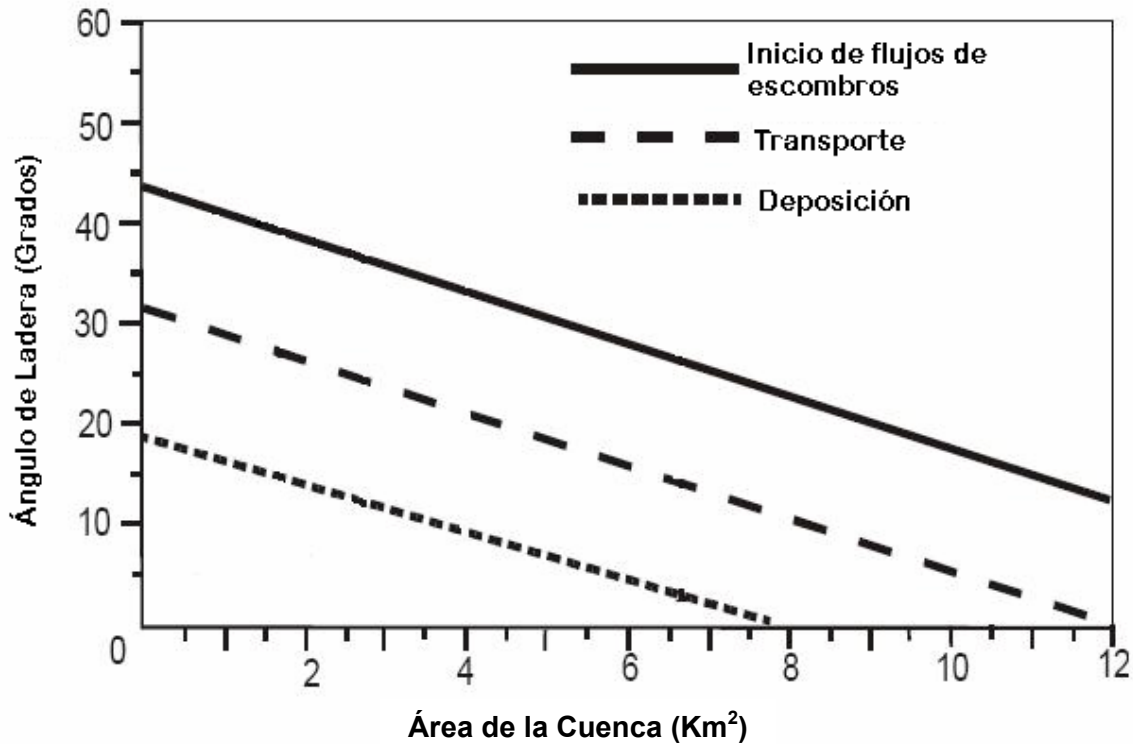


Figura 16: Límites de inicio de generación de flujos de escombros a partir del ángulo de laderas y el área de la cuenca, propuesto por Van Dine (1985).

En la literatura es posible identificar una gran diversidad de condiciones litológicas sobre las que se presentan flujos de escombros. Entre las más frecuentes se mencionan terrazas aluviales, suelos residuales derivados de granitos y gneiss, depósitos de piroclastos, areniscas, shales y esquistos. Con excepción de los depósitos de piroclastos, no se ha podido identificar las configuraciones litológicas más susceptibles a generar flujos de escombros. Pero se considera que en general existen dos factores geológicos fundamentales: primero, la disponibilidad de material suelto o una cubierta de suelo residual (con grava y bloques presentes), que puedan ser removidos y contribuir a la formación de los flujos. Y segundo, una composición litológica que promueva la formación de fuertes pendientes. Es importante reconocer que existen condiciones morfológicas distintas a la anterior, bajo las cuales se producen flujos de escombros, tal es el caso de las denominadas "ramblas" en España (55).

La lluvia es el principal disparador de flujos de escombros. De acuerdo con Kanji (34), se ha observado que la ocurrencia de grandes deslizamientos, se corresponde con muy altos niveles de lluvia durante largos períodos de tiempo (de varios días a semanas). Y que los flujos de escombros ocurren principalmente bajo lluvias muy intensas de corta duración (minutos a algunas horas). Basado en los trabajos de Kanji (1997, 2001), se ha podido inferir que el límite inferior para el disparo de flujos de detritos está dado por la ecuación:

$$P = 22.4(t)^{0.41}$$

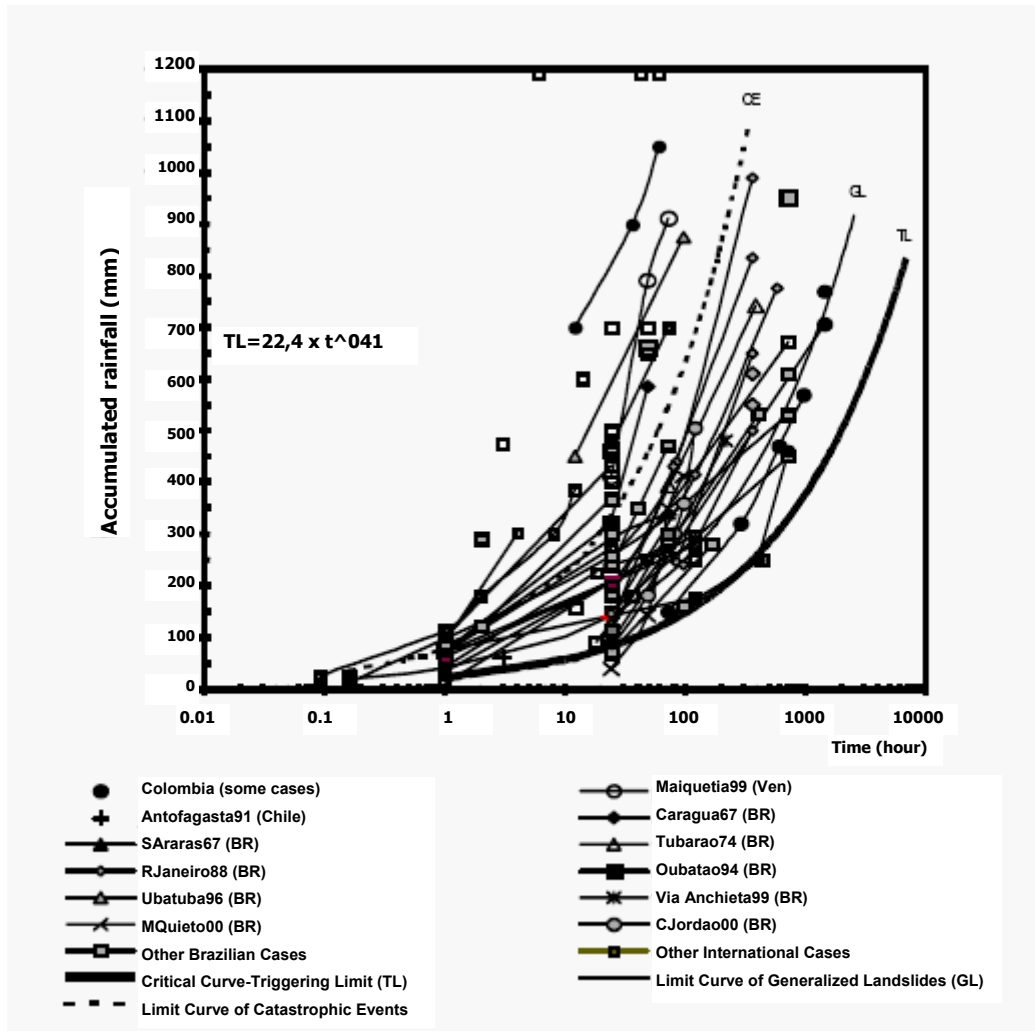


Figura 17: Relación entre ocurrencia de deslizamientos como función de la duración y lluvia acumulada (Kanji, 2003).

E. Inundaciones

Una inundación puede conceptualizarse como la ocupación temporal por agua, de un sitio que normalmente no lo está (8). De acuerdo con este concepto, se pueden distinguir los siguientes tipos de inundaciones:

- a) Inundaciones por precipitación "in situ".
- b) Inundaciones por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces, provocada o potenciada por:
 - Precipitaciones.
 - Deshielo o fusión de nieve.
 - Obstrucción de cauces naturales o artificiales.
 - Invasión de cauces, aterramientos o dificultad de avenamiento.
 - Acción de las mareas.
- c) Inundaciones por rotura o la operación incorrecta de obras de infraestructura hidráulica.

Las inundaciones por precipitación "in situ", se producen en depresiones topográficas en donde se acumula el agua, hasta que se evapora o infiltra en el suelo. Así, la ocurrencia de este tipo de inundaciones está determinada por la ocurrencia de lluvias con intensidades que superan la tasa de infiltración en los suelos de la depresión. Las inundaciones por escorrentía, se dan en las zonas aledañas a cauces, y su ocurrencia está determinada por la ocurrencia de crecidas con caudales que superan la capacidad de conducción del cauce. La Figura 18 muestra un esquema teórico sobre la ocurrencia de inundaciones, en donde las crecidas menos frecuentes ocupan áreas mas extensas que las crecidas mas frecuentes.

Para la determinación de las zonas de inundación se recurre idealmente a la determinación hidrológica de caudales máximos y su posterior tránsito hidráulico (10), el cual busca en principio establecer la altura que un determinado caudal alcanzará en un canal o fuera de este. Esto está definido por la capacidad de conducción del canal, dada en principio por la velocidad que el agua es capaz de alcanzar en el tramo de río en cuestión y por el área de la sección transversal del río:

$$Q = V \cdot A$$

Ante la falta de mediciones en el sitio sobre la velocidad del flujo, se recurre a la ecuación de Manning para determinar el caudal:

$$Q = \frac{1.49}{n} S_o^{1/2} R^{2/3} A$$

Donde:

Q = caudal

n = coeficiente de fricción

So = pendiente

R = radio hidráulico

A = área de la sección transversal

Esta misma ecuación es utilizada para resolver la cuestión sobre la altura que alcanzaría el agua en un tramo de río, con un caudal dado. Bajo las limitaciones expresadas por Chow (10), la ecuación de Manning para ser aplicada iterativamente, toma la forma genérica:

$$y_{j+1} = y_j - \frac{1 - Q/Q_j}{\left(\frac{2}{3R} \frac{dR}{dy} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dy} \right)_j}$$

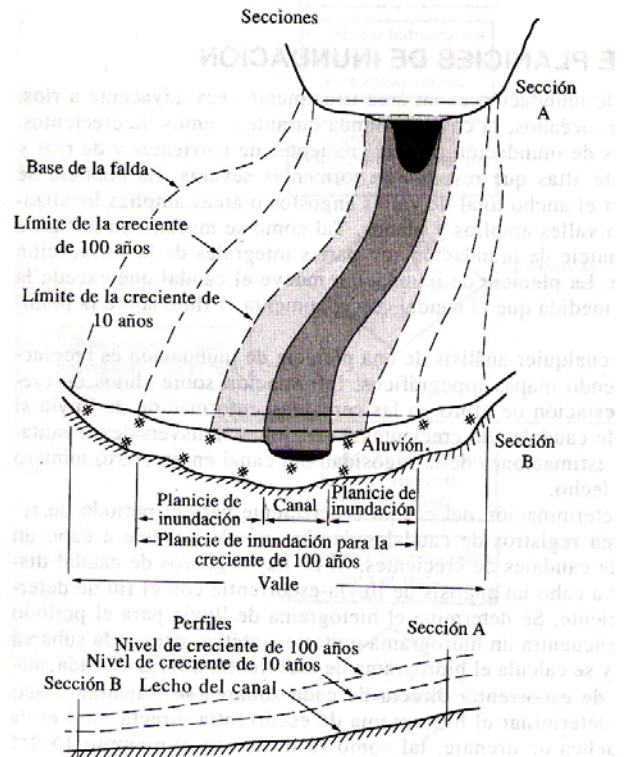


Figura 18: Relación caudal, canal y área de inundación (Chow, 2000).

Sobre lo anterior es importante mencionar que la amenaza de inundación se caracteriza fundamentalmente por la altura que puede alcanzar el agua en un lugar en particular, con una determinada probabilidad. Sin embargo también puede considerarse la velocidad del agua, como otro elemento para caracterizarla.

Debido al intenso trabajo y costos que lo anterior representa, no justificable en muchos casos, se puede recurrir a un análisis geomorfológico. En este, las distintas geoformas, fundamentalmente terrazas y abanicos aluviales, cauces abandonados y deltas se identifican y clasifican, de acuerdo a su edad estratigráfica y su posición en el relieve para determinar zonas con distinto grado de amenaza (Ver Figura 19).

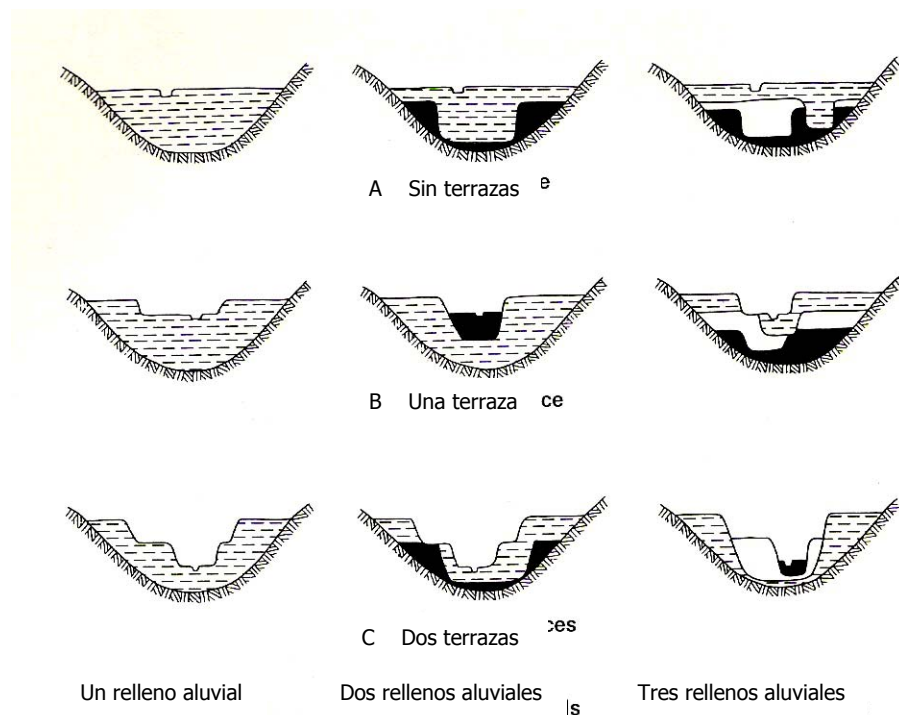


Figura 19: Relaciones estratigráficas en llanuras aluviales; secuencia hacia la formación de dos terrazas, con uno, dos y tres episodios de sedimentación (Leopold, 2000).

4.2 MARCO REFERENCIAL

4.2.1 UBICACIÓN

4.2.1.1 Ubicación Geográfica

La cuenca del río Ahiguate - Guacalate está ubicada entre las latitudes

13° 54' 43.4" N
14° 39' 40.6" N,

y entre las longitudes

90° 55' 03.0" O
91° 00' 33.2" O,

formando parte de la vertiente del Pacífico.

4.2.1.2 Ubicación Política

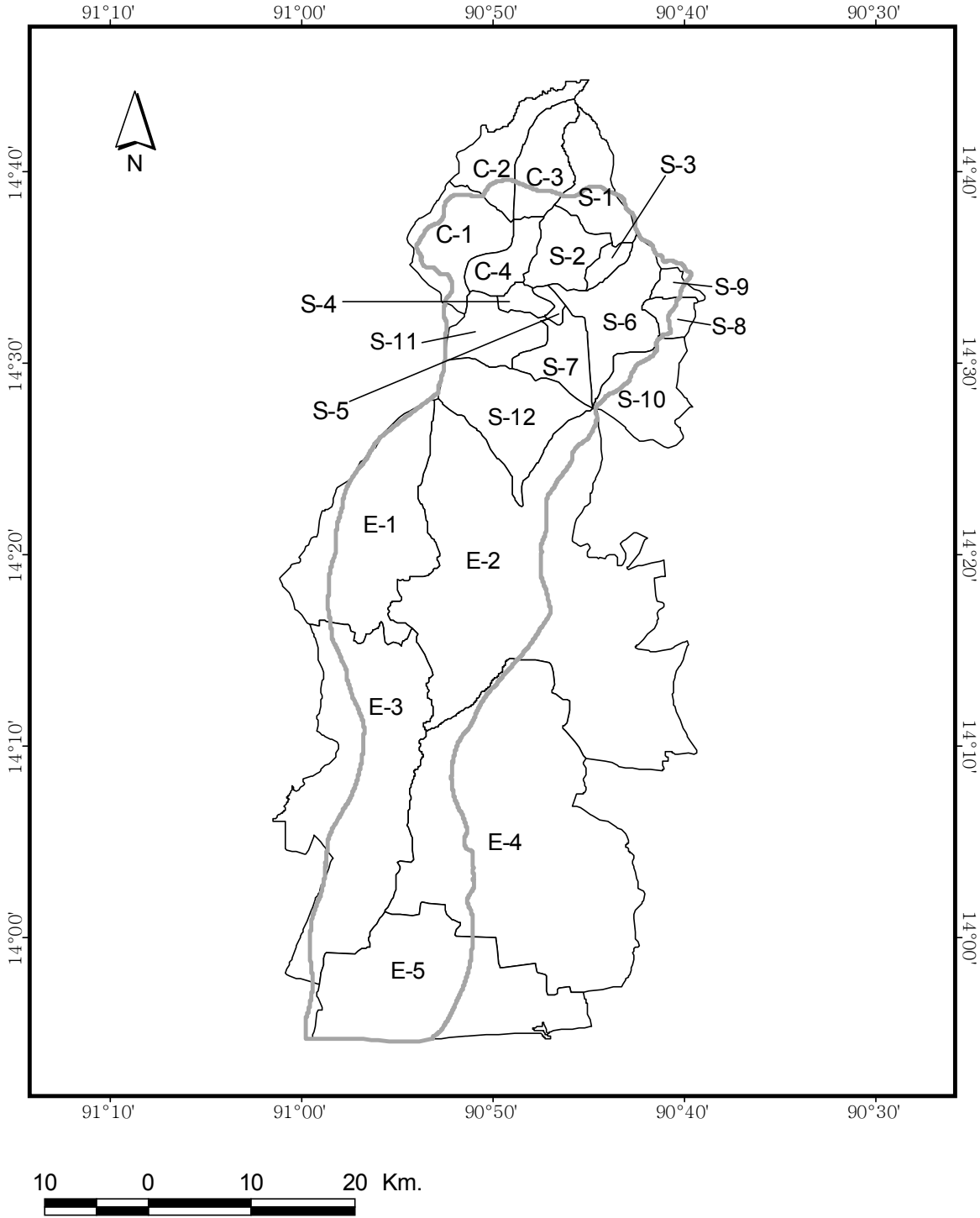
La cuenca del río Guacalate – Achiguate, está ubicada dentro de los departamentos de Chimaltenango, Sacatepéquez y Escuintla, departamentos que a su vez conforman la Región V; y comprende los siguientes municipios:

Tabla 4: Municipios y departamentos con territorio dentro de la cuenca del río Achiguate – Guacalate.

CHIMALTENANGO	SACATEPÉQUEZ	ESCUINTLA
1. San Andrés Itzapa	1. Sumpango	1. Siquinalá
2. Chimaltenango	2. Pastores	2. Escuintla
3. El Tejar	3. Jocotenango	3. La Democracia
4. Parramos	4. Santa Catarina Barahona	4. Masagua
	5. San Antonio Aguas Calientes	5. Puerto de San José
	6. Antigua Guatemala	
	7. Ciudad Vieja	
	8. Magdalena Milpas Altas	
	9. Santa Lucía Milpas Altas	
	10. Santa María de Jesús	
	11. San Miguel Dueñas	
	12. San Juan Alotenango	

4.2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CUENCA

Una cuenca hidrográfica puede caracterizarse con base en muchos aspectos biofísicos, dentro de los cuales podemos mencionar, geología, fisiografía, clima, hidrografía, etc. y a su vez es posible caracterizarla con base en las características y condiciones socioeconómicas de sus pobladores. Ante esta situación, la caracterización que se presenta a continuación es a un nivel general, y basada casi en su totalidad en mapas temáticos e información secundaria de diversas fuentes.



MUNICIPIOS DE LA CUENCA DEL RÍO ACHIGUATE

Figura 20: Municipios de la cuenca del río Achiguato – Guacalate (MAGA, 2001).

4.2.2.1 Geología

La geología de la cuenca es dominada en su mayoría por rocas y sedimentos de origen volcánico. En la siguiente tabla se muestra un resumen de la geología de la cuenca a nivel de reconocimiento:

Tabla 5: Geología de la cuenca del río Achiguate – Guacalate.

SÍMBOLO	MATERIAL	ÁREA km ²	% DEL ÁREA
Qp	Rellenos y cubiertas gruesas de cenizas, pómez de origen diverso.	433.63	32.81
Tv	Rocas volcánicas sin dividir predominantemente del Mio-Plioceno (Terciario), tobas, coladas de lava, material laharico, sedimentos. Edificios volcánicos (Andesita).	72.16	5.46
Qv	Rocas volcánicas del Cuaternario.	423.96	32.08
Qa	Aluviones del Cuaternario.	391.75	29.65

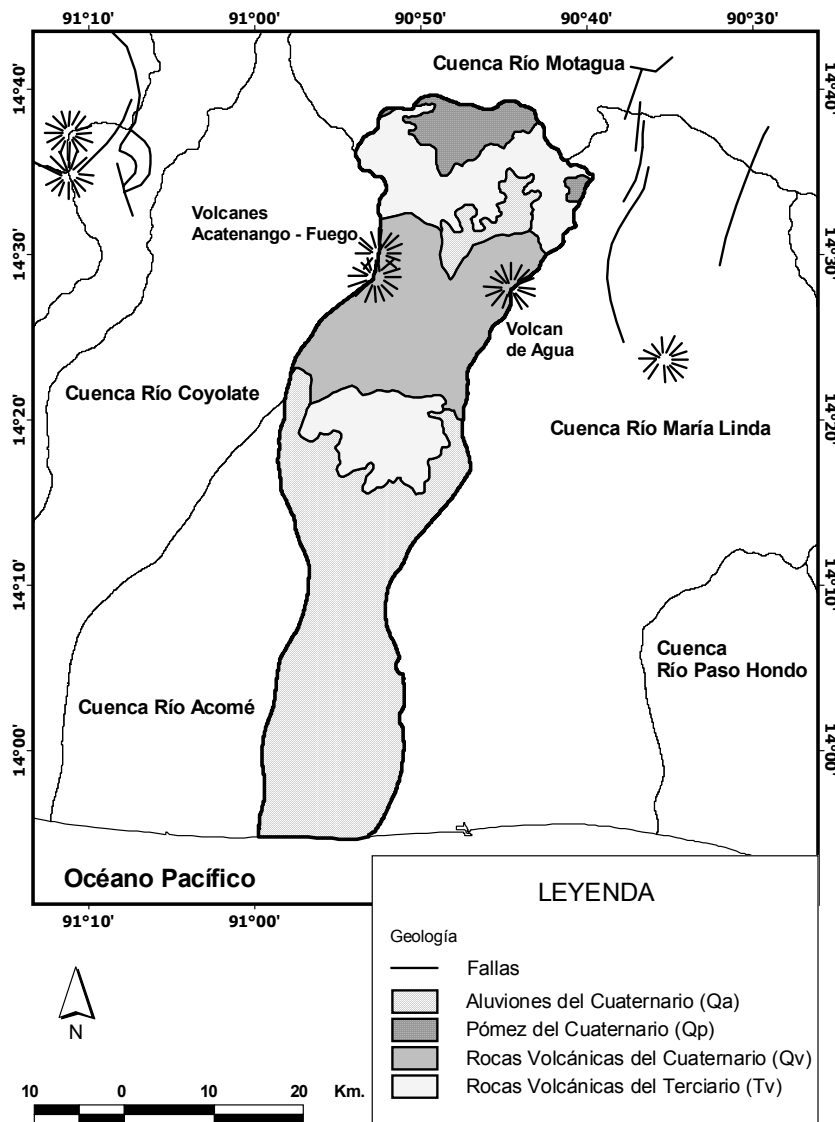


Figura 21: Geología general de la cuenca del río Achiguate – Guacalate (MAGA, 2001).

4.2.2.2 Fisiografía

La cuenca Guacalate – Achiguate, está ubicada dentro de dos regiones fisiográficas:

- Las Tierras Altas Volcánicas
- La Llanura Costera del Pacífico

Dentro de estas podemos ubicar los siguientes grandes paisajes, de acuerdo con el mapa fisiográfico del proyecto MAGA-BID, elaborado por Herrera y Alvarado (2000). Es importante mencionar que este mapa de regiones fisiográficas no es el mismo que el publicado por el IGN.

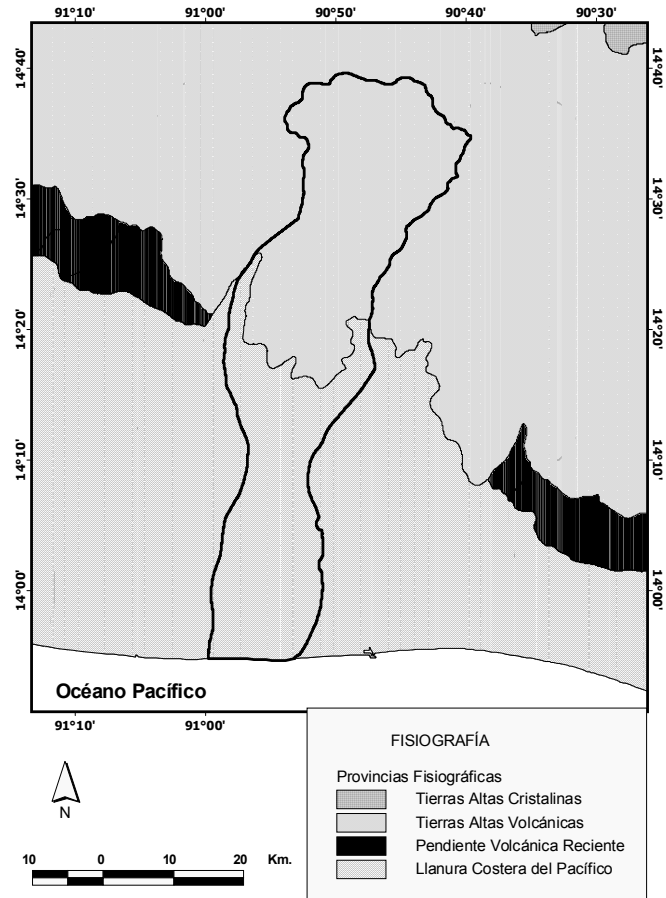


Figura 22: Fisiografía general de la cuenca del río Achiguate (MAGA, 2001).

Tabla 6: Fisiografía general de la cuenca del río Achiguate.

TIERRAS ALTAS VOLCÁNICAS	LLANURA COSTERA DEL PACÍFICO
Montañas volcánicas del centro del país.	Abanico aluvial de los ríos Coyolate–Acomé–Achiguate (parte del vértice).
Valle Tectónico de Chimaltenango.	Abanico aluvial de los ríos Coyolate–Acomé–Achiguate (parte media).
Abanico Aluvial de Antigua Guatemala.	Abanico aluvial de los ríos Coyolate–Acomé–Achiguate (parte distal).
Volcanes de Acatenango y Fuego.	Zona de Marismas del Litoral del Pacífico.
Volcán de Agua.	Planicie Aluvial de los Ríos Achiguate – Michatoya.

4.2.2.3 Zonas de Vida

Dentro de la cuenca del río Guacalate – Achiguate se presentan una amplia diversidad de condiciones ambientales (climáticas, edáficas, etc), que son la razón por la alta diversidad de vegetación natural que existió y de la cual únicamente quedan algunos remanentes aislados, así como de la diversidad de cultivos que se explotan en la cuenca. Con base en el trabajo de De La Cruz sistematizado por el MAGA (45), se pueden identificar por lo menos 5 zonas de vida, que se distribuyen como sigue:

Tabla 7: Zonas de vida de la cuenca del río Achiguate.

SÍMBOLO	ZONA DE VIDA	ÁREA km ²	% DEL ÁREA	UBICACIÓN
bh-MB	Bosque húmedo Montano Bajo Subtropical	376.87	28.5	Montañas de Milpas Altas, cerros el Socó y Chimachoy, valles de Chimaltenango – El Tejar, Itzapa, Parramos y Antigua, y alrededor de la pendiente volcánica reciente.
Bmh-MB	Bosque muy húmedo Montano Bajo Subtropical	57.01	4.3	Cimas de los edificios volcánicos.
bmh-S (c)	Bosque muy húmedo Subtropical (cálido)	726.97	55.0	Desde el valle aluvial del Guacalate en Alotenango, faldas sur de los edificios volcánicos y llanura aluvial hasta una latitud de 14° 03" aproximadamente.
Bh-S (c)	Bosque húmedo Subtropical (cálido)	130.40	9.9	Entre los paralelos 14° 03" y 13° 57" aproximadamente.
bs-S	Bosque seco Subtropical	30.25	2.3	Pequeña franja desde los 13° 57" hasta la línea costera.

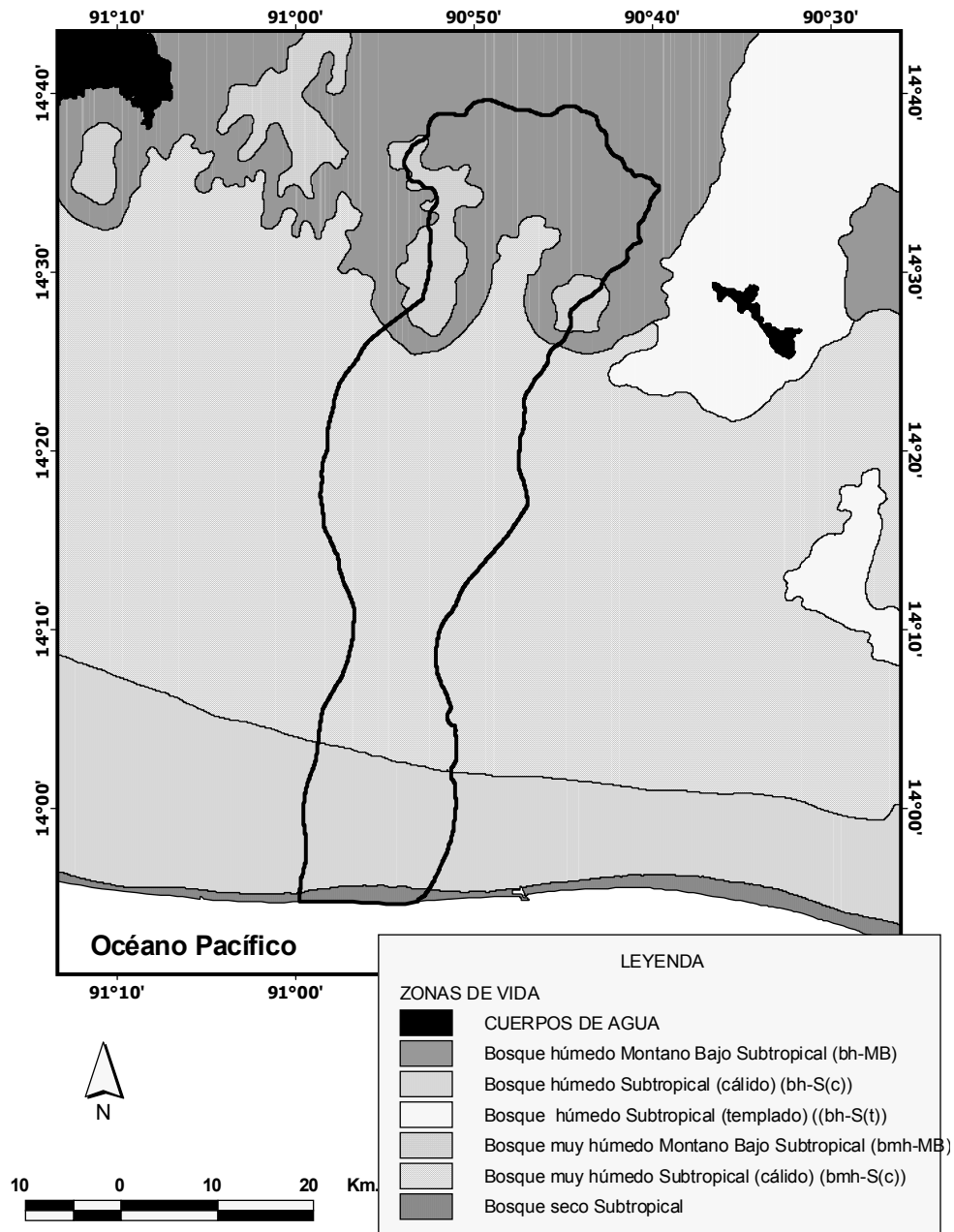


Figura 23: Zonas de vida de la cuenca del río Achiguate (MAGA, 2001).

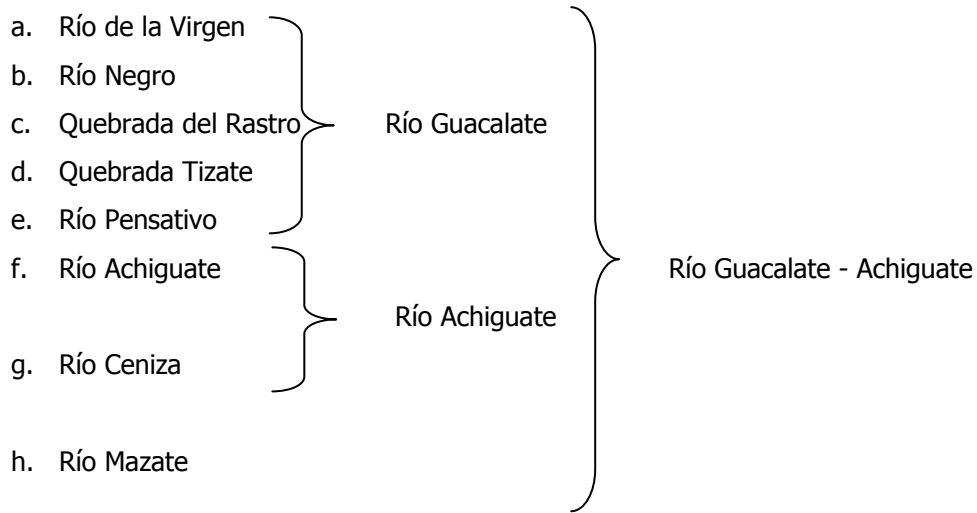
4.2.2.4 Hidrografía

La cuenca del río Guacalate – Achiguate abarca un área de 1321.5 kms², y se ha determinado que su corriente principal es de orden 8, en base a un mapa a escala 1:75,000. De estos dos datos, podemos deducir que es una cuenca altamente bifurcada para un área tan pequeña, esta alta cantidad de drenaje a su vez implica que la cuenca presenta un fuerte proceso de erosión geológica.

Es también una cuenca alargada, con una pendiente bastante fuerte, aunque presenta tramos donde la pendiente neta es muy baja, tales son los casos del valle aluvial de Antigua Guatemala y la llanura aluvial del Pacífico.

ÁREA	PERÍMETRO	ORDEN DE CORR.	LONG. CAUCE PRIN.	PENDIENTE MEDIA	ALTITUD PROMEDIO
1321.5 kms ²	222.05 kms	8	123.5 kms	16.2 %	850.09 msnm

Las corrientes que forman la cuenca Guacalate – Achiguate, son las siguientes:



4.2.2.5 Edafología

La diversidad topográfica y climática existentes en la cuenca, aunados a los incesantes y fuertes procesos eruptivos, erosivos y de deposición, característicos de las cuencas geológicamente jóvenes, han dado origen a una diversidad de materiales parentales, que son responsables por la alta variabilidad de los suelos en la cuenca. No obstante, buena parte de ellos presentan las características típicas de los suelos medianamente desarrollados, originados a partir de materiales volcánicos: la presencia de arcillas amorfas (alófanos) y una alta retención de humedad, dos características importantes para el uso y manejo del recurso suelo.

En la siguiente página se presentan las diferentes unidades de suelo determinadas hasta el nivel de orden de suelo de acuerdo a la Taxonomía de Suelos; es importante mencionar que estos son una adaptación de las unidades y en base a los datos de la clasificación de Series de Suelos de Simmons a escala 1:250,000 (MAGA, 2001).

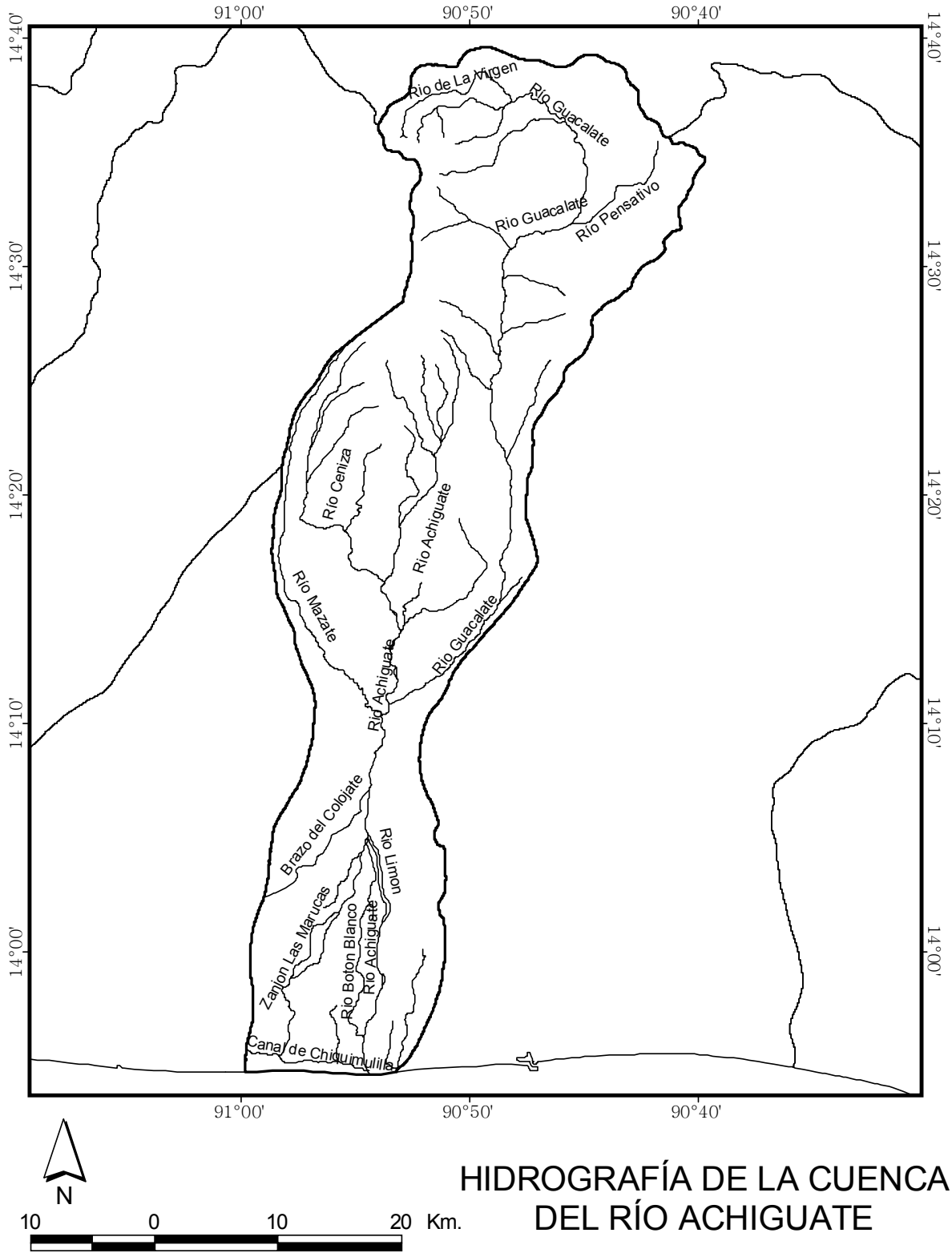


Figura 24: Hidrografía de la cuenca del río Achiguaté (MAGA, 2001).

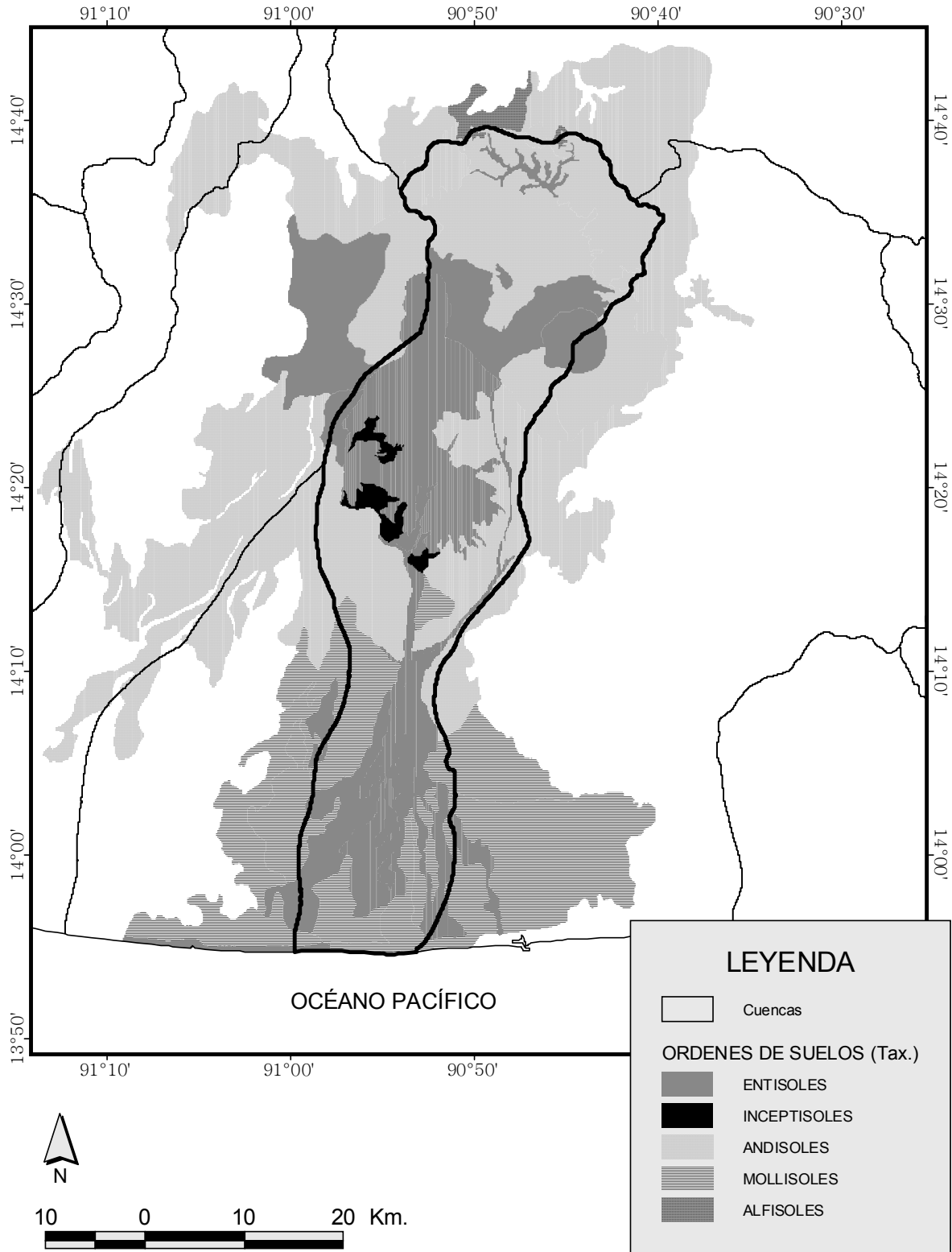


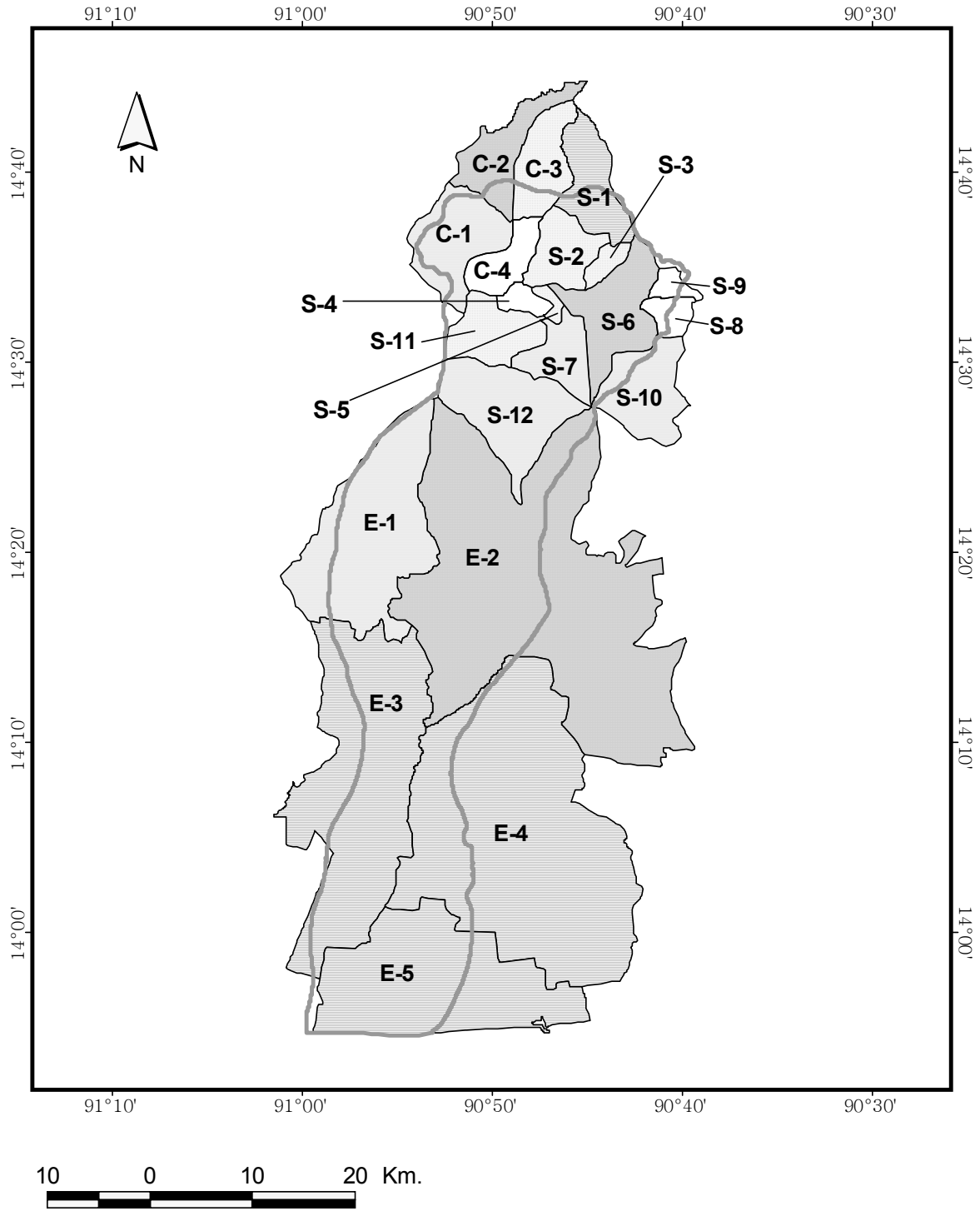
Figura 25: Taxonomía de suelos de la cuenca del río Achiguate (MAGA, 2001).

4.2.2.6 Población

Tabla 8: Distribución de la población por municipios en la cuenca del río Guacalate – Achiguate (INE, 1994; MAGA, 2001).

MUNICIPIO	POBLACIÓN No. Habts.	SUPERFICIE km ²	DENSIDAD hab/km ²
Chimaltenango	27,012	212	127
San Andrés Itzapa	11,809	60	197
El Tejar	4,139	144	29
Parramos	3,928	16	246
Antigua	27,014	78	346
Alotenango	8,980	95	95
Sumpango	13,046	5	2609
Pastores	5,520	19	291
Jocotenango	6,600	9	733
Magdalena Milpas Altas	3,849	8	481
Sn. Miguel Dueñas	4,737	35	135
Sn. Ant. AC	4,519	17	266
Sta. Lucía MA	3,549	19	187
Sta. María de Jesús	8,289	34	244
Sta. Catarina Barahona	1,436	31	46
Ciudad Vieja	11,400	51	224
Escuintla	73,688	332	222
San José	23,099	280	82
Masagua	20,377	448	45
La Democracia	12,633	320	39
Siquinalá	8,616	168	51
TOTAL/PROMEDIO	284,240	2381	119

Los datos anteriores corresponden a todo el municipio, sin consideraciones de las poblaciones ubicadas dentro de la cuenca. Es importante indicar que la extensa mayoría de la población indígena de la cuenca, es de origen Cackchiquel.



POBLACION DE LA CUENCA DEL RÍO ACHIGUATE

Figura 26: Población de la cuenca del río Achiguate (INE, 1994; MAGA, 2001).

5. OBJETIVOS

5.1 GENERAL

Elaborar una propuesta de zonificación de uso apropiado para la cuenca del Río Achiguate – Guacalate.

5.2 ESPECÍFICOS

Integrar las amenazas naturales como variable en la zonificación de uso apropiado.

Caracterizar las amenazas naturales presentes en la cuenca en términos de su distribución espacial y su probabilidad de ocurrencia.

Generar una zonificación de capacidad de uso del suelo a escala 1:50,000 para la cuenca.

6. METODOLOGÍA

La metodología aplicada, involucró los siguientes aspectos:

- Definición e identificación de amenazas.
- Caracterización de amenazas en la cuenca.
- Definición de usos
- Selección de criterios para la zonificación.
- Aplicación de criterios para la zonificación.

6.1 DEFINICIÓN E IDENTIFICACIÓN DE AMENAZAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Existe un alto número de amenazas que pueden generar desastres, sin embargo no todas pueden ocurrir en un determinado lugar, ni ameritan tratarse de la misma manera. Considerando lo anterior se seleccionaron del listado y definiciones de amenazas (eventos) propuestas por la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (La Red) (39), las amenazas de origen natural, que tienen potencial de producir daño por incidencia mecánica. Se excluyeron aquellas relacionadas a la acumulación de hielo y nieve dado que se considera que las condiciones climáticas en el país no permiten que esto se de. El listado original y sus definiciones se presentan en el anexo 1.

Luego se fijaron criterios para definir si existe la posibilidad o no de que alguna de estas amenazas ocurra en la cuenca del Río Achiguate. Los criterios fijados, se ubican en cualquiera de tres grandes grupos, a saber: la presencia de condiciones que la teoría define como necesarias para que se presente determinada amenaza, el registro histórico y estudios especializados de carácter regional.

Posteriormente se recopilamos reportes de daños o eventos producidos por las amenazas identificadas a través de los criterios ya mencionados. Cabe mencionar que las fuentes de donde fueron tomadas son recopilaciones de reportes de eventos de distintas fuentes, y algunas de ellas para amenazas particulares. Feldmann (16) se centra en reportes de sismos y actividad volcánica, los informes de INSIVUMEH (28, 63) son específicos para inundaciones, deslizamientos y flujos de lodo. Las bases de datos de DESINVENTAR (40, 41) y los consolidados de CONRED (7), son de carácter general.

6.2 CARACTERIZACIÓN DE AMENAZAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Una vez identificadas las amenazas, se realizó una investigación bibliográfica de estudios especializados sobre las amenazas en el área de estudio. En los estudios especializados encontrados, se revisó la información disponible para identificar si era factible conocer como mínimo su distribución espacial, evaluándose si contenían mapas a una escala mínima de 1:50,000 considerando el nivel de detalle del estudio, o en su defecto, variables que pudieran ser inferidas en base a información disponible y mapeable a dicha escala mínima; e.g. pendiente, distancias, etc. Para las amenazas en que no se cumplían estos criterios, se descartaron para la zonificación.

Para cada una de las amenazas identificadas y susceptibles de ser mapeables, se determinó la probabilidad de ocurrencia ya sea adoptando la reportada en los estudios, o en su defecto estimándola a través de la determinación de la relación frecuencia y magnitud de los mismos, en el período de registro. En la Tabla 10 se detallan los métodos utilizados para determinar la probabilidad de ocurrencia para cada amenaza que se trató.

6.2.1 AMENAZA SÍSMICA

Se realizó una revisión bibliográfica sobre la amenaza sísmica en Guatemala, ubicándose cuatro estudios de cobertura nacional, que caracterizan la amenaza sísmica por medio de la "aceleración pico del suelo" o PGA (peak ground acceleration). Se digitalizaron los mapas de amenaza sísmica de cada estudio y se homogenizaron las unidades de medida de la PGA para expresarla en términos de "porcentaje de gravedad" (una gravedad = 9.8 m/s^2 , y expresada en porcentaje es igual a 1), y así poder comparar los mapas. Por sobre posición de los mapas, se compararon visualmente para identificar diferencias en la distribución geográfica de la amenaza sísmica. Esto se hizo con fines ilustrativos, considerando que el movimiento temporal del terreno, no es susceptible de ser utilizado como criterio para restringir la ocupación de determinadas áreas.

Dentro de la amenaza sísmica se incluye la amenaza de licuefacción, como la única que es susceptible de ser zonificada para la restricción de ocupación. Sin embargo no se encontró documentación específica sobre esta amenaza para el área de estudio, ni información a partir de la cual se pueda inferir la posibilidad de ocurrencia de licuefacción, de acuerdo a los factores que determinan la posibilidad de ocurrencia de la misma (ver inciso 4.1.7.2).

6.2.2 AMENAZA VOLCÁNICA

Se realizó una revisión bibliográfica sobre la amenaza volcánica en Guatemala, identificándose tres estudios que caracterizan la amenaza volcánica (14, 63, 68). Para los fines de este trabajo, no se consideraron los flujos de escombros provenientes de los volcanes como "amenaza volcánica", por lo que como tal, únicamente fue sujeta de análisis la asociada al volcán de Fuego, que es el único dentro del área que presenta actividad permanente. Considerando que la amenaza volcánica, está representada por seis fenómenos distintos, si se consideran los flujos de escombros, que son: la caída de tefra, los flujos y oleadas piroclásticas, los flujos de lava, los gases volcánicos, avalanchas de escombros, deslizamientos y lahares (o flujos de escombros), se evaluaron y seleccionaron los que podrían ser aplicados para la zonificación de uso. Los criterios que determinaron la forma en que fueron incluidos o excluidos fueron los siguientes:

Tabla 9: Criterios aplicados para seleccionar los fenómenos volcánicos que pueden ser aplicados para la zonificación de uso.

FENÓMENO	CRITERIOS
Caída de tefra	Los volúmenes de tefra importantes se restringen al área afectada por flujos piroclásticos. Fuera de esta área, existen posibilidades de manejar la amenaza.
Flujos y oleadas piroclásticas	Es el fenómeno con mayor potencial de daño, por cobertura y por sus características. Se utilizó como base y en ella van implícitas las amenazas de caída de tefra y flujos de lava.
Flujos de lava	Están contenidos dentro del área afectada por flujos piroclásticos.
Gases volcánicos	No se tienen reportes de daños por estos en los alrededores del Volcán de Fuego, por lo que se considera muy poco probable que represente un problema en el área de estudio. No se utilizó.
Avalanchas de escombros	Estos se refieren a grandes colapsos del edificio volcánico y su ocurrencia es muy poco probable. No se utilizó.
Deslizamientos y lahares (flujos de escombros)	Se consideran en forma independiente.

Una vez seleccionada la amenaza de flujos piroclásticos, se digitalizaron los mapas que describen su distribución espacial; el primero elaborado por Rose, B., et. al. (58), y el segundo elaborado por Wallance, J., et. al. (68) Debido a que se encontraron dos mapas para el mismo fenómeno, se sobrepusieron para observar las diferencias, que resultaron evidentes en cuanto al tamaño y forma de las áreas que pudieran ser afectadas por la ocurrencia de los flujos piroclásticos. Por lo anterior se consultó con expertos en el tema, incluido uno de los autores y se concluyó que el mapa mas antiguo, elaborado por Rose, está basado en el mapeo de los depósitos de un período reciente de actividad (inicios de los 70's), mientras que el mapa mas reciente está basado en una evaluación de depósitos mas antiguos y por lo tanto contiene la información de eventos mas grandes. Basado en esto se determinó que ambos mapas describen eventos con distintas probabilidades de ocurrencia, aunque aún no determinadas.

Con el fin de determinar la probabilidad de ocurrencia de cada evento, se caracterizaron cada uno de estos en términos del Índice de Explosividad Volcánica (IEV), con el fin de poder asociarlos a los eventos caracterizados en el registro histórico disponible del Programa Vulcanológico Mundial del Museo Smithsonian (17). Luego se calculó la frecuencia relativa para obtener una estimación del período de retorno, tomándose el período de tiempo que comprende el registro histórico disponible y dividiéndose entre el número de eventos de cada IEV (13).

Posteriormente se modificó el mapa de Wallance, dado que se determinó, mediante mediciones de distancia en el Sistema de Información Geográfica, que en la porción Suroeste del edificio volcánico el área afectada por los flujos piroclásticos se restringía a un área mas cercana al cono. Al no encontrarse una explicación de lo anterior en la

documentación existente, se consultó nuevamente con uno de los autores (47), quien indicó que en el proceso de toma de datos de campo no se identificaron depósitos mas allá de esos límites. Considerando que no se encontraron elementos teóricos que expliquen el por qué en esta zona del volcán de Fuego, los flujos piroclásticos deberían restringirse al área representada originalmente y, que las condiciones climáticas de la región, favorecen la rápida erosión de depósitos no consolidados, se amplió el área que podría ser afectada en esta zona del volcán, hasta una distancia igual a la que se identificaron en la región Sureste (47).

Para ampliar el número de escenarios a incluir en la zonificación, se determinaron las áreas que podrían ser afectadas por flujos piroclásticos producto de erupciones con un IEV de 5 (superior al de los asociados a los mapas de Rose y de Wallance), utilizando el modelo del cono de energía (36) con dos variantes; la primera aplicando una relación H / L exponencial ($H =$ Altura de columna eruptiva, $L =$ distancia de recorrido del flujo) y la segunda aplicando una relación H / L lineal (13).

6.2.3 AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS

Se realizó una investigación bibliográfica sobre la amenaza de deslizamientos en Guatemala, pudiéndose identificar dos trabajos dentro del área de la cuenca del río Achiguate. El primero de ellos es el mapeo de los deslizamientos generados por el terremoto de 1976 (Harp, 1981) y el segundo un análisis para la zonificación de áreas bajo amenaza de deslizamientos en los alrededores de Antigua Guatemala (JICA, 2001) .

Ninguno de los documentos encontrados presentan una estimación del período de retorno de los deslizamientos, por lo que se hizo necesario determinarlo. Por otro lado, se encontró que una pequeña porción del área de estudio era común a ambos trabajos, por lo que se consideró relevante hacer una comparación entre los resultado de ambos trabajos. Es importante mencionar que el trabajo de JICA ya determinaba una zonificación del área alrededor de Antigua Guatemala, sin embargo el análisis que se describe a continuación mostró algunas deficiencias en cuanto a su validez, por lo que su uso se descartó en el presente trabajo.

Considerando la necesidad de homogenizar la información y siguiendo la metodología utilizada por JICA, en donde se relaciona la ocurrencia de los deslizamientos con la litología y la pendiente del terreno se procedió a determinar dicha relación para los deslizamientos disparados por el terremoto de 1976. Para ello se siguieron los siguientes pasos:

- Se digitalizaron los deslizamientos mapeado por Harp, generados por el terremoto de 1976.
- Estos se sobrepusieron al mapa geológico a escala 1:50,000 del área de estudio, para determinar el área de deslizamientos en cada unidad geológica. No se normalizó el área "deslizada" entre el área que cubre cada unidad geológica, porque comprenden un área similar y por consiguiente puede considerarse como constante. Con base en esta información se determinó si los deslizamientos ocurren preferentemente en alguna unidad geológica.
- Considerando que en el área de estudio existen condiciones geomorfológicas distintas y que estas pueden tener influencia sobre la ocurrencia de deslizamientos disparados por sismos (Harp, 1981), se definió y

delimitó el área de *barrancos y de ladera estructural*¹, trazando el borde de acuerdo a los cambios de pendiente observados en el modelo de elevación digital sombreado o "hillshade" (la sombra se generó con los siguientes parámetros: Azimuth 315°, Altitud 45°, Resolución 20 metros. El área de análisis común a los dos trabajos de investigación encontrados, se ubica precisamente fuera del área de barrancos, y comprendiendo lo que se denominó el área de "ladera estructural".

- Una vez delimitadas las áreas de barranco y ladera estructural, se determinó dentro de estas, la relación entre la pendiente y la ocurrencia de deslizamientos. Nótese que así, se están manejando tres variables; litología, geomorfología y pendiente. La relación entre la pendiente y la ocurrencia de deslizamientos se determinó siguiendo los siguientes pasos:
 - Se obtuvo el modelo de elevación digital (MED) interpolando las curvas a nivel obtenidas de la cartografía base 1:50,000 por el método del TIN (Triangular Irregular Network ó Red Irregular de Triángulos) en el programa Arc View. Con las propiedades siguientes:

Class:	PolyLine
Height source:	Id
Input as:	Soft Breaklines
Value field:	None

Luego se transformó en un mapa raster con resolución de 20 metros, mediante la instrucción "Convert to grid" (convertir a rejilla).

- Por medio de herramientas SIG y el modelo de elevación digital, se tomaron secciones transversales del terreno, en dirección de la máxima pendiente (determinada visualmente) en los sitios en donde ocurrieron deslizamientos en 1976. Se determinó la pendiente general de la ladera en cada sección transversal (tomando los valores de X e Y de los extremos de la ladera), y se asignó este valor de pendiente al deslizamiento sobre el cual se trazó la sección.
- Con los deslizamientos con una pendiente asociada, se determinó la frecuencia relativa de ocurrencia de deslizamientos en clases de pendiente con incrementos de cinco grados. Esta se estimó para cada unidad y normalizada entre el número total de deslizamientos en cada unidad (barranco y ladera estructural). Con base en esta clasificación se obtuvo una distribución de ocurrencia relativa de deslizamientos por rango de pendientes, la cual indica bajo que condiciones de pendiente ocurren preferentemente los deslizamientos en la zona de barrancos. Para poder comparar estos resultados con el estudio de JICA, también se estableció la frecuencia de ocurrencia de deslizamientos por kilómetro cuadrado en cada rango de pendientes.

¹ Se aplicó el término "ladera estructural" de manera arbitraria para diferenciar las ladera en zonas que no son producto de la erosión de depósitos de tefras.

- Para obtener una idea de la probabilidad de ocurrencia en el tiempo, de los deslizamientos se siguió el enfoque de asociar el período de retorno de los eventos, al período de retorno del evento disparador; en este caso el sismo de 1976. Debido a la ausencia de información sobre la aceleración pico del suelo (PGA) experimentada tras el sismo de 1976, se transformó la intensidad del sismo a aceleración pico del suelo, mediante las funciones de Gutenberg – Richter ($\text{Log } a = -0.5 + 0.33I$, donde a = aceleración pico del suelo e I = intensidad del sismo) y de Ambraseys ($\text{Log } a = -0.16 + 0.36I$) que expresan la relación entre estas variables. Posteriormente se comparó el resultado obtenido con los distintos mapas de amenaza sísmica en el país y se le asoció el período de retorno del mapa cuyos valores de PGA, se encontraron mas cerca de los obtenidos para las transformaciones ya mencionadas.
- Una vez obtenido el período de retorno, de los deslizamientos, se determinó la probabilidad de ocurrencia espacial, dividiendo el área de deslizamientos entre el área total de cada una de las dos unidades geomorfológicas; barranco y ladera estructural. La probabilidad espacial y la probabilidad temporal (período de retorno) se combinaron por multiplicación, aplicando la propiedad de independencia, considerando que el área y el tiempo son dependientes. Con lo que se obtuvo la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en ambas zonas, sin consideración de la pendiente.

Debido a que los dos trabajos de caracterización de deslizamientos encontrados, cubren un área en común con un período de tiempo de 25 años de diferencia, se considero valioso establecer una comparación entre ambos. El área común se ubica específicamente dentro de la zona de "ladera estructural".

- Como primer paso se trazó y digitalizó el área de traslape entre ambos mapeos, para ser tratada como unidad de análisis.
- Luego se sobrepusieron ambos mapeos, con el fin de establecer si existían deslizamientos comunes a ambos. Los deslizamientos comunes a ambos trabajos se descartaron del análisis y se cuantificó el área afectada por deslizamientos posteriores a 1976. Luego se determinó la proporción de área afectada por deslizamientos respecto al área total (de traslape). Posteriormente se estimó el área que en promedio podría ser afectada anualmente, dividiendo el área total estimada entre los 25 años transcurridos entre ambos mapeos.
- Por último se trazó una comparación entre la ocurrencia de deslizamientos de 1976 y los mapeados en 2001, para las distintas clases de pendientes.

6.2.4 AMENAZA DE FLUJOS DE ESCOMBROS

Se realizó una consulta bibliográfica sobre flujos de escombros en la cuenca del río Achiguate. Al haberse identificado dos tipos de referencias; mapeo de flujos de escombros originados en los edificios volcánicos de la cuenca (59, 68) y el registro histórico (17, 63, 28, 8), se buscó establecer la relación entre ambos para determinar el período de retorno asociado a los mismos, en forma análoga a como se estimó para la amenaza volcánica. Así, se siguieron los siguientes pasos para el establecimiento de la relación.

- Se clasificaron los reportes de flujos de escombros de acuerdo al año del reporte y al "elemento natural" asociado a los mismos. Para los elementos naturales se distinguen dos básicamente; los volcanes (Agua,

Acatenango y Fuego), por conocerse que son geoformas particularmente inestables y desde los cuales comúnmente se originan flujos de escombros, y las cuencas de ríos no asociadas a volcanes.

- Después de distinguirse el elemento natural asociado a cada uno de los flujos de escombros registrados, se dividió el análisis para las siguientes unidades:
 - Volcán de Agua
 - Volcán Acatenango
 - Volcán de Fuego
 - Cuencas no asociadas a volcanes
- Para el Volcán de Agua, se estableció la distribución de eventos por siglo de ocurrencia y la frecuencia relativa anual por cada siglo en los que se tienen registros.
- Considerando que la información de la distribución espacial de la amenaza de flujos de escombros estaba caracterizada por volúmenes de material acarreado, preestablecido en cuatro niveles, se asoció el registro histórico a los siguientes rangos de volúmenes, de acuerdo a la información disponible.
 - < 500 Mil m³
 - 500 Mil – 1 Millón de m³
 - 1 – 2 Millones de m³
 - 2 – 4 Millones de m³
 - > 4 Millones de m³
- En este sentido, dado lo pobre de la descripción en cada registro, se utilizó como criterio la relación hipotética de a mayor volumen, mayor impacto y mayor atención en los medios, suponiendo una cobertura homogénea por parte de los medios. Además se aplicó el juicio del autor, de acuerdo a su experiencia y el conocimiento del impacto de los dos eventos mas recientes.
- Una vez establecida esta relación, se calculó la frecuencia relativa anual por categoría de volumen acarreado. El cálculo se hizo con dos variantes; primero considerando el registro completo y luego considerando únicamente el registro del siglo XX.
- Luego se estableció el período de retorno para áreas particulares del volcán de Agua, dividiendo la frecuencia relativa anual de flujos de escombros de distintos volúmenes, entre el número de quebradas sobre las que Shilling, S., Et. Al. (59) modeló la distribución espacial de estos volúmenes. Tomando un criterio conservador, se asignó la probabilidad así estimada, al límite superior de los rangos de volúmenes evaluados.
- Una vez obtenida la probabilidad de ocurrencia de flujos de escombros por quebrada, se agregaron las probabilidades para las áreas en que convergen los flujos, bajo el supuesto de independencia de eventos.
- Para el Volcán Acatenango, se estableció la probabilidad de ocurrencia de flujos de escombros siguiendo la misma metodología que para el Volcán de Agua. Luego se compararon los resultados entre ambos volcanes, considerando que poseen la característica común de no contar con depósitos recientes de material no consolidado. Por último se asignó la frecuencia relativa anual de ocurrencia de flujos de escombros, estimada para el volcán de Agua, siguiendo un criterio conservador ante la falta de información y agregándose en el caso de quebradas que confluyen.

Debido a la escasa información se consideró oportuno incluir un breve análisis de flujos de escombros recientes asociados a volcanes para usarse como comparador. Así se identificaron tres flujos de escombros, por conocimiento directo del autor, entre 2001 y 2006.

- Para cada uno de estos se estableció la fecha de ocurrencia, un volumen estimado y el sitio en donde ocurrieron. Luego se describen brevemente las características de los eventos meteorológicos que los dispararon.
- Con el objeto de establecer el período de retorno asociado a estos flujos, se buscó caracterizar las lluvias que los dispararon, para lo cual se identificaron las estaciones activas más cercanas a los volcanes y se revisaron los registros cinco días antes y cinco días después de ocurrido el evento. Para caracterizarlo se tomaron los datos a partir del día en que se identifica un incremento en los niveles de lluvia, hasta un día después del pico.
- Se estableció el período de retorno de la lluvia máxima diaria, por medio del ajuste de las distribuciones de probabilidad Gumbel y Log-Pearson a los valores máximos de lluvia diaria anual para las longitudes de registro indicados en cada estación. Una vez determinada la curva de probabilidad de excedencia, se determinó el período de retorno para los niveles de lluvia diaria más altos registrados para el período en que ocurrieron los flujos. Este análisis se hizo utilizando el programa Hyfran.
- Adicionalmente se compararon los valores de lluvia diaria más altos registrados para los eventos, con el mapa de isoyetas de precipitación máxima diaria para períodos de retorno de 2, 10 y 30 años, desarrollados por el INSIVUMEH (29, 30, 31). Se compararon los resultados de los dos análisis y se definió la probabilidad que se consideró mas representativa de acuerdo con su cercanía con los valores de los mapas. Para el análisis, se consideró que los flujos ocurren de manera independiente en cada quebrada.
- Por último se presentan las estimaciones realizadas por López (44) con los que se compararon los resultados anteriores.

- Para el volcán de Fuego, en el mapeo de la amenaza de flujos de escombros se tomaron los mapas generados por Schilling y Wallance para la amenaza de lahares. En el caso del Volcán de Fuego, se conoce que la frecuencia de ocurrencia de los flujos está asociado a la actividad volcánica. De acuerdo con esto, Escobar estimó la relación entre erupciones de distinto IEV y la ocurrencia de lahares de determinado volumen. Basado en esto, se asignó el período de retorno estimado para las distintas magnitudes de erupciones a los volúmenes de flujos que se considera están asociados a las mismas.
- Para los flujos de escombros en cuencas no asociadas a volcanes, se identificaron las subcuencas que drenan hacia valles, excluyendo las subcuencas asociadas a volcanes y se determinaron las siguientes características geomorfológicas:

- Área de la cuenca
 - Pendiente media de la cuenca
 - Longitud del cauce
 - Pendiente promedio del cauce principal
- Estas características geomorfológicas se compararon con características de otras cuencas con eventos documentados, en otros sitios (49).
- Posteriormente se identificaron las cuencas en que ocurrieron flujos de escombros y se determinaron las mismas características geomorfológicas, realizándose un análisis comparativo de las características geomorfológicas, con las de las subcuencas que drenan hacia valles.

6.2.5 AMENAZA DE INUNDACIONES

Al igual que con las amenazas anteriores se partió de una revisión bibliográfica, lográndose identificar tres trabajos que buscan caracterizar la amenaza de inundación en la cuenca del río Achiguate. Dos de ellos elaborados por JICA, uno en 1985 (32) y el otro en 2003 (36). Es importante resaltar que los trabajos existentes en la misma se centran en el cauce principal en la parte baja de la cuenca y en el afluente Río Pensativo. Debido a que los trabajos fueron desarrollados con distintas metodologías, en distinto momento y a niveles distintos de detalle, y aportan información teóricamente complementaria, se buscó establecer posibles congruencias entre ambos.

Luego se realizó una sobreposición de los mapas generados en dos de los trabajos y se identificaron límites comunes a las zonas identificadas en cada trabajo. Con base en la congruencia identificada, se asignó el período de retorno del mapa de 1985 al trabajo de 2003, que presenta un mayor detalle y cobertura. No se determinó la amenaza de inundación para afluentes menores.

Tabla 10: Métodos utilizados para estimar la probabilidad de ocurrencia de las amenazas mapeables en la cuenca del río Achiguate.

Amenaza	Procedimiento para definir Tr
Sismos	Según lo indicado en los estudios especializados.
Actividad Volcánica	Asociación de los mapas de amenaza volcánica con el registro histórico. Cálculo de la frecuencia relativa como indicador del período de retorno.
Deslizamientos	Asociación de eventos con el período de retorno del evento generador. Comparación en el tiempo entre dos mapeos.
Flujos de Lodo	Asociación de los mapas de amenaza volcánica con el registro histórico. Cálculo de la frecuencia relativa como indicador del período de retorno.
Inundaciones	Comparación entre mapas de amenaza de inundación.

La información de amenazas se sistematizó en una base de datos de Sistema de Información Geográfica en formato de ArcView®. Para aquellas amenazas en que el establecimiento de una zonificación no fue posible, se descartaron para su inclusión en la zonificación.

6.3 DEFINICIÓN DE USOS

Dado que la propuesta de zonificación de la cuenca del río Achiguate, pretende identificar las zonas aptas para determinados usos, se identificaron y definieron los posibles usos a los que una unidad de tierra puede estar sujeta. Así se identificaron dos grandes clases de uso que podrían considerarse:

- Aquellos que utilizan el suelo como un medio de producción y
- Aquellos que utilizan el suelo como un sustrato.

La primera de estas clases, hace referencia inequívoca a la producción agrícola y forestal, mientras que la segunda hace referencia al uso del suelo como un mero sustrato para el emplazamiento de infraestructura de diversa índole. El impacto sobre el recurso agua no fue considerado, primero porque el mismo es altamente dependiente del tipo de manejo o forma que adopte cada una de estas actividades, y segundo simplemente por estar fuera de los alcances del presente estudio. No se considera impacto sobre el bosque, porque este es considerado como un tipo de uso.

Así, para los usos en los que el suelo es un medio de producción, se tomaron como base las categorías de uso propuestas por el INAB (25), con modificaciones descriptivas con el objeto de delimitar con mayor claridad dichas categorías. Para los usos en los que el suelo es un sustrato, se partió de una subdivisión inicial en la que se consideran: habitación, producción secundaria (industria y comercio) y prestación de servicios. Con respecto a estos usos es importante reconocer que no pueden ubicarse dentro de la escala de "intensidades de uso" del INAB dado que los criterios de definición de intensidad, basados fundamentalmente en el grado de protección que ofrecen al suelo, no son aplicables a los mismos.

Para los fines de este trabajo, es importante aclarar la diferencia entre los usos del suelo y las categorías de capacidad de uso en la metodología del INAB. Debido a que una unidad de tierra es sujeta de ser utilizada para varios usos, nombrarlas de acuerdo a uno de los usos permisibles puede generar confusión cuando existen limitaciones de otra naturaleza dentro de estos usos permisibles. Si solamente se considera la Capacidad de Uso, no se presentan problemas dado que es fácilmente comprensible que se permite ese uso y todos aquellos que generan menos degradación al suelo. Pero si existe otra variable a considerar, y modifica estas categorías, estos nombres también deben cambiar, ya que no denotan lo mismo bajo dos condiciones distintas. Es por ello que se adoptaron códigos para identificar las categorías de áreas con distintos usos permisibles.

6.4 SELECCIÓN Y DEFINICION DE CRITERIOS PARA LA ZONIFICACIÓN

Con base en el principio que los límites de la actividad humana deben desarrollarse entre el límite establecido por el impacto que la actividad del hombre puede tener sobre el entorno y por el impacto que el entorno puede tener sobre la actividad del hombre, se determinó el uso de los siguientes criterios:

- a. La capacidad de uso del suelo de acuerdo a la Metodología del INAB (como deterioro máximo permisible del recurso suelo).
- b. La probabilidad de ocurrencia de amenazas a niveles aceptables (como pérdida máxima aceptable).

6.4.1 Capacidad de Uso

Se adoptó la capacidad de uso del suelo, de acuerdo a los criterios definidos por la metodología del INAB, que son: Región Natural, Pendiente y Profundidad del suelo. Las categorías de áreas con distintos usos permisibles se "renombraron", con base en el código con que se identifican en la Metodología del INAB. En la Tabla 11 se presentan los criterios de asignación de categoría de capacidad de uso, de acuerdo a la metodología del INAB.

Tabla 11: Criterios que definen la asignación a categorías de capacidad de uso (INAB, 1999).

	PENDIENTE MÁXIMA DEL TERRENO (%)				
PROFUNDIDAD DEL SUELO (cm)	< 4	4 – 8	8 – 16	16 – 32	> 32
> 90	A	A	Am / Aa	Aa / Ss / Ap	F
50 – 90	A	A / Am	Am / Aa	Ap / F	F
20 – 50	Am / Aa	Am / Aa	Ss / Ap	Ap / F	F / Fp
< 20	Ss	Ss / Fp	Ss / Fp	F / Fp	Fp

Matriz de asignación de categoría de capacidad de uso para la región natural Tierras de la Llanura Costera del Pacífico.

	PENDIENTE MÁXIMA DEL TERRENO (%)				
PROFUNDIDAD DEL SUELO (cm)	< 8	8 – 16	16 – 26	26 – 36	> 36
> 90	A	Am / Aa	Am / Aa	Ap / F	F / Fp
50 – 90	A / Am	Am / Aa	Aa / Ss	Ap / F	F / Fp
20 – 50	Am / Aa	Ss / Ap	Ss / Ap	F	Fp
< 20	Aa	Ss / F	Fp	Fp	Fp

Matriz de asignación de categoría de capacidad de uso para la región natural Tierras Volcánicas de la Bocacosta.

	PENDIENTE MÁXIMA DEL TERRENO (%)				
PROFUNDIDAD DEL SUELO (cm)	< 12	12 – 26	26 – 36	36 – 55	> 55
> 90	A	Am / Aa	Ss / Ap	Ap / F	F / Fp
50 – 90	A / Am	Am / Aa	Ss / Ap	Ap / F	F / Fp
20 – 50	Am / Aa	Ss / Ap	Ss / Ap	Ap / F	Fp
< 20	Aa	Ss / F	Ss / Fp	Fp	Fp

Matriz de asignación de categoría de capacidad de uso para la región natural Tierras Altas Volcánicas

6.4.2 PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AMENAZAS A NIVELES ACEPTABLES

La definición de la probabilidad de ocurrencia de amenazas a niveles aceptables, puede realizarse de dos maneras fundamentalmente. Una de índole subjetiva en donde determinado individuo decide en base a su propios valores la magnitud del riesgo que considera aceptable, ya sea consciente o inconscientemente. La segunda, es más objetiva en donde no está basado en los valores del individuo sino en la minimización de los costos del riesgo, sin embargo no por ello es más válida que la anterior. Para estimar la minimización de costos debería establecerse en principio los niveles de daño para cada uso del suelo, en función de los distintos niveles de amenaza que se pueden presentar y su correspondiente probabilidad de ocurrencia. Luego, establecer los costos para reducir el riesgo. Que bajo el supuesto que las condiciones de la ocurrencia de la amenaza no cambian y sin considerar competencia entre los usos, serían los costos de oportunidad por no hacer uso de determinada área. Así, si se consideran 12 usos, 4 amenazas distintas, 3 niveles de amenaza, el análisis de costos de oportunidad (que para el uso del suelo son función de la presión local sobre la misma) para 3 subáreas de la cuenca del río Achiguate, se tendrían que realizar 432 análisis. Aspecto que escapa a los alcances de este trabajo.

Bajo la limitante anterior, se determinó la aplicación de un método alternativo simplificado con base en la estimación del "costo anual de daños esperados" – D_T –, (Chow, 1994), que se encuentra dado por:

$$D_T = \sum \left[\frac{D_{(X_{i-1})} + D_{(X_i)}}{2} \right] \left[P_{(X \geq X_{i-1})} - P_{(X \geq X_i)} \right] \quad (1)$$

Donde

D_T = Costo anual de daños esperados.

$D_{(X_{i-1})}$ = Daño para el evento $X_i - 1$.

$D_{(X_i)}$ = Daño para el evento X_i .

$P_{(X \geq X_{i-1})}$ = Probabilidad que el evento X iguale o exceda a $X_i - 1$.

$P_{(X \geq X_i)}$ = Probabilidad que el evento X iguale o exceda a X_i .

Para su aplicación se partió de los siguientes supuestos:

- a. Que la relación probabilidad de ocurrencia – magnitud es negativa, que puede expresarse siguiendo una tendencia teórica de decaimiento exponencial, y que las particularidades de este decaimiento tienen una influencia despreciable si esta relación es una constante para las distintas aplicaciones.
- b. Que las diferencias en el costo anual de daños esperados entre distintos usos del suelo, es aproximadamente constante, para distintas magnitudes de eventos (y probabilidad de ocurrencia).
- c. Bajo lo anterior, que al fijar la probabilidad de ocurrencia límite para un uso del suelo, se fijará para los demás en la proporción dada por el costo anual de daños esperados.

Bajo estos supuestos y para aplicar el método se definieron los siguientes elementos.

- Los eventos tipos: considerando la naturaleza de las amenazas de flujos de escombros, flujos piroclásticos y deslizamientos, para los cuales se considera válido asumir una vulnerabilidad del 100% para todos los usos del suelo definidos, se tomó la amenaza de inundaciones como referencia para establecer los eventos tipo. Así se consideraron tres magnitudes distintas de posible inundación, de manera tal que cubrieran el posible espectro de daños establecido en la función de daños de la tabla 1, siendo estas: 0.00, 0.25, 0.50 y 1.00 metros de inundación. A cada una de estas se le asignó una probabilidad de ocurrencia de manera arbitraria, siguiendo únicamente una relación negativa, con tendencia al decaimiento exponencial (esto se hizo considerando que se pretende que los resultados obtenidos sean aplicables en cualquier área, independientemente de la relación magnitud de inundación – probabilidad de ocurrencia). Se probaron tres combinaciones distintas de probabilidades de ocurrencia asignadas a los cuatro niveles de inundación mencionados (0.00, 0.25, 0.50 y 1.00 metros), para determinar la influencia de estas sobre el costo anual de daños esperados, a saber:

Tabla 12: Combinaciones de altura de inundación y probabilidad de ocurrencia utilizadas para el análisis de sensibilidad.

Altura de Inundación (m)	Pb Serie I (Probabilidad)	Pb Serie II (Probabilidad)	Pb Serie III (Probabilidad)
0.00	1.00	1.00	1.00
0.25	0.50	0.20	0.05
0.50	0.20	0.10	0.02
1.00	0.10	0.05	0.01

- El costo de inversión por metro cuadrado para la implementación de cada uso del suelo: se estimaron los costos de inversión para cada tipo de uso del suelo a través de consultas a expertos, algunas empresas constructoras y agricultores. También se consideraron algunos otros elementos, como el incentivo forestal entregado por el INAB, para fijar los costos de inversión.

- Para calcular el daño para cada uso del suelo y los eventos tipo, se aplicaron los factores de daños establecidos por las funciones de daños utilizada por JICA en el "Proyecto de Control de Inundaciones: los ríos Achiguate y Pantaleón" (Tabla 1), como se define en la Tabla 13.

Tabla 13: Funciones de daño utilizadas para cada uso del suelo definido.

USO	FUNCIÓN APLICADA	OBSERVACIONES
Agricultura sin limitaciones	Promedio Hortalizas + Maíz	Se supone una proporción del 50% de área cultivada con cada tipo.
Agricultura con mejoras	Promedio Hortalizas + Maíz	Idem
Agroforestería con cultivos anuales	Promedio Café + Maíz	Se supone que el café representa adecuadamente las propiedades del componente forestal y el maíz, las del componente agrícola.
Sistemas silvopastoriles	Pastos	Ninguna
Agroforestería con cultivos permanentes	Café+ Árboles Frutales	Se supone que los árboles frutales representan adecuadamente las propiedades del componente forestal y el café las del componente agrícola permanente.
Tierras forestales para producción	Árboles Frutales	Se supone que los árboles frutales representan adecuadamente las propiedades del bosque.
Tierras forestales para protección	No aplica	Uso menos intensivos, que por definición son apropiados para las áreas de mayor amenaza
Edificios Públicos	No aplica	Se asumirá un nivel de "seguridad" del doble al de las viviendas.
Vivienda concentrada	Casas	Ninguna
Vivienda dispersa	No aplica	Se definirá un nivel de "seguridad" inferior que para la vivienda dispersa.
Industria, comercio, alojamiento o recreación basada en infraestructura	Casas	Ninguna.
Recreación basada en espacios naturales	No aplica	Uso menos intensivos, que por definición son apropiados para las áreas de mayor amenaza

- Se definió que no se considerarán diferencias en la capacidad de recuperación de pérdidas esperadas, entre los posibles usuarios; esto responde a la filosofía de la zonificación, sobre el principio de igualdad absoluta de derechos (y no relativa a su condición económica). Es decir que todos los usuarios y sus bienes tienen derecho a obtener el mismo grado de seguridad.
- Por último se calculó el costo anual de daños esperados para las tres combinaciones distintas, aplicando la ecuación 1. Luego del cálculo se compararon los resultados obtenidos para las tres combinaciones distintas de probabilidades de excedencia.

Una vez encontrado el costo anual de daños esperado (D_T) para los distintos usos, se normalizaron por el D_T más bajo, determinándose así cuantas veces mayor es el D_T para los distintos usos. Esto se realizó para las tres series distintas de períodos de retorno, con el fin de evaluar el supuesto "b", definido anteriormente. Además se calculó un promedio entre los valores normalizados, el cual se utilizó finalmente para definir "cuantas veces mas seguridad" se requiere entre todos los usos y el uso con el D_T mas bajo.

De los usos para los que se evaluó el D_T , se seleccionó el uso "Vivienda concentrada", para fijar la probabilidad aceptable de ser afectado por cualquier amenaza. A partir de esta, se definió para los demás usos en forma proporcional al D_T normalizado. Una vez definidos las probabilidad de ocurrencia aceptable, se comparó con la información disponible, reajustándose con el fin de alcanzar una primera propuesta de zonificación.

Luego de haberse definidos los criterios de zonificación de amenazas, estos se combinaron con los de capacidad de uso de la tierra, definiéndose criterios para establecer los usos permisibles en las distintas combinaciones entre capacidad de uso y probabilidad de ocurrencia de amenaza.

6.5 ZONIFICACIÓN

De acuerdo con los criterios de zonificación definidos, se identificaron las zonas en las distintas categorías de capacidad de uso del INAB y las áreas sujetas a amenazas naturales. Para definir las áreas dentro de las categorías de capacidad de uso del INAB se realizó el siguiente procedimiento.

6.5.1 CAPACIDAD DE USO

6.5.1.1 Mapa Base

- Se digitalizó el mapa de la cuenca del río Achiguate a escala 1:75,000 del Estudio Morfométrico de la Cuenca del Río Achiguate en proyección Geográfica.

6.5.1.2 Profundidad del Suelo

- Se digitalizó en formato vectorial de SIG, el mapa de suelo de la cuenca del río Achiguate a escala 1:50,000, elaborado por Herrera, Lavarreda y Lam.

- A cada unidad de suelos se le asignó la profundidad efectiva determinada para el pedón representativo de la unidad. La determinación de la profundidad efectiva se hizo utilizando las propiedades y profundidades de los horizontes de suelo descritos en el pedón.
- Con esta información se generó un mapa de profundidad efectiva del suelo en formato raster, con resolución de 100 metros, para la cuenca Achiguate, que se reclasificó en las categorías definidas en las matrices de la metodología del INAB.

6.5.1.3 Pendiente del Terreno

- Con los mapas de curvas a nivel a escala 1:50,000 del Instituto Geográfico Nacional digitalizados, se generó un modelo de elevación digital TIN. Luego se transformó a formato raster con resolución de 100 metros y se derivó la pendiente de acuerdo al algoritmo del programa ArcView.

6.5.1.4 Región Natural

- Se obtuvo el mapa de las regiones naturales del INAB, para luego realizar una intersección espacial con el mapa de pendientes y así poder aislar las porciones de la cuenca contenidas en cada región natural. Cada uno de los mapas de pendientes resultantes se reclasificaron en las categorías definidas en las matrices de la metodología del INAB. Se hizo esto de manera separada para cada porción debido a que los rangos de pendiente cambian en cada región natural.

Una vez preparados los mapas de pendientes y de profundidad de suelos se hizo una sobreposición para cada una de las tres porciones de la cuenca, obteniéndose así las combinaciones que establecen las matrices de la metodología del INAB. Luego se sumaron los mapas de las tres regiones para reconstruir la cuenca completa y se reclasificaron y etiquetaron de acuerdo a las categorías de capacidad de uso del suelo.

6.5.2 PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AMENAZAS A NIVELES ACEPTABLES

A cada una de las zonas mapeadas de cada una de las amenazas identificadas y susceptibles de ser utilizadas en la zonificación, se le asignó la probabilidad de ocurrencia determinada para las mismas. Luego se transformaron a formato raster, con una resolución de 100 m, para poder sobreponer al mapa de capacidad de uso. Para integrar todas las amenazas susceptibles de ser utilizadas en la zonificación, se sumaron los mapas de todas las amenazas, bajo el supuesto que la ocurrencia de las distintas amenazas son independiente. Aunque se reconoce que esto no es del todo cierto, ya que la lluvia es agente generador de varias de estas, se asume como válido considerando que un área que puede ser sujeta de ser afectada por más de una amenaza, merece mayores restricciones de uso. Luego se reclasificó el mapa de acuerdo a los niveles máximos aceptables definidos en la tabla 38.

Por último se sobrepusieron los mapas de categorías de capacidad de uso con el de categorías de probabilidad de ocurrencia de amenazas a niveles aceptables, obteniéndose las distintas combinaciones posibles. Estas se reclasificaron de acuerdo a los criterios de usos permisibles definidos.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 DEFINICIÓN DE SISTEMA A ANALIZAR

Para los fines de este trabajo el sistema a analizar es la cuenca del Río Achiguate y los municipios incluidos dentro de la misma.

7.2 DEFINICIÓN E IDENTIFICACIÓN DE AMENAZAS

En la Tabla 14 se muestran las amenazas que fueron seleccionadas de las propuestas por La Red (39) y los criterios utilizados en este trabajo para definir si es posible que éstas ocurran en la cuenca del Río Achiguate.

Tabla 14: Listado de amenazas naturales cuya posibilidad de ocurrencia se evaluó para la cuenca del río Achiguate.

No.	AMENAZA	CRITERIOS APLICADOS	CALIFICACIÓN
1	Avenida ≈ Flujos de Escombros y Escombros ≈ lahares	Presencia de cauces que desembocan en valles mostrando un cambio brusco de pendiente y que muestran condiciones torrenciales: alta pendiente, corrientes temporales o intermitentes, etc.	Si
2	Deslizamiento	Presencia de laderas con pendiente superior a 30%.	Si
3	Erupción	Presencia de edificio volcánico.	Si
4	Granizada	Se asume que puede ocurrir en cualquier lugar.	Si
5	Inundación	Presencia de cursos de agua.	Si
6	Licuación	Presencia de suelos con alto contenido de arena.	Si
7	Litoral	Colindancia con la línea costera.	Si
8	Marejada	Colindancia con la línea costera.	Si
9	Sedimentación	Se asume que puede ocurrir en cualquier lugar.	Si
10	Sismo	Estudios especializados regionales.	Si
11	Tornado	Registro histórico.	No
12	Tsunami	Colindancia con la línea costera.	Si
13	Vendaval	Se asume que puede ocurrir en cualquier lugar.	Si

NOTAS:

De acuerdo al autor las definiciones de Aluvión y Avenida se refieren al mismo fenómeno, por lo que se seleccionó el segundo únicamente. En el presente trabajo se utiliza el término Flujos de Lodo y Escombros para referirse a las Avenidas y Lahares.

Los Huracanes se han excluido porque sus efectos se expresan como fuertes vientos (vendaval) y lluvias. Estas últimas también se excluyeron dado que por si misma la lluvia no representa una amenaza, mas bien es un agente generador de inundaciones y deslizamientos.

Los criterios fijados son de carácter general. Para verificar la ocurrencia de estas amenazas en la cuenca se generó un inventario de eventos que han producido daños en la cuenca del Río Achiguate. Es importante aclarar que no representa un inventario sobre la ocurrencia de los fenómenos naturales como tales, y por lo tanto no es apropiada para hacer una caracterización detallada de las amenazas. Por otro lado, si de riesgo se trata, es necesario expresarlo todo en las mismas unidades, por ejemplo muertes y pérdidas económicas, sin embargo la mayor parte de las veces no existe tal información y por lo tanto no es posible hacer comparaciones en forma directa. Por otro lado las mismas bases de datos disponibles introducen cierto sesgo, ya que fueron recopiladas con énfasis en determinadas amenazas. En la Tabla 15 se listan las bases de datos y algunas de sus características.

Tabla 15: Listado de fuentes de información disponibles sobre desastres, causados por amenazas naturales.

Autor	Nombre del Documento	Año de Edición	Período de Registro	Fuente Principal	Amenazas
Robert Claxton (6)	Weather based hazards in colonial Guatemala.	1986	Siglos XVI – XIX	Archivo de Indias Otros Autores	Sequías Inundaciones
Lawrence Feldmann (16)	Mountains of fire, land that shakes.	1993	Siglos XVI – XIX	Archivo de Indias Archivo General De Centroamérica	Sismos Erupciones Volcánicas
INSIVUMEH (27)	Inventario de los principales deslizamientos ocurridos en la república de Guatemala.	1991	Siglos XIX - XX (1880 – 1990)	Reportes de Prensa	Deslizamientos
Pedro Tax (58)	Mapa de amenaza de inundación: registro histórico de inundaciones en el país.	1999	Siglos XIX – XX (1800 – 1990)	Reportes de Prensa	Inundaciones
Hector Ponce (56)	Evaluación de crecidas en la república de Guatemala	1972	Siglo XX	Reportes de Prensa	Inundaciones, Flujos de lodo, etc.
FLACSO/LARED (38)	Desinventar; Guatemala	2000	1998 – 2000	Reportes de Prensa	General
CONRED/LARED (37)	Desinventar; Guatemala	2000	1990 - 2000	Reportes de Prensa Archivos de CONRED	General

A pesar de las limitaciones anteriores, estos inventarios proveen información valiosa para conocer áreas que pueden ser afectadas en forma recurrente, para conocer el comportamiento espacial de eventos que cubren áreas extensas e identificar tendencias generales. En la Tabla 15 se presenta un resumen de los eventos registrados en el área por departamento, amenaza y siglo en que ocurrieron.

Tabla 16: Número de reportes de daños por departamento, amenaza y siglo con base en las fuentes de la tabla 15.

		SIGLO					
DEPTO	EVENTO	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	Total general
Chimaltenango	Inundación	0	0	0	0	2	2
	Sismo	0	0	5	4	4	13
	Vendaval	0	0	0	0	2	2
	nd	0	0	0	0	1	1
Total Chimaltenango		0	0	5	4	9	18
Escuintla	Caída de ceniza	0	0	1	0	0	1
	Derrumbe	0	0	0	0	1	1
	Flujo de lodo	0	0	2	0	0	2
	Inundación	0	0	0	0	85	85
	Sismo	0	0	5	3	0	8
	Vendaval	0	0	0	0	3	3
	Nd	0	0	0	0	4	4
Total Escuintla		0	0	8	3	93	104
Sacatepéquez	Caída de ceniza	1	0	1	0	1	3
	Derrumbe	0	0	0	0	10	10
	Deslizamiento	0	0	0	0	2	2
	Erupción	0	0	1	0	0	1
	Flujo de lodo	2	0	1	2	11	16
	Inundación	1	3	1	3	37	45
	Sismo	3	6	29	6	11	55
	Vendaval	0	0	0	0	2	2
	nd	0	0	0	0	9	9
Total Sacatepéquez		7	9	33	11	83	143
Total general		7	9	46	18	185	265

Sobre estos datos cabe discutir algunos aspectos importantes para su correcta interpretación.

- El incremento en el número de reportes por siglo, indudablemente responde a dos factores, primero al incremento de los medios de comunicación y segundo al crecimiento poblacional. El caso de Escuintla es quizás el más conspicuo con relación a lo anterior.
- Los reportes por sismos en el siglo XVIII para Sacatepéquez son notables, veintinueve, pero esto es producto de un solo evento. Si se observa lo anterior y el gran número de reportes sobre inundaciones, es posible reconocer una de las características más importantes, inherentes a los desastres y es el severo impacto que un evento poco frecuente pero de grandes magnitudes puede tener.
- Durante el siglo XX los reportes en Sacatepéquez ocupan aún el segundo lugar entre los tres departamentos. Esto se considera que responde a la alta densidad de población en el departamento y a las características de su territorio, que como se expondrá más adelante presenta condiciones muy propicias para la ocurrencia de

amenazas naturales. Nótese que la distribución de reportes es más homogénea entre amenazas para Sacatepéquez que para Escuintla, donde más del 90% de reportes es de inundaciones.

7.3 CARACTERIZACIÓN DE AMENAZAS

Para los objetivos del presente estudio, esta es la parte más importante, dado que la zonificación pretende en esencia, identificar zonas con distintas condiciones de amenaza y por consiguiente de riesgo bajo el supuesto que fueran ocupadas en el futuro, y con ello establecer restricciones en el uso de la tierra. En el caso que la amenaza que se esté tratando no presente variaciones, la zonificación no tiene sentido, se trata entonces de una constante del territorio. Por otro lado es vital tomar en consideración la forma en que se comporta cada amenaza en particular y como puede afectar la actividad humana.

7.3.1 AMENAZA DE SISMOS

En Guatemala existen una serie de trabajos que han caracterizado la amenaza sísmica a escala nacional, utilizando diversos modelos e incluyendo la información disponible al momento de su realización. En la Tabla 17 se listan los trabajos realizados al respecto.

Tabla 17: Caracterización de la amenaza sísmica para Guatemala.

Autor	Año	Variable Sísmica	Periodos de Retorno	Cobertura
Shah y Kiremidjian (35)	1977	Aceleración Pico del Suelo - Modelo Poisson - Modelo Bayesiano Duración	500 años	Nacional
Monzón (52)	1984	Aceleración Pico del Suelo	Sismo Máximo Probable	Nacional
Ligorría (43)	1995	Aceleración Pico del Suelo	500 años 100 años 50 años	Nacional
Tavakoli y Monterroso (62)	2003	Aceleración Pico del Suelo - Modelación de Monte Carlo.	975 años 475 años 72 años	Nacional

En la figura 27 se muestra la amenaza sísmica de acuerdo al Modelo Bayesiano de Shah y Kiremidjian (35) y Ligorría (43). Se cree que el mapa de Shah muestra el efecto de una mayor cantidad de datos disponibles para el área de Antigua y ciudad capital, denotado por un foco de alta amenaza en esta zona (12). Pero en términos generales se puede observar que son consistentes en cuanto a las magnitudes, con valores entre 0.40 y 0.46 G's (1G = Gravedad = 9.8 m/s²).

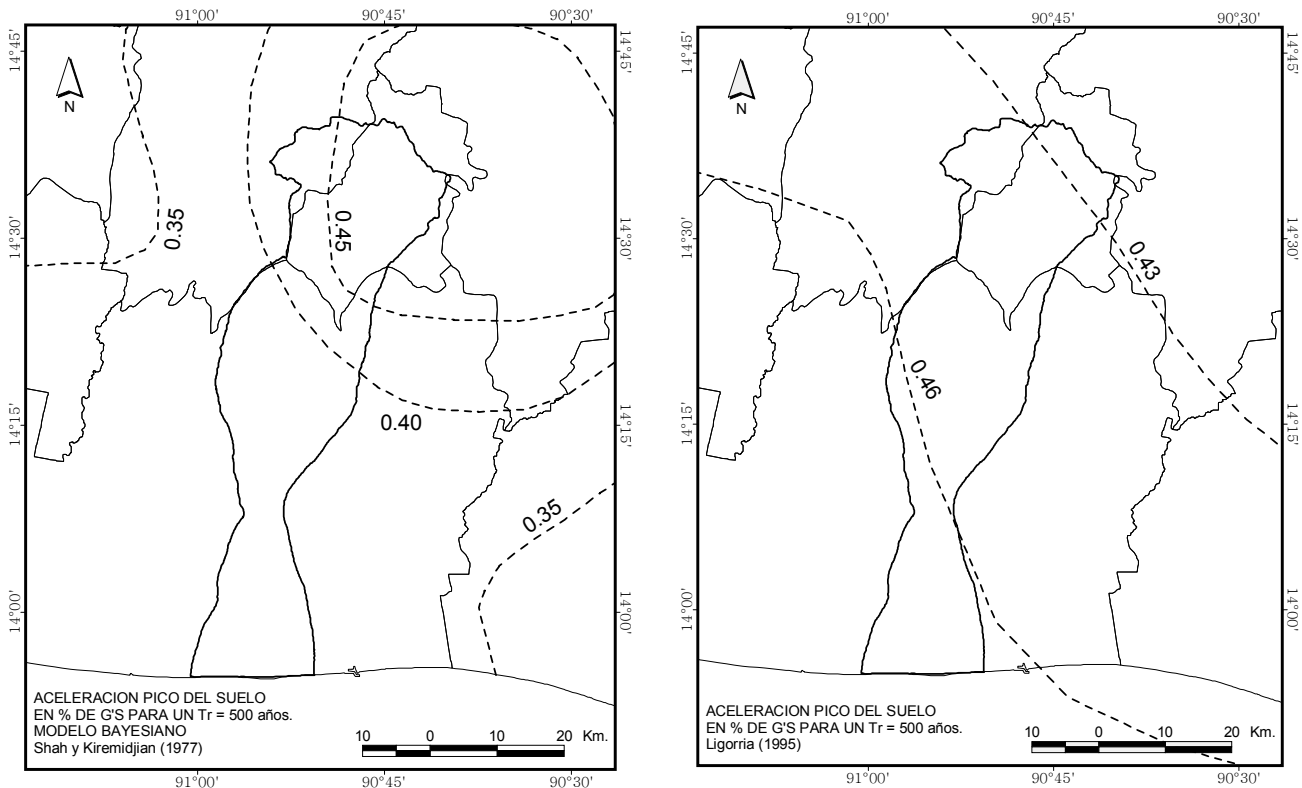


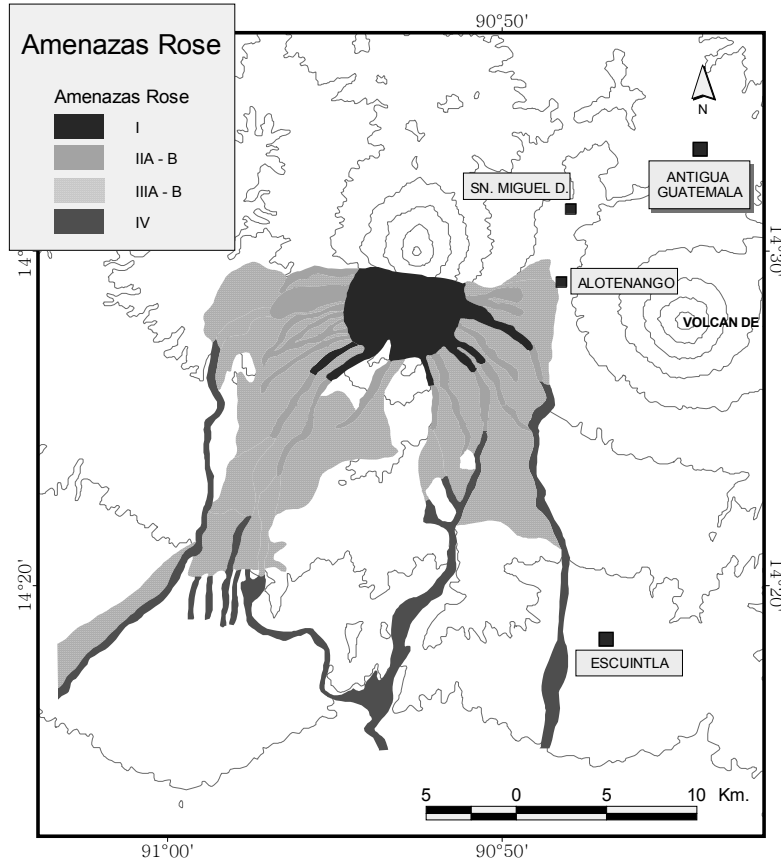
Figura 27: Amenaza sísmica Shah & Kiremidjian (1977) y Ligorria (1995) para $Tr = 500$ años (período de retorno). Isoaceleración en porcentaje de gravedad.

Para el área de la cuenca del Río Achiguate, no se encontraron trabajos que definan las áreas con amenaza de licuefacción, ni información sobre las condiciones que determinan la probabilidad de ocurrencia de la misma. Por ello no se incluye la amenaza de licuefacción dentro de la propuesta final de zonificación.

7.3.2 AMENAZA DE ACTIVIDAD VOLCÁNICA

En el inventario de desastres presentados en la Tabla 15 se presentan dos eventos de caída de ceniza y uno de erupción, para los que se reportan daños, sin embargo existen reportes sobre la ocurrencia de más de 60 erupciones desde el siglo XVI, y el conocimiento teórico es suficiente para reconocer que de haber existido actividad humana en el área que afectaron esta fue dañada por las erupciones.

Rose, Et. Al. (58) hicieron la primera caracterización de amenazas para el Volcán de Fuego, haciendo uso de los reportes históricos, trabajo de campo e investigaciones especializadas en las décadas de los 70's y 80's. Estos mapas de amenaza muestran una importante influencia de la actividad reciente del volcán en los años 70's.



El mapa ha sido simplificado para fines de presentación en las siguientes unidades.

I : Amenaza de caída de bloques, flujos de lava y flujos piroclásticos.

II : Amenaza de flujos piroclásticos.

III: Amenaza de lahares.

IV: Amenaza de inundaciones

Figura 28: Amenazas para el Volcán de Fuego (Rose, Et. Al. 1987).

Recientemente, Wallace, Et. Al. (68), realizaron una nueva caracterización de la amenaza volcánica, incorporando el conocimiento sobre los eventos comunes en el volcán, inferido de testimonios históricos y depósitos prehistóricos, y el conocimiento sobre el comportamiento de eventos de similar naturaleza en otros volcanes del mundo (Figura 29). No está demás indicar que Rose participó en esta segunda caracterización. Las diferencias entre los mapas responden en principio a que se han considerado eventos de mayor magnitud y menor frecuencia en el segundo, así como a la modelación de lahares de volúmenes hipotéticos.

El mapa ha sido simplificado para fines de presentación en las siguientes unidades.

- I : Amenaza de flujos piroclásticos.
- II : Amenaza de oleadas piroclásticas.
- III: Amenaza de lahares (16 Millones de m³).
- IV: Otras áreas que podrían ser afectadas por lahares.

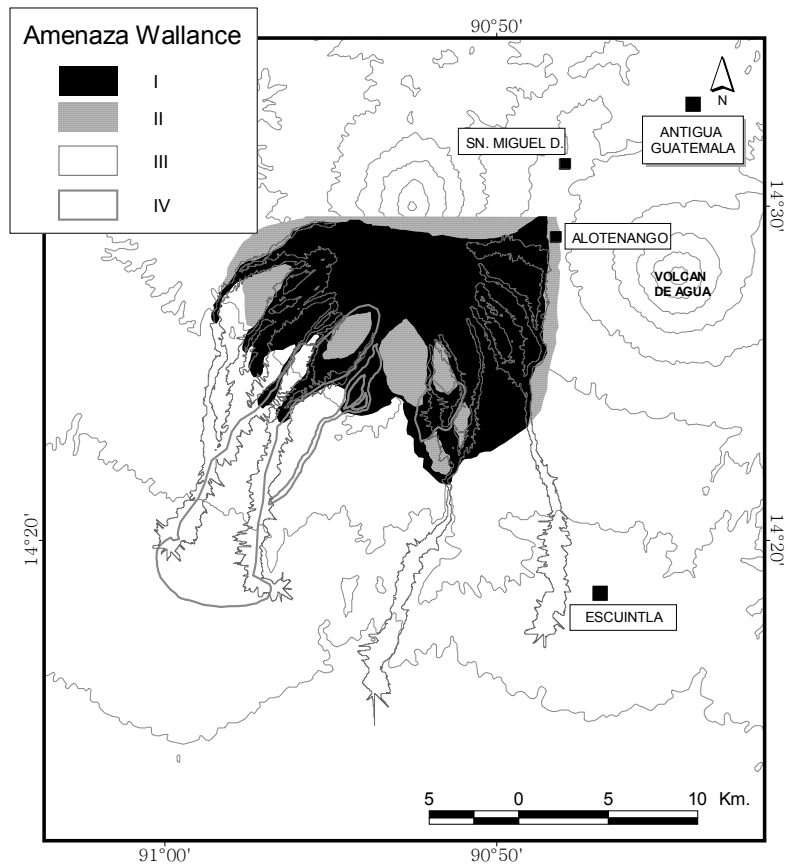


Figura 29: Amenazas para el Volcán de Fuego (Wallance , Et. Al. 2001).

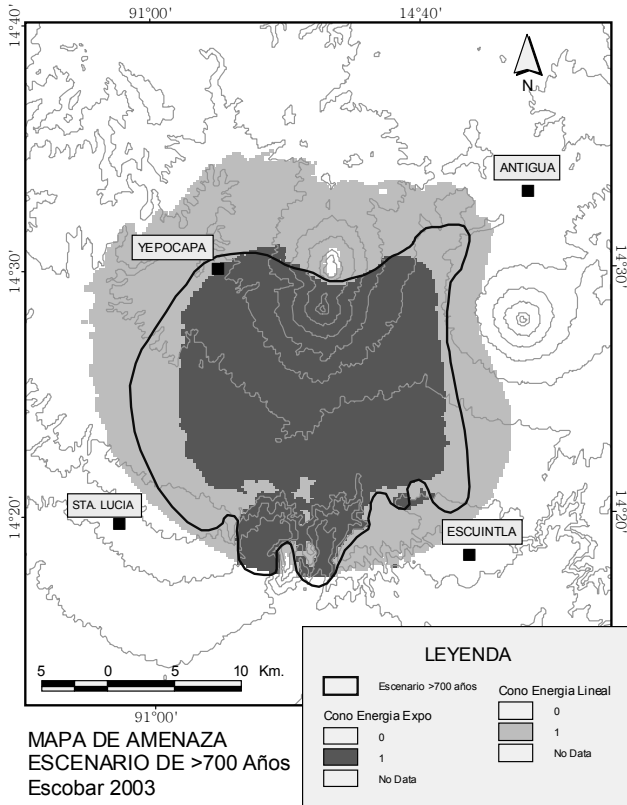
Escobar y Anleu (13) generaron un mapa de amenaza para una erupción mayor a las consideradas en los mapas de Rose y Wallance, utilizando el modelo del cono de energía (JICA 2003) bajo las condiciones que se especifican a continuación:

- Altura de colapso (H) = 4300 msnm.
- Relación H/L² = Dos variaciones como se muestra en la Tabla 17.
- Alcance (L) = 20 km del cráter.

Tabla 18: Relaciones H/L utilizadas por Escobar y Anleu para modelar erupción con altura de columna de 4300 msnm. en el volcán de Fuego.

Distancia desde el Cráter	Rango de alturas del segmento	Relación H/L Exponencial	Relación H/L Lineal
0 – 1500	4300 – 3522	1:1.9	1:5
1500 – 4500	3522 – 2362	1:2.6	
4500 – 8000	2362 – 1483	1:4	
8000 – 12500	1483 – 815	1:6.7	
12500 – 16000	815 – 511	1:11.5	
16000 – 20000	511 – 300	1:19	

² Relación entre la distancia recorrida por el flujo desde el cráter (H) y la altura descendida por el flujo (H) en esa distancia.



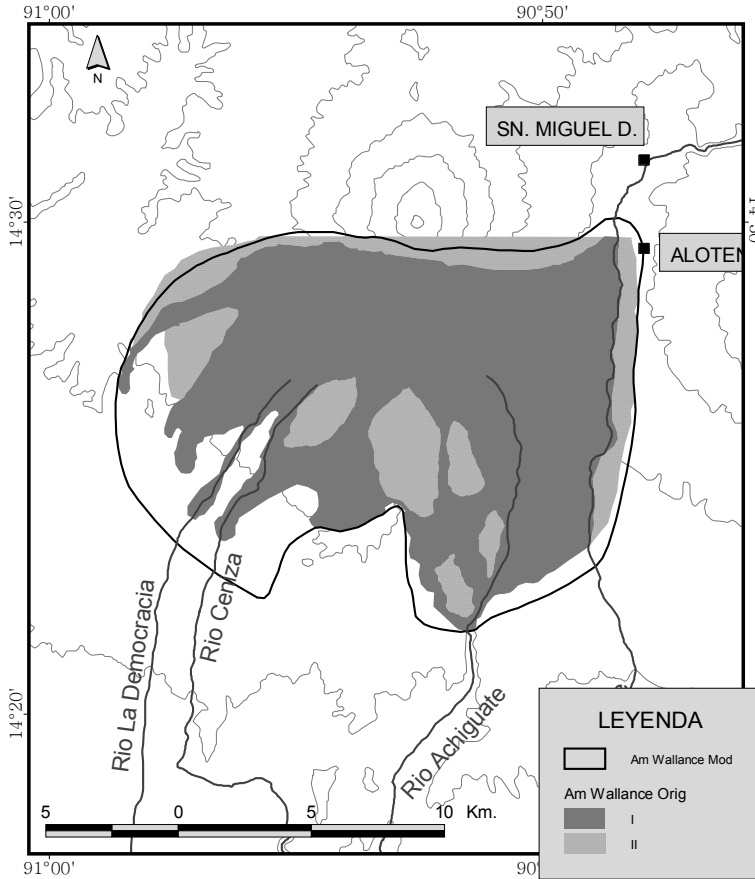
Utilizando la información publicada por el Programa Vulcanológico Mundial del Museo Smithsonian (Smithsonian National Museum of Natural History, Global Volcanism Program, Anexo 2) (17), Escobar (13) determinó la probabilidad de ocurrencia de eventos de distinta magnitud descrita como el Índice de Explosividad Volcánica (IEV) para el volcán de Fuego. Posteriormente relacionó el IEV con los mapas de amenaza presentados y con ello obtuvo la probabilidad de que determinadas áreas sean afectadas por flujos piroclásticos. Esto lo hace fundamentándose en el hecho que la actividad del volcán de Fuego es bastante típica y se estima que en el futuro será similar a lo ocurrido en el pasado.

Figura 30: Mapa de amenaza de flujos piroclásticos para un $Tr > 700$, aplicando dos variantes del cono de energía (Escobar & Anleu 2003).

Los resultados aparecen en la Tabla 19. Nótese que para cada escenario eruptivo hay un rango de IEV asociado que se muestra entre paréntesis, esto es porque particularidades de la erupción pueden definir áreas afectadas distintas aún con un mismo IEV. Fuera de paréntesis se muestra el IEV más probable para cada escenario.

Tabla 19: Probabilidad de ocurrencia para distintas magnitudes de IEV y mapa de amenaza asociado.

Mapa de Amenaza	IEV	Tr Escobar	Pb
Rose, B.	3 (2 – 4)	15 / 32	0.068 / 0.0309
Wallance, J.	4 – 4.5 (4 – 6)	70 / 152	0.014 / 0.0066
Escobar, R.	6 (4 – 7)	> 700 / 2000	< 0.0014 / 0.0005

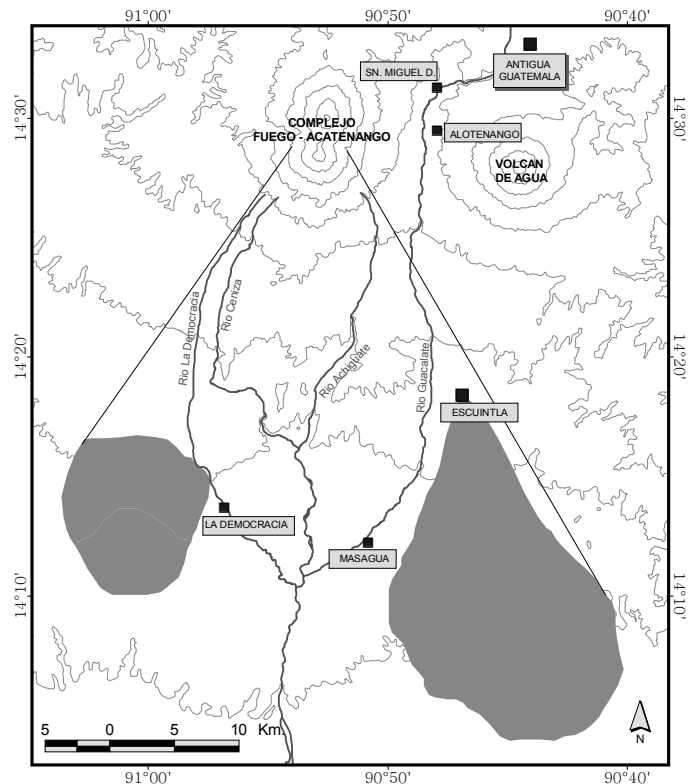


A su vez, Escobar (13) propone modificaciones al mapa de Wallace argumentando que bajo las condiciones topográficas de la ladera Oeste es más fácil que se generen oleadas piroclásticas. Matías (47) coautor del trabajo de Wallace, explica además que el mapa se trazó de esta manera porque no se encontraron depósitos mas lejanos sobre la ladera Oeste. Ante esto Escobar argumenta que esto no significa que los flujos no hayan viajado más, y que lo mas probable es que los depósitos de los flujos hallan sido erosionados o cubiertos por depósitos aluviales. En la Figura 31 se muestra el mapa original y la modificación por Escobar (13).

Figura 31: Amenaza para el Volcán de Fuego (Wallace, Et. Al. modificado por Escobar, 2002).

En los mapas anteriores no se muestra la amenaza de flujos de escombros asociados al colapso del edificio volcánico. Aunque son eventos extremos y de muy baja probabilidad de ocurrencia, estos han ocurrido en el pasado. En la Figura 32 se muestran remanentes de depósitos de dos flujos asociados al complejo volcánico Fuego – Acatenango. De acuerdo con Wallace (68) la probabilidad de ocurrencia de los mismos es del orden de 1 en 20,000 años ($P_b = 0.00005$).

Figura 32: Depósitos de colapsos del complejo Fuego - Acatenango (Wallace, Et. Al. 2001).



7.3.3 AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS

Existen dos estudios relacionados a la caracterización de la amenaza de deslizamientos en el área de estudio. En 1976, Harp, Et. Al. (20) mapearon gran parte del área en donde se generaron deslizamientos producto del terremoto de 1976 por medio de fotointerpretación y verificación de campo. La Figura 33 muestra los deslizamientos mapeados por Harp, Et. Al. y su relación con la geología del área. El trabajo de Harp incluye algunos deslizamientos identificados como pre 1976, los cuales se han excluido en este trabajo para fines de análisis.

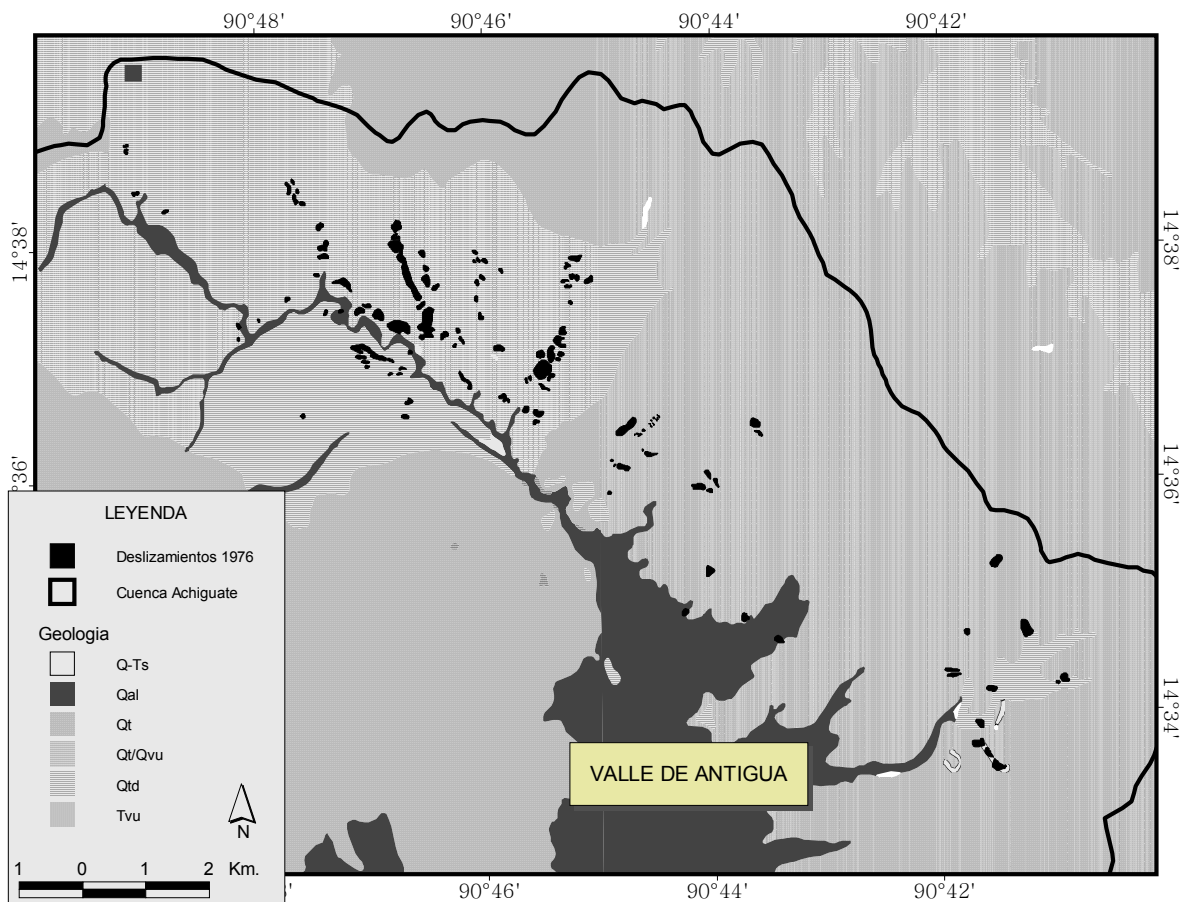


Figura 33: Deslizamientos mapeados por Harp (1976) en la cuenca del Río Achiguate y su relación con la geología del área.

De los deslizamientos disparados por el terremoto de 1976, y que fueron mapeados por Harp dentro de la cuenca del Río Achiguate, aproximadamente 1,034,000 m² fueron afectados en la unidad de Depósitos de Tefra y Diamictones Pomáceos (Qtd), equivalentes a un 77% del área total afectada. Y aproximadamente 309,000 m² fueron afectados en la unidad de Depósitos de Tefra, Ceniza y Paleosols (Qt), equivalentes a un 23% del área total afectada. Esto indica en forma preliminar que la primera de estas unidades, es aproximadamente 3 veces más susceptibles a ser afectada por deslizamientos que la segunda, considerando que de acuerdo con Espinosa, A., Et. Al (15) en esta zona no hubieron diferencias significativas en la intensidad del sismo y que ambas unidades ocupan áreas similares. Sin embargo es importante considerar que un alto porcentaje del área de Qtd está conformada por la planicie en donde se ubica Parramos, área que dada su escasa pendiente no es susceptible a la ocurrencia de deslizamientos. Además Harp (20)

indica que la amplificación del movimiento sísmico puede haber sido otro factor que afectó la concentración de los deslizamientos. Amplificación que está determinada principalmente por las características topográficas y la frecuencia de las ondas sísmicas. Ante esto es importante mencionar que en la unidad Qtd, la zona en donde ocurrieron los deslizamientos está conformada por lo que tradicionalmente se conocen como "barrancos", que para fines de este trabajo se definen como depresiones en depósitos de tefra, formadas por erosión. En la unidad de Qt, la zona en donde ocurrieron los deslizamientos está conformada por laderas de montañas, cuya génesis y topografía es distinta a la de los barrancos, y a las cuales se les ha denominado "laderas estructurales".

La zona de barrancos comprende 13.3 Km² (13.3 Millones de m²) que incluyen las planicies aluviales del fondo. Producto del terremoto de 1976, poco más de 1 Km² fue afectado por deslizamientos, lo que representa el 7.7% de la superficie total de la zona de barrancos. Dentro de los mismos se evaluó la relación entre su ocurrencia y la pendiente, observándose que el 94% de ellos se concentra entre los 15 y los 40 grados de pendiente, como se observa en la figura 7.9. La zona de ladera estructural comprende 58.7 Km² (58.7 Millones de m²). Producto del terremoto de 1976, poco más de 0.37 Km² fue afectado por deslizamientos, equivalente al 0.63% de la área de ladera estructural. Si consideramos el porcentaje de área deslizada en 1976 en cada unidad, la zona de barrancos es 12 veces más susceptible a la ocurrencia de deslizamientos. La ocurrencia de deslizamientos en la zona de laderas estructurales, sigue la misma tendencia que en la zona de barrancos, con ligeras diferencias como la ocurrencia de deslizamientos en el rango de 5.1 a 10 grados.

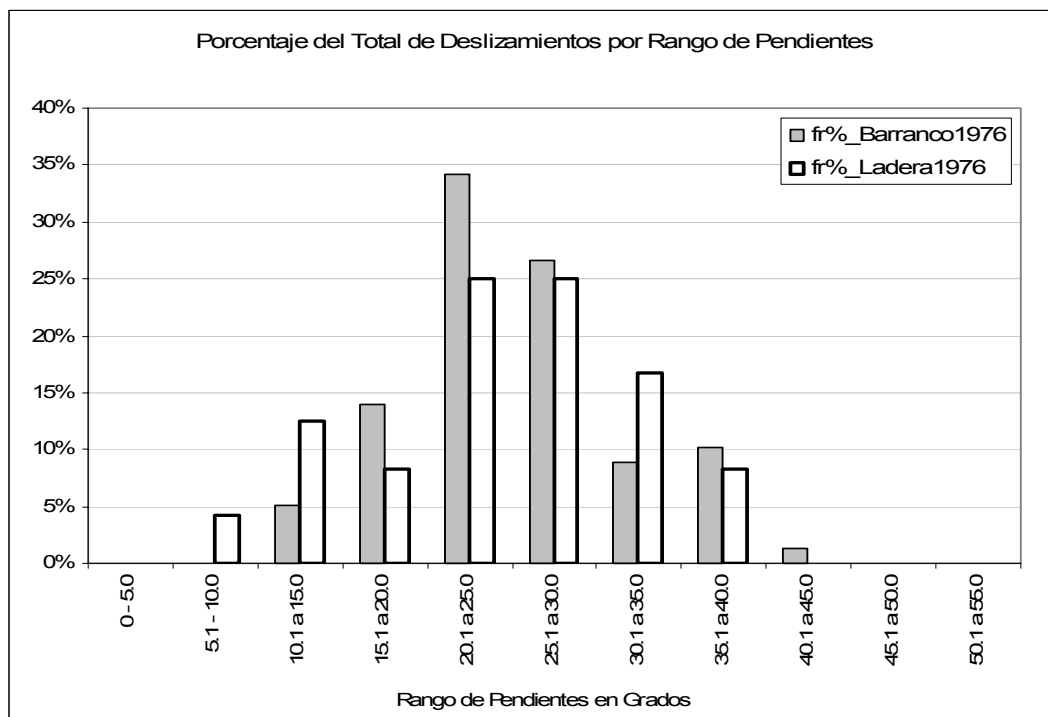


Figura 34: Frecuencia relativa de ocurrencia deslizamientos por unidad geomorfológica y rango de pendientes, basado en los deslizamientos mapeados por Harp en 1976.

Aunque se reconoce que no hay relación directa entre la intensidad obtenida por Espinosa, A., Et. Al (15) y la ocurrencia de deslizamientos, debido a la influencia de la amplificación sísmica generada por la topografía del terreno (20), para tener una idea básica de la probabilidad de ocurrencia de estos eventos, se comparó el sismo de 1976 en términos de aceleración pico del suelo con los distintos modelos de amenaza que se han generado para el país. Debido a que los modelos de amenaza sísmica están expresados en Aceleración Pico del Suelo (PGA), se transformaron las Intensidades del sismo de 1976 a PGA, utilizando dos funciones de conversión entre Intensidad del sismo y PGA. En la Tabla 20 se muestran los resultados.

Tabla 20: Relación entre la aceleraciones pico del terreno en el área de estudio, producto del terremoto de 1976 y los modelos de amenaza sísmica disponibles, aplicando dos modelos de conversión Intensidad – PGA.

Modelo de Amenaza Sísmica	PGA 1976 Fx Gutenberg – Richter = 0.30 g (gravedades)	PGA 1976 Fx Ambraseys = 0.54 g (gravedades)
Monterroso Tr 975 años = 0.6 g	<	<
Shah (Poison y Bayesiano) Tr 500 años = 0.45 g	<	>
Ligorría Tr 500 años = 0.43 g	<	>
Monterroso Tr 475 años = 0.43 g	<	>
Ligorría Tr 100 años = 0.28 g	>	>
Monterroso Tr 72 años = 0.2 g	>	>

Así para ambas funciones de conversión Intensidad – PGA, el terremoto de 1976 presenta intensidades mayores a las de los dos modelos de amenaza sísmica para 100 y 72 años de período de retorno, por lo que se considera con un alto grado de certeza que el movimiento del suelo que se presentó en el área de estudio producto del terremoto de 1976, tiene un período de retorno superior a los 100 años. Para los sismos de 500 y 475 años de período de retorno, el sismo de 1976 se presenta con una intensidad menor que estos utilizando la función de conversión Gutenberg – Richter, pero mayor que estos, utilizando la función de conversión Ambraseys.

Si se considera que el movimiento del terreno generado por el terremoto de 1976 en el área de estudio, se corresponde con un período de retorno de 500 años, a los sismos como única causa de ocurrencia de deslizamientos y que solamente sismos que produzcan movimientos similares son capaces de generar deslizamientos, entonces es posible conocer el riesgo que una vivienda ubicada al azar en cada una de las zonas presenta. Considerando una

vulnerabilidad absoluta de la vivienda ante deslizamientos y que el 7.7% de área afectada en la zona de barrancos y de 0.63% en la zona de laderas, resulta que la vivienda presenta una probabilidad anual de 0.00015 (1.5 / 10,000) y de 0.000012 (1.2 / 100,000) respectivamente, de ser destruida por un deslizamiento.

En 2003 JICA (36) realizó un mapeo de deslizamientos por medio de fotointerpretación y relacionó las variables de litología, pendiente y geoforma para inferir parcialmente la amenaza en áreas en donde no se identificaron deslizamientos, sin hacer consideraciones temporales. En la Figura 35 se muestran los deslizamientos identificados en el área de estudio definida por el proyecto de JICA, su ubicación con respecto a la cuenca y con los deslizamientos mapeados por Harp en 1976.

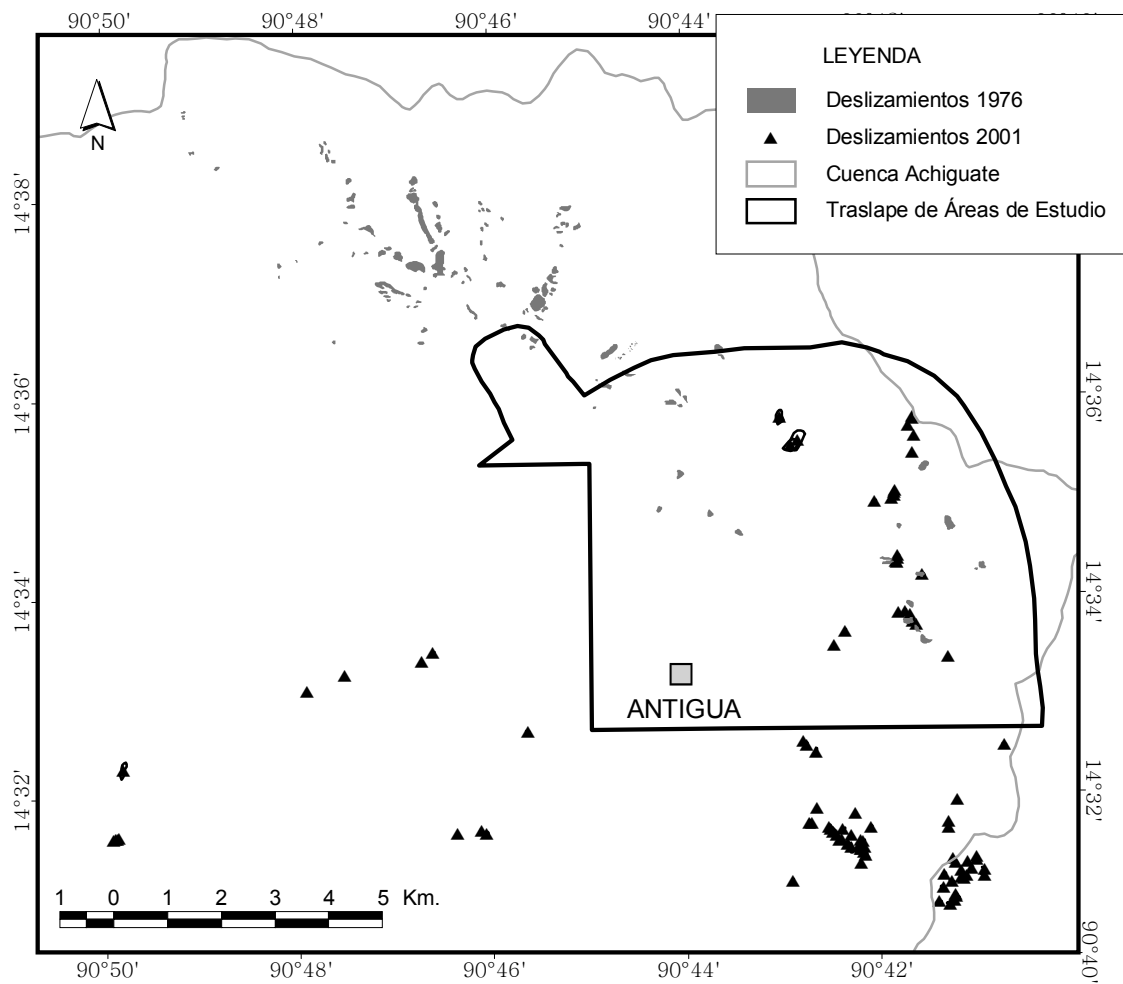


Figura 35: Deslizamientos mapeados por JICA (2001) en la cuenca del río Achiguate.

Nótese que las áreas mapeadas por JICA y Harp se traslapan en una pequeña porción al norte de Antigua. El área de traslape es de suma importancia porque al comparar los dos mapeos e identificar coincidencias, se puede estimar el tiempo en que nuevas áreas fueron afectadas por deslizamientos y con ello obtener una estimación de la distribución temporal de los deslizamientos. Como resultado de lo anterior se obtuvo que en los 25 años entre los mapeos de JICA

y HARP aproximadamente 115,000 m² fueron afectados por deslizamientos después de 1976. Esta área representa un 0.25% del área de traslape (en ladera). Al realizar el mismo análisis que con el área de barrancos, se obtiene que el riesgo anual de una vivienda ubicada al azar en esta zona, de ser destruida, es de 1/10,000 (0.0001). Nótese la similitud en el orden de magnitud con la probabilidad obtenida para la zona de barrancos. Esto no es consistente con los deslizamientos de 1976, ya que para el evento de 1976 presentan un tercio de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en barrancos. Esto sugiere la posible influencia que la topografía tiene en la ocurrencia de deslizamientos disparados por sismos, debido a la amplificación. Entre 1976 y 2006 no han ocurrido sismos comparables con el de 1976, pero si eventos de lluvia significativos en 1998 (Mitch), y más recientemente y quizás más significativo en 2005 (Tormenta Stan).

El trabajo realizado en 2001 por JICA establece una relación entre la frecuencia de ocurrencia de deslizamientos por kilómetro cuadrado y la pendiente de la ladera. Se tomaron estos datos y se compararon con los de los deslizamientos generados por el terremoto de 1976 (Figura 36).

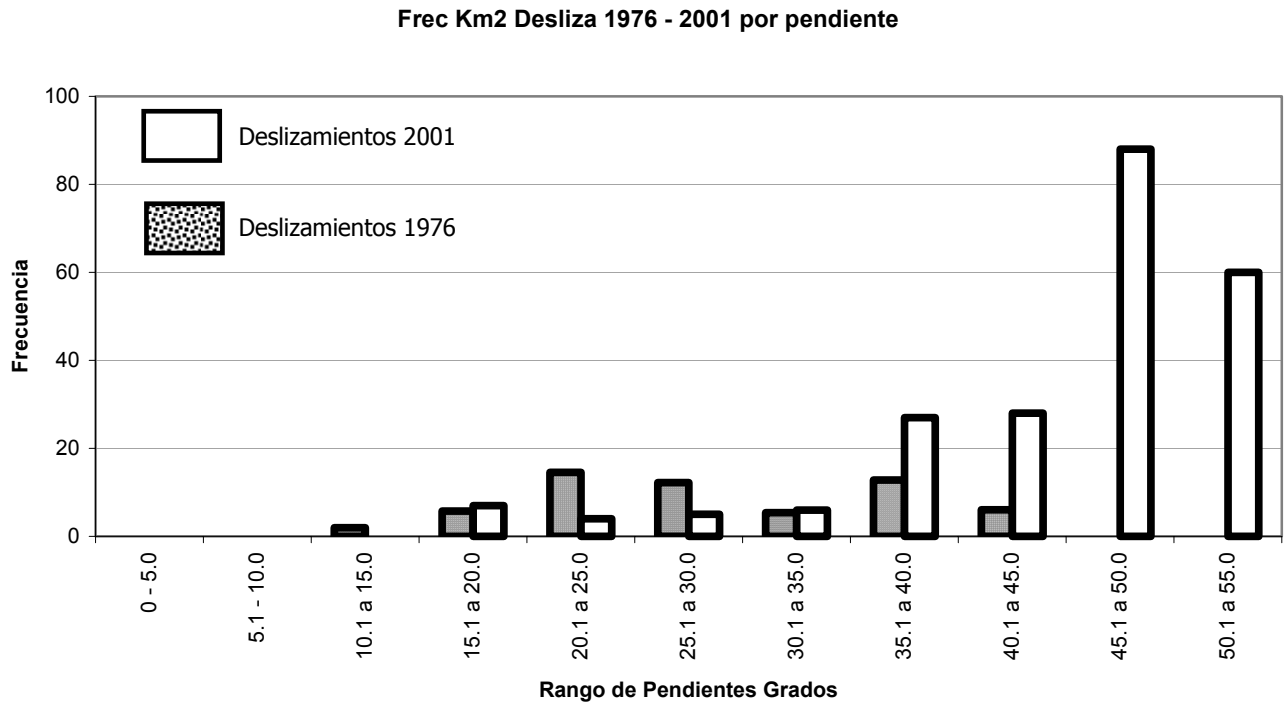


Figura 36: Relación entre pendiente del terreno y frecuencia de deslizamientos para JICA y Harp.

Como puede observarse existe una escasa o nula relación entre el comportamiento de los deslizamientos generados por el terremoto de 1976 y los mapeados por JICA en 2001. No se tiene certeza en cuanto a las causas de lo anterior, pero existen varios factores que pueden influir en los resultados. Entre ellos se puede mencionar que el área de estudio de Harp (20) incluye una unidad geológica y geomorfológicamente distinta, el efecto de la topografía sobre el movimiento que generó los deslizamientos de 1976 y por último la definición de la pendiente del evento.

Sobre la base de lo anterior se define que un deslizamiento de tamaño unitario, en el área definida por el autor como barrancos y con pendientes superiores a los 15 grados, presenta una probabilidad de ocurrencia de 1.5 en 10,000 ($P_b = 0.00015$) y que áreas con pendiente menor a 15 grados en el área definida como barrancos, presentan una probabilidad de ocurrencia de deslizamientos poco significativa. Las áreas de ladera restantes con pendientes superiores a los 35 grados, presentan una probabilidad de ocurrencia de 1 en 10,000 ($P_b = 0.0001$).

7.3.4 AMENAZA DE FLUJOS DE ESCOMBROS

En el registro histórico para el área de la cuenca del río Achiguate, se presentan 18 eventos caracterizados como flujos de escombros. Sin embargo es de hacer notar que en el Volcán de Fuego, durante los períodos de actividad y algunos años posteriores, se generan varias decenas de flujos anualmente, distribuidos en las distintas quebradas que lo rodean, y en un alto porcentaje se confinan en los cauces, siendo esta una de las causas por la cual no son documentados.

Tabla 21: Registro histórico documentado de ocurrencia de flujos de escombros dentro del área de la cuenca del río Achiguate (Fuente: Claxton, R., 1986. INSIVUMEH, 1991. INSIVUMEH, 1999).

No	EVENTO	MUNI	DEPTO	LUGAR	ELEMENTO NATURAL	AÑO
19	Flujo de lodo	Nd	Escuintla	San Diego	Volcan de Fuego	1717
20	Flujo de lodo	Masagua	Escuintla	Masagua	Rio Guacalate	1717
2	Flujo de lodo	Ciudad Vieja	Sacatepequez	Ciudad Vieja	Volcan de Agua	1541
3	Flujo de lodo	Nd	Sacatepequez	nd	Volcan de Agua	1541
29	Flujo de lodo	Nd	Sacatepequez	nd	Volcan de Agua	1718
65	Flujo de lodo	San Miguel Dueñas	Sacatepequez	nd	Volcán Acatenango (Rio Blanco)	1874
66	Flujo de lodo	Pastores	Sacatepequez	San Luis Las Carretas	Rio Paso de San Luis	1874
97	Flujo de lodo	Ciudad Vieja	Sacatepequez	San Lorenzo El Cubo	Volcan de Agua	1933
98	Flujo de lodo	Antigua	Sacatepequez	San Pedro Las Huertas	Volcan de Agua	1933
110	Flujo de lodo	Antigua	Sacatepequez	Antigua	nd	1933
132	Flujo de lodo	Ciudad Vieja	Sacatepequez	nd	Volcan de Agua	1969
133	Flujo de lodo	Sta. María de Jesús	Sacatepequez	Santa María de Jesús	Volcan de Agua	1969
228	Flujo de lodo	Antigua	Sacatepequez	San Juan del Obispo	Volcan de Agua	1993
232	Flujo de lodo	Antigua	Sacatepequez	Antigua	Rio Pensativo	1996
233	Flujo de lodo	Antigua	Sacatepequez	Antigua	Rio Pensativo	1996
241	Flujo de lodo	San Miguel Dueñas	Sacatepequez	nd	Volcan Acatenango	1999
242	Flujo de lodo	Alotenango	Sacatepequez	Las Lajas	Volcan de Fuego	1999
248	Flujo de lodo	Pastores	Sacatepequez	San Luis Pueblo Nuevo	nd	1999

Nd = No hay datos

De los 18 registros, 11 ocurrieron asociados a alguno de los tres volcanes ubicados en la cuenca del río Achiguate. Esto es un indicador de la inestabilidad que estos elementos geomorfológicos presentan, con relación a otros elementos, de tal manera que para su análisis, se consideran por separado los flujos de escombros que ocurren asociados a los volcanes y los flujos de escombros que no ocurren asociados a los volcanes.

7.3.4.1 Flujos de Escombros Asociados a Volcanes

De los 11 eventos dentro del área de estudio asociados a los volcanes, registrados en las fuentes consultadas, 8 han ocurrido en el volcán de Agua. Sin embargo se conoce de otros tres eventos asociados al volcán de Agua. El más reciente ocurre el 13 de junio de 2002, afectando algunas viviendas al norte de Ciudad Vieja y la carretera que conduce hacia Alotenango (visita personal al área). Existen otros dos reportes fuera del área de estudio, pero muy probablemente asociados al volcán de Agua. El que con mayor certeza se puede asociar al volcán de Agua ocurrió el 26 de junio de 1988, el otro reporte es del 16 de septiembre del mismo año, pero la información es muy ambigua para determinar con certeza si está asociado o no al volcán por lo que no se considera en el presente trabajo. En base a esta información y sin considerar el último de los eventos acá mencionados, se puede trazar la estadística de 10 eventos asociados al volcán de agua, como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22: Registro histórico de flujos de escombros asociados al Volcán de Agua.

Siglo	XVI	XVIII	XIX	XX	XXI
No. de Eventos	2	1	0	6	1
Eventos por Año	0.02	0.01	0.00	0.06	0.20

Como se puede observar, existe un incremento notable en los reportes hacia el siglo XX, lo cual responde a lo mencionado en el inciso 7.1 con respecto a las estadísticas de eventos dentro del área de estudio. Considerando lo anterior, se estima que el siglo XX es el más representativo de los eventos que ocurren asociados al volcán de Agua en términos globales. Por otro lado es necesario tomar consideraciones especiales con respecto a la magnitud de los eventos, expresada como el volumen de material acarreado. En 2001, Schilling (59) modeló el tránsito de distintos volúmenes de flujos de escombros en las quebradas procedentes del volcán de Agua. Utilizando esta información como base y comparando las áreas de afección, se ha estimado el orden de magnitud del volumen de los eventos reportados, como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23: Probabilidad de ocurrencia para flujos de escombros de distintos volúmenes provenientes del volcán de Agua.

Volumen	No Eventos	Observaciones	Tr (Registro Completo)	Tr (Registro Siglo XX)	Pb_Quebrada / Registro
< 500 K m ³	8 / 5	Ninguna.	≈ 60	≈ 20	0.00034 / 0.0010
500 K – 1 M m ³	1	1969: Daños en Santa María de Jesús.	≈ 500	≈ 100	0.00004 / 0.0002
1 M – 2 M m ³	1	1541: Destrucción de Ciudad Vieja.	≈ 500	---	0.00004
2 M – 4 M m ³	0	Ninguna.	---	---	---
> 4 M m ³	0	Ninguna.	---	---	---

Las probabilidades de ocurrencia así estimadas aplican para la ocurrencia de un flujo de escombros en las laderas del volcán. Sin embargo para fines de planificación se considera necesario establecer la probabilidad de ocurrencia para área particulares. Como una primera aproximación se hizo esta estimación, normalizando la probabilidad entre el número de quebradas que fueron modeladas por Schilling (2001), un total de 50, mostrándose los resultados en la última columna de la Tabla 23. Nótese que existe una variación importante en la probabilidad de ocurrencia dependiendo de los registros que se utilicen, de acuerdo con los argumentos planteados en el inciso 7.1 se considera que para los eventos < 500 Mil m³, y de 500 Mil – 1 Millón m³, la probabilidad está mejor representada por los registros del siglo XX, y para el evento entre 1 Millón – 2 Millones m³, la probabilidad dada por el registro completo se considera representativa. Para los flujos de escombros también se puede considerar una vulnerabilidad total de las viviendas y por consiguiente el riesgo que una vivienda ubicada en un área susceptible de ser afectada por un flujo de lodo proveniente del volcán de Agua, sea destruida, es igual a la de la ocurrencia de los mismos.

El volcán Acatenango ha permanecido con un grado de actividad poco significativo en cuanto a la deposición de material no consolidado en sus laderas. Bajo estas condiciones, solamente se tienen reportes de dos flujos de escombros que puede asociarse al volcán Acatenango (el río Blanco desciende del volcán Acatenango) en los últimos 131 años, con uno solo ocurriendo en el siglo XX en contraste con los 5 eventos ocurridos en el volcán de Agua. Siguiendo la metodología utilizada para estimar la probabilidad de ocurrencia de los flujos en el volcán de Agua, resulta que cada una de las 28 quebradas en las que se modeló la distribución de flujos de escombros, presentarían una probabilidad de ocurrencia de flujos de escombros de 0.00055. Esta probabilidad de ocurrencia es del orden de magnitud de la obtenida para los flujos con volúmenes de 500 Mil – 1 Millón de m³ en el volcán de Agua de 0.0002. Con base en lo anterior, y a que la menor densidad de población en los alrededores del Volcán Acatenango pueden dar cuenta de menos registros de eventos y al no contar con elementos que permitan determinar lo contrario, se considera válido que la ocurrencia de flujos de escombros en el Volcán Acatenango presentan un comportamiento similar a los del Volcán de Agua.

7.3.4.2. Flujos de Escombros Recientes Asociados a Volcanes

Dada la escasa información existente sobre la ocurrencia de flujos de escombros en la cuenca, se considera valioso analizar casos particulares de flujos de escombros bajo condiciones similares en Guatemala, en este caso asociados a volcanes en años recientes. En los últimos cinco años se conocen tres eventos, los que se detallan en la Tabla 24.

Tabla 24: Detalle de los flujos de escombros asociados a volcanes en el siglo XXI.

Volcán	Fecha	Volumen Estimado	Lugar
Agua	13/06/2002	> 50,000 m ³	Ciudad Vieja
Atitlán	12/09/2002	50,000 – 100,000 m ³	Aldea El Porvenir, San Lucas Tolimán
Tolimán	04/10/2006	1,000,000 m ³	Aldea Panabaj, Santiago Atitlán

Los dos primeros eventos fueron generados por lluvias muy localizadas, sin la influencia de eventos meteorológicos extremos. Mientras que el último se generó por las lluvias causadas por la influencia de la Tormenta Tropical Stan. Para ninguno de estos eventos existen registros de lluvia en un radio de 1 km. desde la cima de los edificios volcánicos, pero ante la falta de estos datos se considera válido utilizar la información de las estaciones más cercanas al sitio como referencia de los niveles de lluvia que generaron los flujos. Así en la Tabla 25, se muestran los registros de lluvia diaria para un día antes que ocurriera el evento, el día en que ocurrió el evento y un día después de ocurrido el evento, de las estaciones más cercanas al lugar de origen del flujo.

Tabla 25: Registros de lluvias diarias en las estaciones cercanas a los sitios en donde ocurrieron flujos de escombros en el siglo XXI.

Volcán Atitlán - Evento 2002 (12/09/2002)

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALT	Pp (mm) 10_09_02	Pp (mm) 11_09_02	Pp (mm) 12_09_02	Pp (mm) 13_09_02
Santiago Atitlán	14° 37' 54"	91° 13' 53"	1580	8.6	14.8	0.0	12.6
El Tablón	14° 47' 25"	91° 10' 55"	2397	41.5	1.0	0.0	2.4
Sto. Tomás Perdido	14° 35' 30"	91° 07' 37"	1243	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos
Moca	14° 32' 00"	91° 14' 10"	940	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos
Los Tarrales	14° 31' 20"	91° 08' 08"	760	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos
Pp Pb 0.50 = 60			Pp Pb 0.10 = 100			Pp Pb 0.03 = 150	

Volcán Tolimán - Stan (04/10/2005)

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALT	Pp (mm) 03_10_05	Pp (mm) 04_10_05	Pp (mm) 05_10_05	Pp (mm) 06_10_05
Santiago Atitlán	14° 37' 54"	91° 13' 53"	1580	13.4	57.2	230.7	152.5
El Tablón	14° 47' 25"	91° 10' 55"	2397	19.5	56.4	166.7	49.2
El Capitan	14° 38' 35"	91° 08' 26"	1562	19.0	44.0	144.5	75.0
Sto. Tomás Perdido	14° 35' 30"	91° 07' 37"	1243	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos
Moca	14° 32' 00"	91° 14' 10"	940	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos
Los Tarrales	14° 31' 20"	91° 08' 08"	760	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos	No se tienen datos
Pp Pb 0.50 = 60			Pp Pb 0.10 = 100			Pp Pb 0.03 = 150	

Al comparar el nivel de la lluvia pico de las estaciones con los mapas de isoyetas de lluvias máximas de 24 horas, para períodos de retorno de 2, 10 y 30 años del Atlas Hidrológico (28, 29, 30), se obtuvo una idea aproximada de la probabilidad de ocurrencia asociada a los flujos de escombros, siguiendo una metodología análoga a la utilizada para los deslizamientos generados por el terremoto de 1976. Como se puede observar para el evento en el volcán Tolimán (2002), las lluvias registradas en estas estaciones no alcanzan siquiera una probabilidad de ocurrencia de 0.5 ($Tr = 2$ años). Lo anterior sugiere que el evento de 2002 sobre el volcán Tolimán, muy probablemente fue generado por lluvias localizadas quizás con una cobertura inferior a los 25 km²; es importante aclarar que en los días alrededor de la ocurrencia del flujo de 2002 no se identifica un evento meteorológico relevante, lo cual es otro elemento de juicio para plantear la posibilidad que se trató de una lluvia localizada.

Para el evento en el volcán Atitlán, la lluvia pico en dos de las estaciones durante Stan se encuentran muy cercanas a las de probabilidad de 0.03. Sin embargo en la estación Santiago Atitlán, la más cercana y ubicada del lado de barlovento del evento meteorológico, se registra una lluvia pico muy por encima de los 150 mm y por consiguiente con una probabilidad de ocurrencia menor a 0.03. Como elemento de comparación, es importante mencionar que el Huracán Mitch generó una lluvia pico en Santiago Atitlán de 95.2 (Cordillera, 2006), correspondiente a una probabilidad de ocurrencia de 0.10, pero la cual no generó flujos de escombros.

Dadas las limitaciones de cobertura temporal, del análisis regional de lluvias máximas, se realizó el análisis de frecuencia de lluvias máximas anuales, para el registro disponible. Para ello, únicamente se pudo obtener datos para tres estaciones cercanas al área del evento: El Capitán, El Tablón y los Tarrales. El análisis de frecuencias para estas estaciones se muestra en la Tabla 26. Para la estación El Capitán, el evento de lluvia máxima ocurrida durante Stan corresponde a una probabilidad de ocurrencia de 0.10, lo cual no es congruente con el análisis regional. Si se utiliza el análisis de frecuencia realizado en la estación El Capitán, como comparador para la lluvia pico en Santiago Atitlán, le correspondería una probabilidad de ocurrencia mucho menor a 0.001. Si se utiliza la estación Los Tarrales, la lluvia pico durante Stan, el evento corresponde con una probabilidad de ocurrencia cercana a 0.001 ($Tr = 1000$).

Tabla 26: Análisis de frecuencia de la precipitación máxima anual para las estaciones El Capitán, El Tablón y Los Tarrales.

EL CAPITAN –		EL TABLON –		LOS TARRALES –	
Período	1980 – 1999	Período	1995 – 2003	Período	1970 – 1999
Faltantes	1990, 1996, 1998	Faltantes	Ninguno	Faltantes	1993, 1994, 1995
Distribución	Log-Pearson III	Distribución	Gumbel	Distribución	Log-Pearson III
Tr	mm	Tr	mm	Tr	mm
1000	187	---	---	1000	232
200	175	---	---	200	215
100	169	100	214	100	207
50	163	50	193	50	199
30	158	---	---	---	---
20	154	20	163	20	186
10	146	10	141	10	175

Como criterio no conservador, se asumirá que la probabilidad asociada al flujo de escombros de 2005, es de 0.001. Sin embargo, se considera importante mencionar la limitación que existe en asignar directamente la probabilidad de ocurrencia de las lluvias a los eventos de flujos de escombros, siendo que lluvias de estas magnitudes no siempre generan flujos de escombros. Como referencia se presenta la Tabla 27, que muestra la probabilidad de ocurrencia de flujos de escombros (lahares) de distintos tamaños, para ciertos niveles de lluvia en la vertiente Sur del Volcán Santiaguito.

Tabla 27: Probabilidad de ocurrencia de flujos de escombros (lahares) en el Volcán Santiaguito de acuerdo a niveles de lluvia observados en el Observatorio Vulcanológico Santiaguito (López, F., 2003).

Precipitación de 1 Día				
Precipitación (mm)	132.9	91.0	64.5	49.5
Probabilidad de Ocurrencia de Lahares (%)	67	57	36	21
Probabilidad de Ocurrencia de Lahares Fuertes (%)	33			2
No. De veces que se presentó una lluvia igual o mayor	3			
Precipitación de 2 Días				
Precipitación (mm)	152.2	111.3	92.7	85.1
Probabilidad de Ocurrencia de Lahares (%)	83	46	32	25
Probabilidad de Ocurrencia de Lahares Fuertes (%)	33		4	4
No. De veces que se presentó una lluvia igual o mayor	6	28	53	75
Precipitación de 3 Días				
Precipitación (mm)	192.6	164.1	131.9	124.8
Probabilidad de Ocurrencia de Lahares (%)	71	58	36	32
Probabilidad de Ocurrencia de Lahares Fuertes (%)	14	17	7	7
No. De veces que se presentó una lluvia igual o mayor	7	12	44	56

De acuerdo con López, no solamente se debe considerar la lluvia de un día de duración, sino la lluvia acumulada en períodos de mayor duración. En la tabla 27, la probabilidad de ocurrencia de los lahares se calculó dividiendo el número de casos de lahares observados durante tormentas con igual o mayor precipitación que la indicada entre el número total de tormentas con igual o mayor precipitación a la indicada.

Así, para el volcán Santiaguito se identifica una probabilidad de ocurrencia de "lahares fuertes"³ del 33% ante la ocurrencia de una lluvia de 133 mm. Aunque las condiciones en Santiaguito son distintas (alta cantidad de material no consolidado en sus laderas producto de su permanente actividad, así como las diferencias geológicas y meteorológicas), esto brinda una idea de la proporción de lluvias que en efecto generan flujos de escombros. Si se considera el evento como el ocurrido en Panabaj como "fuerte" en la escala del INSIVUMEH, la lluvia para 24 horas de duración y la lluvia límite de 132.9 mm, se puede decir que un evento como el de Panabaj tendría una probabilidad de ocurrencia de 0.0003, para cualquier quebrada. Considerando la existencia de 22 quebradas, la probabilidad de ocurrencia se reduce a 0.000015 para una quebrada en particular, la cual es comparable en orden de magnitud a la estimada para los flujos entre 1 Millón m³ y 2 Millones m³ en el volcán de Agua, de 0.00004.

³ Los eventos ocurridos en 2002 y 2005, califican como "Lahares fuertes", de acuerdo a los criterios empíricos y cualitativos, manejados por INSIVUMEH para describir la ocurrencia de lahares en el volcán Santiaguito.

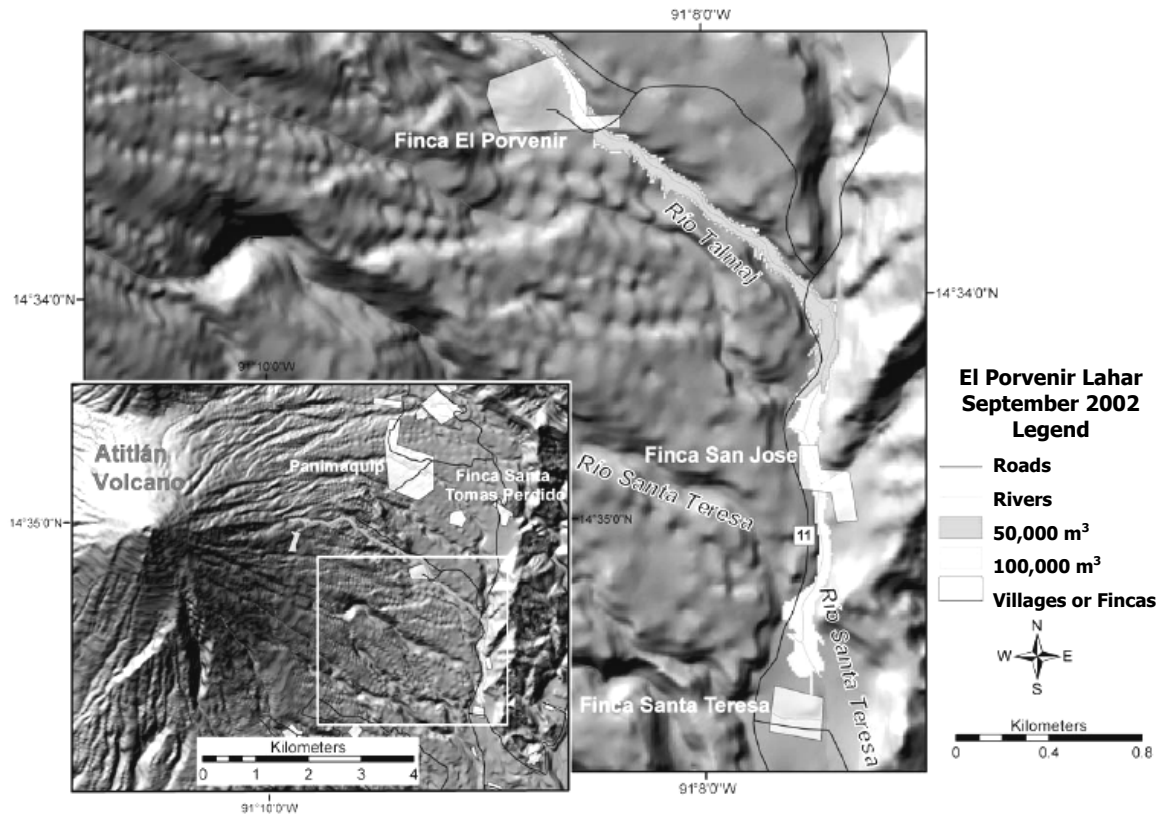


Figura 37: Distribución del flujo de escombros de El Porvenir en el año 2002, según el modelo LAHAR Z, para volúmenes de 50,000 y 100,000 m³ (Haapala, J., 2005).

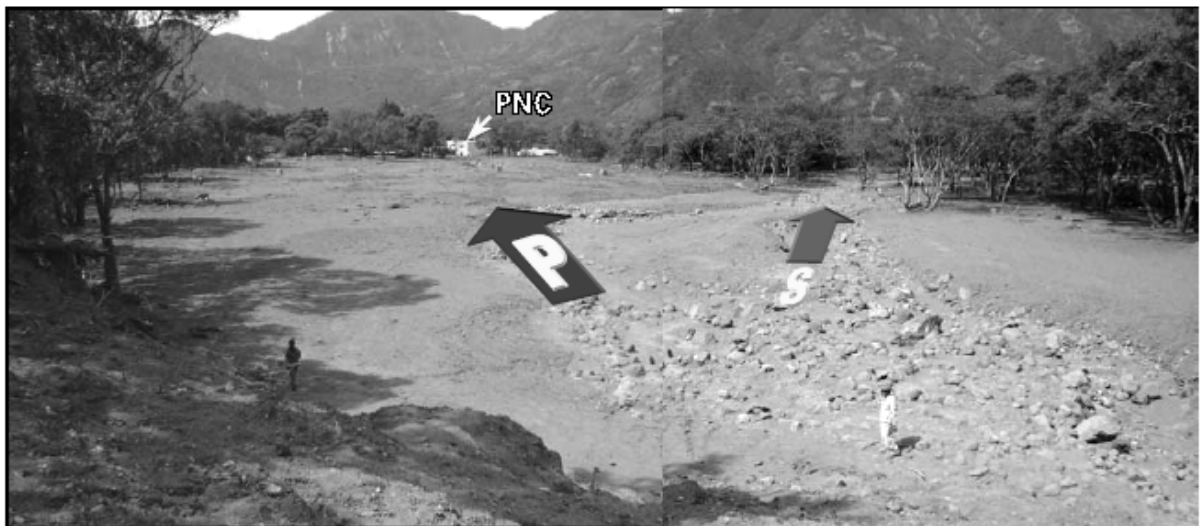
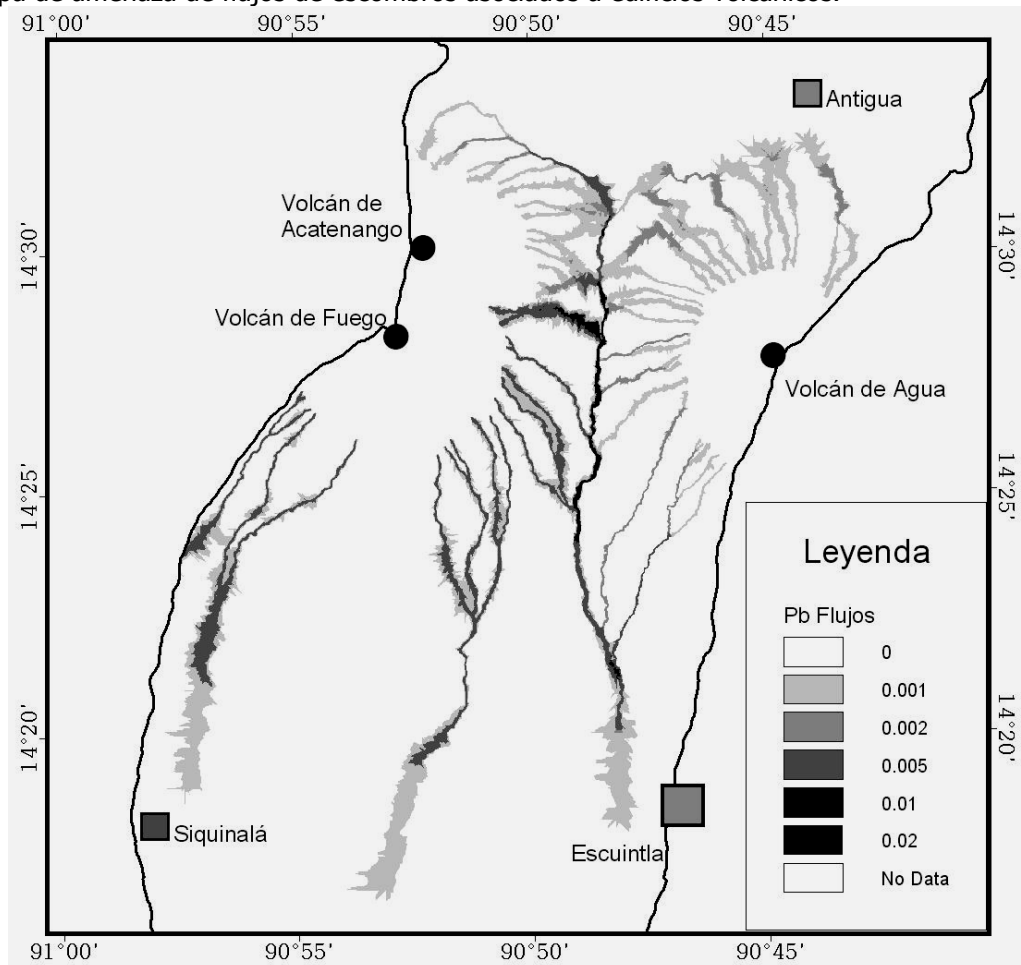


Figura 38: Depósito del flujo de escombros de Panabaj en el año 2005 (CONRED, 2006).

La ocurrencia de flujos de escombros en el volcán de Fuego presenta una dinámica muy distinta a la del volcán de Agua, debido a la continua actividad y los grandes volúmenes de material no consolidado que ha depositado en sus laderas durante los últimos 500 años, por lo que no es comparable con los flujos ocurridos en los volcanes de Agua, Acatenango, Atitlán ó Tolimán. Escobar (12) de acuerdo a lahares observados posteriores a un flujo piroclástico con un volumen estimado de 1,000,000 de m³ ocurrido en 2003 en el volcán de Fuego, considera que lahares de 1 Millón m³, bajo las condiciones actuales están asociados a erupciones con probabilidades de ocurrencia del orden de 0.0066 y de 0.0005 para flujos de 8 Millones m³. Nótese que para los lahares de 1 Millón m³, la probabilidad de ocurrencia asociada representa un orden de magnitud mayor que para los volcanes que no se encuentran activos. Es importante mencionar que prácticamente en todas las quebradas del volcán de Fuego ocurren flujos de escombros, anualmente con volúmenes menores a los 500 K m³.

Debido a que los modelados de flujos de escombros muestran que aquellos provenientes de distintas quebradas, desembocan en corrientes comunes a estas, sobreponiéndose así las áreas de amenaza, se sumó la probabilidad de ocurrencia de los flujos de escombros de las distintas quebradas, siguiéndose el supuesto que su ocurrencia es independientes en cada quebrada y que la probabilidad de ocurrencia simultánea en dos quebradas es baja.

Figura 39: Mapa de amenaza de flujos de escombros asociados a edificios volcánicos.



7.3.4.3 Flujos de Escombros no Asociados a Volcanes

En Guatemala existe muy escasa documentación sobre la ocurrencia de flujos de escombros en cuencas no asociadas a volcanes, aunque se conocen de algunos eventos de esta naturaleza, siendo quizás uno de los mas significativos el flujo ocurrido en 1987 en La Democracia, Huehuetenango que según algunos testimonios cobró más de 200 víctimas. Otro evento documentado de importancia son los flujos ocurridos sobre el río Arenal, en la cuenca del río Villa Lobos en 2003 (29 de junio y 6 de julio). En el caso de la cuenca del río Achiguate se identificaron dos eventos que podrían caracterizarse como flujos de escombros; el primero en el río Paso de San Luís en el municipio de pastores ocurrido el 3 de septiembre de 1874 y el otro en el río Pensativo ocurrido en septiembre de 1996, sin embargo ambos podrían tratarse de crecidas o inundaciones con una alta carga de sedimentos que no alcanzan para calificarlos como flujos de escombros. Aún sin estos antecedentes, debido a las características topográficas del valle en que se localiza Antigua Guatemala, existen condiciones propicias para la ocurrencia de los mismos, como se muestra en la Figura 40. Nótese que la hoja topográfica 1:50,000 identifica una serie de corrientes que al llegar a la planicie desaparecen, condición común en cuencas torrenciales.

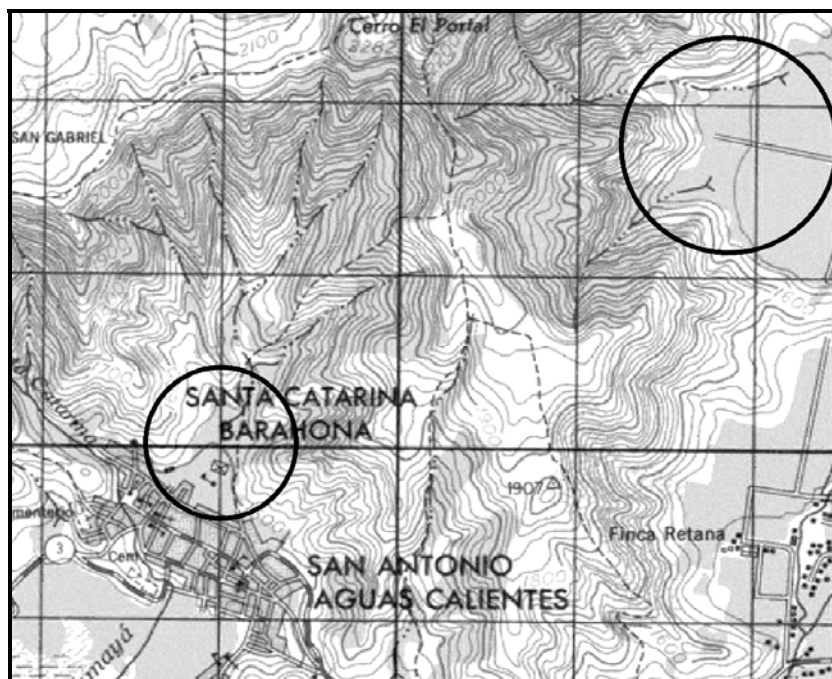


Figura 40: Topografía en los alrededores de Antigua Guatemala, mostrando condiciones típicas de cuencas torrenciales.

Como otro elemento de juicio se compararon algunas características morfométricas de las cuencas cuyos drenajes principales desaparecen en el valle (ver Figura 41), con las de otras cuencas a nivel mundial y en el país, en las que se ha registrado la ocurrencia de flujos de escombros.

Tabla 28: Tabla comparativa de características geomorfológicas de cuencas en donde se han registrado flujos de escombros (Tomado de Eslava, H. et. al., 2004 y Anleu, R., 2003).

Sitios	Área de la Cuenca (km²)	Pendiente de la Cuenca	Longitud del Cauce Principal (km)	Pendiente del Cauce (adim)
Media varios países.	28.5	0.22	3.1	0.322
Mín. varios países.	0.7	0.12	0.3	0.022
Max. varios países.	379.8	0.57	13.6 ⁴	0.900
Río Arenal, Cuenca Villa Lobos, Guatemala	16.3	0.27	11.3	0.064
Media Subc Achiguate	2.7	0.37	2.7	0.23
Max Subc Achiguate	10.5	0.53	5.6	0.36
Min Subc Achiguate	0.4	0.19	0.9	0.14
Paso San Luis (Aldea)	25.1	0.21	11.4	0.07
Paso San Luis (Desem)	27.8	0.23	13.8	0.06
Pensativo (Entrada Ant)	24.3	0.27	8.0	0.11

En la Tabla 27 se puede apreciar que los valores promedio de las características de las subcuencas del río Achiguate que drenan al valle de Antigua, se encuentran dentro de los rangos de condiciones bajo las que se han presentado flujos mundialmente. En ese sentido es importante apreciar que las variables Pendiente Promedio de la Cuenca y Pendiente del Cauce, presenta un Coeficientes de Variación entre cuencas del 24 y 27% respectivamente, lo cual se puede considerar como relativamente bajo y que se corresponde con una composición geológica homogénea entre cuencas (Qt), lo cual a su vez puede indicar cierta homogeneidad en cuanto a la susceptibilidad de ocurrencia de flujos de escombros.

⁴ No se incluyen los datos para la cuenca con el área mas grande.

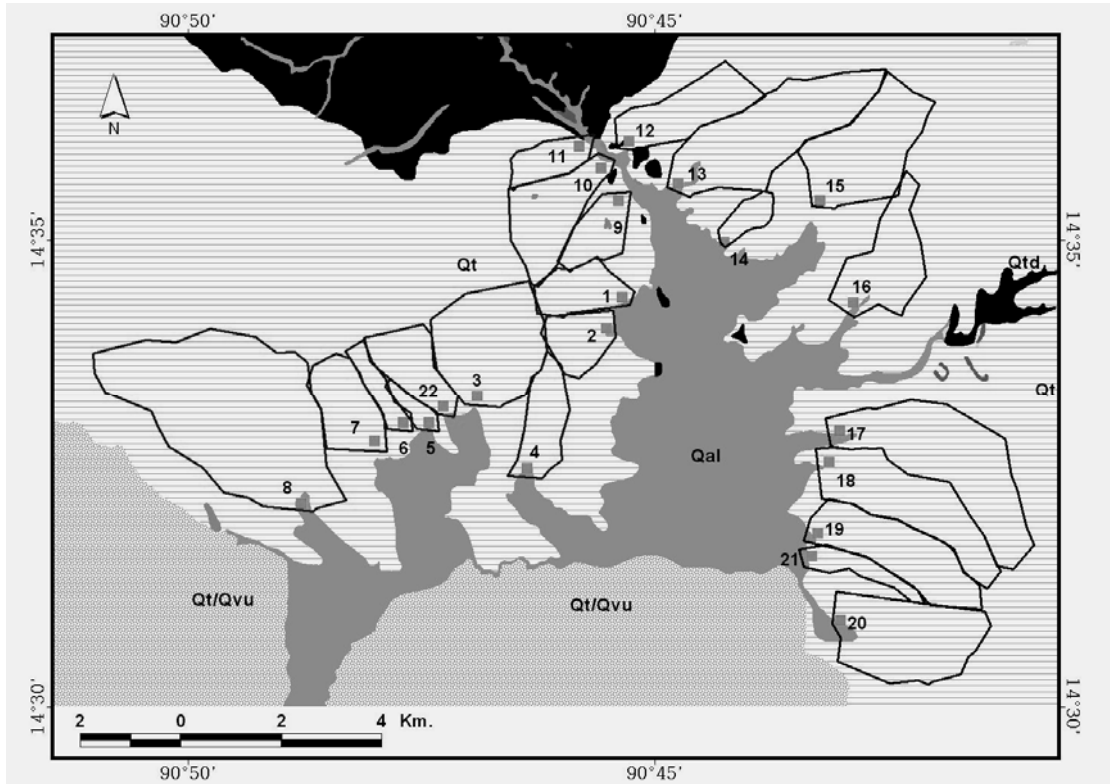


Figura 41: Microcuencas de la cuenca del río Achiguate, no asociadas a volcanes que presentan condiciones para la ocurrencia de flujos de escombros.

Dado que los únicos reportes existentes sobre la ocurrencia de flujos de escombros se refieren a las microcuencas Paso de San Luís y Pensativo, estas también se caracterizaron y compararon con las estadísticas de las anteriores. La comparación con estas, muestra que con excepción de la pendiente media de la cuenca (que incluso se ubica cercana a los mínimos), todos los demás parámetros están fuera de los rangos establecidos por las demás cuencas caracterizadas, aunque aún dentro de los rangos del comparador mundial, sugiriendo una menor susceptibilidad de ocurrencia de flujos de escombros. Por consiguiente es probable que estos dos eventos registrados fuesen crecidas con una alta carga de sedimentos y no flujos de escombros.

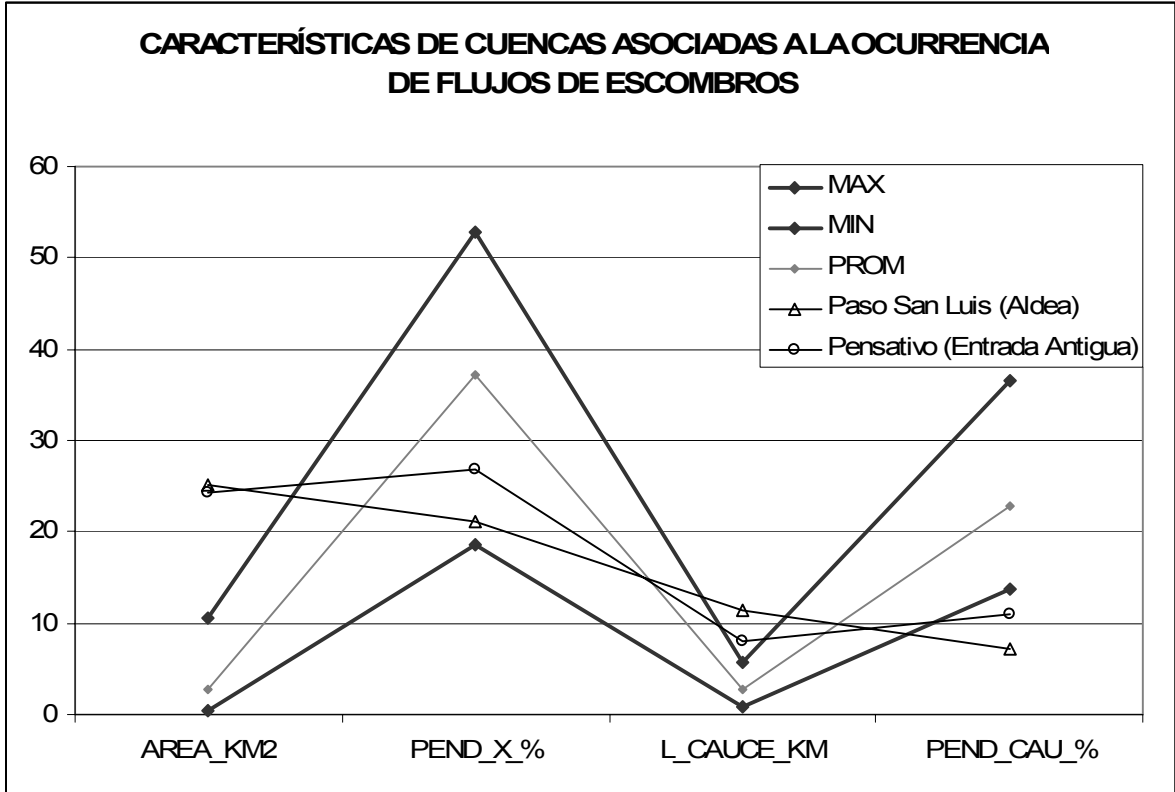


Figura 42: Comparación entre características morfométricas promedio de las microcuencas del río Achiguate que drenan al valle de Antigua y las características de las microcuencas Paso de San Luis y Pensativo.

Debido a la escasa información disponible sobre estos flujos y la falta de elementos para determinar las zonas de probable afección de flujos de escombros que podrían generarse en estas cuencas, no es posible considerarlas en la zonificación, aunque se reconoce esto como una limitante importante que debe resolverse.

7.3.5 AMENAZA DE INUNDACIONES

Para la caracterización de amenaza de inundación en el área de la cuenca del Río Achiguate, se pueden mencionar tres trabajos (Véase Tabla 29).

Tabla 29: Estudios sobre amenazas de inundaciones en la cuenca del río Achiguate.


Autor	Año	Contenido / Método	Período de Retorno (Años)	Caudales Asociados (m ³ /s)	Cobertura
JICA	1985	Modelación Hidrológica (Método Regional) – Hidráulica (1D)	2	550	Cuenca baja Río Achiguate
			5	970	
			10	1250	
			20	1520	
			30	1670	
			50	1860	

INSIVUMEH	1988	Modelación Hidrológica	2	7.6	Subcuenca Pensativo
		(Método Regional) /	5	12.6	
		Interpretación Histórica	10	16.2	
			25	22.5	
JICA	2003	Interpretación Geomorfológica / Interpretación Histórica	No Determinado	No Determinado	Cuenca alta Guacalate, Cuenca media y baja Achiguate

De los anteriores, el trabajo de INSIVUMEH no presenta mapas de inundación, por lo que se descarta su uso para los fines del presente trabajo. Aunque el objetivo en ambos trabajos de JICA ha sido definir la zona inundable, los enfoques metodológicos son distintos y por consiguiente se espera que sean distintos.

Idealmente la definición de zonas bajo amenaza de inundación seguiría la línea de trabajo del estudio realizado por JICA de 1985, una modelación hidrológica que permita estimar crecidas para distintos períodos de retorno y una modelación hidráulica, transitando dichas crecidas para determinar la extensión del área de inundación. Otro método aplicado cuando la información existente o los recursos son limitados es la interpretación geomorfológica, como lo realizado por JICA en 2003. La Tabla 30 muestra el esquema de clasificación de los rasgos geomorfológicos, de acuerdo al nivel de amenaza que representa en términos cualitativos.

Tabla 30: Clasificación de rasgos geomorfológicos aplicado en el estudio de JICA (2003) para determinar niveles relativos de amenaza de inundación.

Rasgos Geomorfológicos	Nivel de Amenaza	
Planicie de inundación, delta, planicie del valle, cauce-1 (terreno descubierto), cauce-2 (terreno con maleza), canal abandonado, río de invierno, pantano, rastro de inundación, cauce elevado, meandro abandonado.	++++	
Cauce-3, terraza-1 (terrazza baja), valle poco profundo, depresión, abanico aluvial, dique natural.	+++	
Terraza-2 (terrazza media), barra de arena, talus, cono aluvial, terreno elevado.	++	
Duna, cresta de playa, terraza-3 (terrazza alta), colina, montaña, volcán.	+	
		Baja

Para tener mejores elementos de juicio se compararon las zonas de amenaza de inundación definidas en ambos estudios (ver Figura 43). Aunque de hecho hay diferencias en los resultados de ambos trabajos, es importante notar las congruencias entre ambos, como se especifica en la Tabla 31.

Tabla 31: Ubicación de las secciones de control para la comparación de los estudios de amenaza de inundación realizados por JICA y congruencia de límites de áreas de inundación.

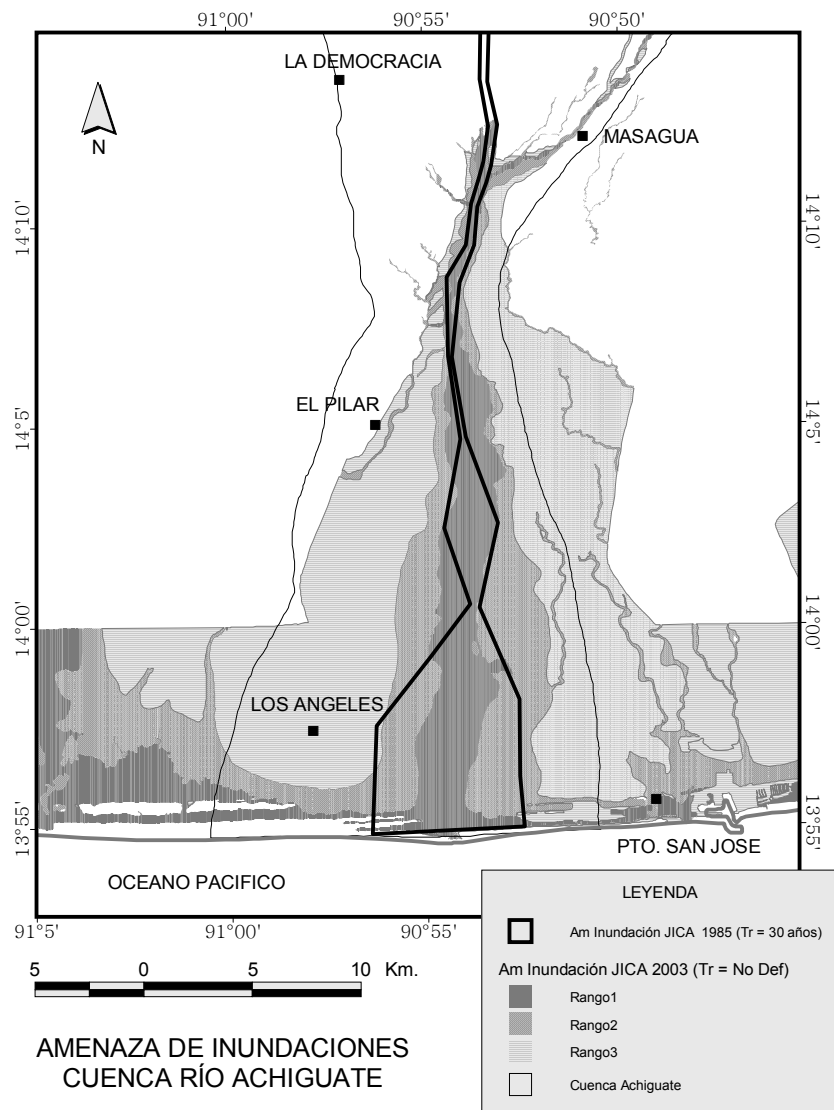
Sección de Control	JICA 1985	Congruencia con JICA 2003
14° 10.0'	Límite crecida Tr = 30 años	Rango 1
14° 02.5'	Límite crecida Tr = 30 años	Rango 1
13° 57.0'	Límite crecida Tr = 30 años	Rango 2

Se considera que parte de las incongruencias que se observan se deben a posibles cambios en la geomorfología del área, la cual ha sido influenciada en los 20 años transcurridos desde la realización del primer estudio, por el aporte de material del volcán de Fuego y por crecidas importantes como las generadas por las lluvias producto del Huracán Mitch.

Otra parte de las incongruencias se debe indudablemente por las limitaciones metodológicas, debido a las diferencias de nivel vertical con respecto al nivel del río, distancias al río, etc. como se especifica en el mismo reporte de JICA 2003. Por último es importante notar que el detalle espacial del estudio de 1985 es pobre comparado con el de 2003.

En base a lo anterior se considera apropiado utilizar el mapa generado en 2003 para una zonificación de uso y asignar un período de retorno de 30 años al área que comprende el Rango 1 y 2, con tendencia a la sobreestimación del área.

Figura 43: Comparación de los mapas de amenaza de inundaciones disponibles para la cuenca del río Achiguate.



7.3.6 AMENAZA DE VENDAVALES

No se obtuvo información para poder establecer su distribución espacial y temporal.

7.3.7 COMPARACIÓN ENTRE AMENAZAS

Con base en el análisis anterior se ha generado un mapa de probabilidades de afección para cada amenaza, con distintas probabilidades de ocurrencia. En la Tabla 32 se muestra la relación probabilidad de ocurrencia – área para las amenazas caracterizadas en la cuenca del río Achiguate. Nótese que no ha sido factible manejar probabilidades de ocurrencia homogéneas entre amenazas.

Tabla 32: Relación probabilidad de ocurrencia – área por amenaza.

AMENAZA	Probabilidad de Ocurrencia	Área Km2	% Total Cuenca
Actividad Volcánica (Fuego)	0.0309	42.61	3.20
Actividad Volcánica (Fuego)	0.0066	162.81	12.30
Actividad Volcánica (Fuego)	0.0005	335.22	25.40
Deslizamientos	0.00015	22.94	1.70
Deslizamientos	0.00010	7.63	0.60
Flujos de escombros volcánicos	0.02	0.26	0.02
Flujos de escombros volcánicos	0.01	2.21	0.17
Flujos de escombros volcánicos	0.005	19.66	1.50
Flujos de escombros volcánicos	0.002	26.00	2.00
Flujos de escombros volcánicos	0.001	43.86	3.30
Flujos de escombros No volcánicos	---	---	---
Flujos de escombros No volcánicos	---	---	---
Inundaciones	0.1000	68.94	5.20
Inundaciones	0.0333	163.51	12.40

La Tabla 32 muestra claramente la relación inversa que existe entre probabilidad de ocurrencia y magnitud de los eventos, expresada en este caso por el área afectada. Con la información de la Tabla 32, se generó la Figura 44, la que permite hacer algunas comparaciones entre amenazas. Considerando la tendencia de las curvas, y el área bajo la mismas como el riesgo bajo el supuesto que cada unidad de área representa una pérdida unitaria, el orden de importancia de las amenazas para la cuenca del río Achiguate puede definirse como: Inundaciones, Actividad Volcánica, Flujos de Escombros y Deslizamientos. Sin embargo es importante reconocer que esto realmente representa un supuesto, ya que no se ha hecho la consideración sobre los elementos expuestos en la realidad y su vulnerabilidad ante cada amenaza.

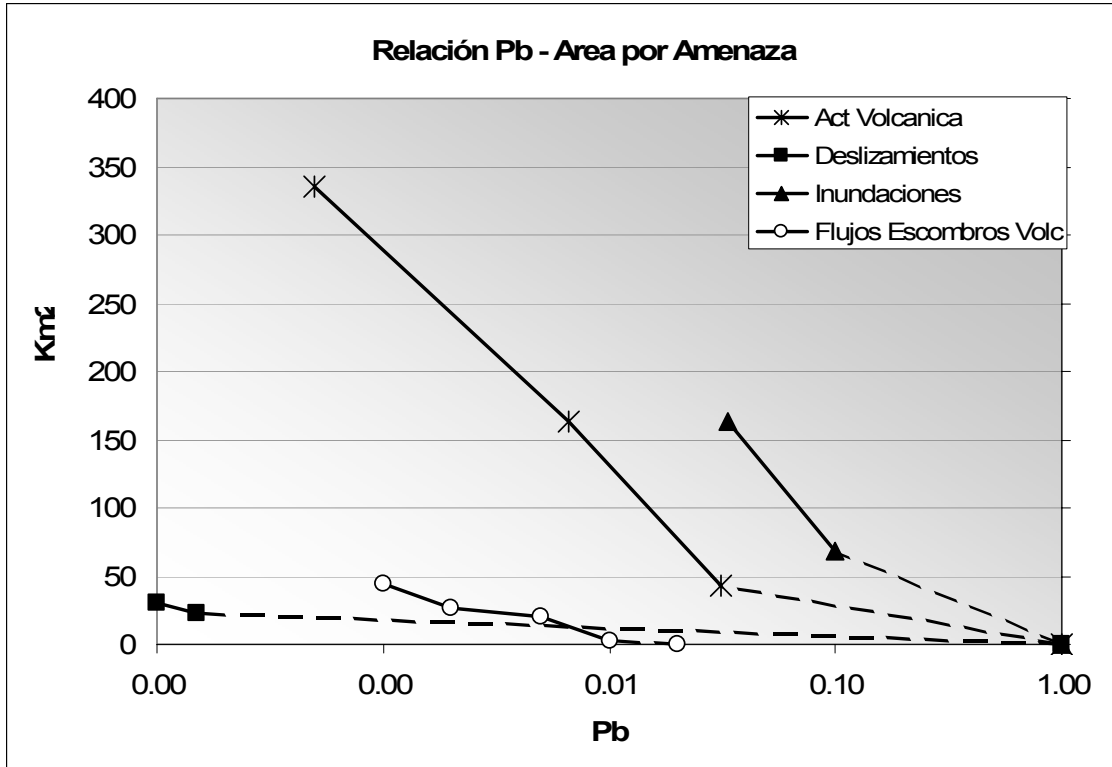


Figura 44: Relación probabilidad de ocurrencia – área para las amenazas caracterizadas.

7.4 ZONIFICACIÓN

7.4.1 DEFINICIÓN DE USOS

En la Tabla 33 se definen los usos a considerar para la planificación del uso del suelo, basados en principio en los usos definidos en la Metodología de Capacidad de Uso del Suelo del INAB, a los cuales se les ha sumando un grupo de usos de distinta naturaleza que utilizan el suelo como sustrato y que no pueden ser ubicados dentro de la misma escala de intensidades del INAB.

Tabla 33: Categorías de uso definidas para aplicar en la zonificación de la cuenca del río Achiguate.

Cod Uso	Usos	Descripción
1	Agricultura sin limitaciones	Agricultura preferentemente anual, requerimientos de inversión en insumos relativamente bajos y alta rentabilidad. Usualmente proporciona poca cobertura vegetal y de carácter temporal.
2	Agricultura con mejoras	Agricultura preferentemente anual, requerimientos de inversión mayores que para la categoría anterior y menor rentabilidad. Proporciona poca cobertura vegetal al suelo y es de carácter temporal.
3	Agroforestería con cultivos anuales	Agricultura usualmente anual, asociada con árboles frutales o forestales. Dado su carácter mixto anual – perenne, proporciona una cobertura vegetal intermedia y parcialmente permanente (es decir permanente en cierta porción del territorio). Usualmente requiere menos insumos que los dos tipos de uso anteriores.

4	Sistemas silvopastoriles	Sistemas vegetales con un predominio de pastos naturales o cultivados, que pueden o no, estar asociadas con árboles frutales o forestales, aunque en menor proporción que el uso No. 3. Proporcionan una alta cobertura vegetal y cuasi permanente dado que en ocasiones puede quedar desprotegido el suelo.
5	Agroforestería con cultivos permanentes	Sistemas de cultivos permanentes asociados con árboles (aislados, en bloques o plantaciones, ya sean especies frutales y otras con fines de producción de madera y otros productos forestales). Proporcionan una cobertura vegetal permanente en cerca del 50% de la superficie.
6	Bosques productivos	Masas forestales sujetas a explotación (tala) y manejo, proporcionando una cobertura permanente en más del 50% de la superficie. Usualmente compuestas por un solo estrato de vegetación, aunque no de manera exclusiva.
7	Bosques de protección	Masas forestales no sujetas a explotación, proporcionando una cobertura permanente en más del 50% de la superficie. Usualmente compuesta de varios estratos de vegetación, solo bajo condiciones muy particulares se presentan con un solo estrato. Tienen como objetivo preservar el ambiente natural, conservar la biodiversidad, así como las fuentes de agua. Estas áreas permiten la investigación científica y el uso ecoturístico en ciertos sitios habilitados para tales fines, sin que esto afecte negativamente el o los ecosistemas presentes en ellas. También se incluyen las áreas sujetas a inundaciones frecuentes , manglares y otros ecosistemas frágiles. Las áreas cubiertas con mangle, están sujetas a regulaciones reglamentarias especiales que determinan su uso o protección.
8	Edificios públicos	Se refiere a los edificios destinados para la prestación de servicios públicos a la población, que por su interés colectivo, requieren de los máximos niveles de seguridad. Incluye fundamentalmente hospitales, escuelas, municipalidades, estaciones de cuerpos de socorro, prisiones, etc.
9	Vivienda concentrada	Se refiere a viviendas y lotificaciones con una configuración urbana, con poco espacio entre las viviendas, usualmente contiguas, área verde menor al 50% del área total del terreno, con áreas de terreno típicamente inferior a 200 m ² , etc.
10	Vivienda dispersa	Se refiere a viviendas y lotificaciones con una configuración rural, con importantes espacios entre las vivienda, área verde mayor al 50% del área total del terreno, con áreas de terreno típicamente por encima de los 200m ² , etc.
11	Industria, Comercio, Alojamiento y Recreación basada en infraestructura	Se refiere a parques industriales, centros comerciales, hoteles y parques de diversiones, que presentan la característica de ocupación temporal.
12	Recreación basada en espacios abiertos.	Se refiere a espacios destinados a la recreación con escasa o nula infraestructura; incluye típicamente parques y plazas, canchas deportivas al aire libre, espacios naturales para la realización de deportes al aire libre, etc.

7.4.2 CRITERIOS PARA LA ZONIFICACIÓN

Para la realización de la zonificación se seleccionaron dos criterios: la capacidad de uso de la tierra de acuerdo a la Metodología del INAB y el costo de daño asociado a la probabilidad de ocurrencia de las amenazas caracterizadas.

7.4.2.1 Capacidad de Uso

Para la capacidad de uso, se adoptaron los criterios definidos por la Metodología del INAB, con excepción de los factores modificadores de drenaje y pedregosidad, debido a la ausencia de información detallada sobre los mismos.

Tabla 34: Categorías de capacidad de uso, de acuerdo a la metodología del INAB.

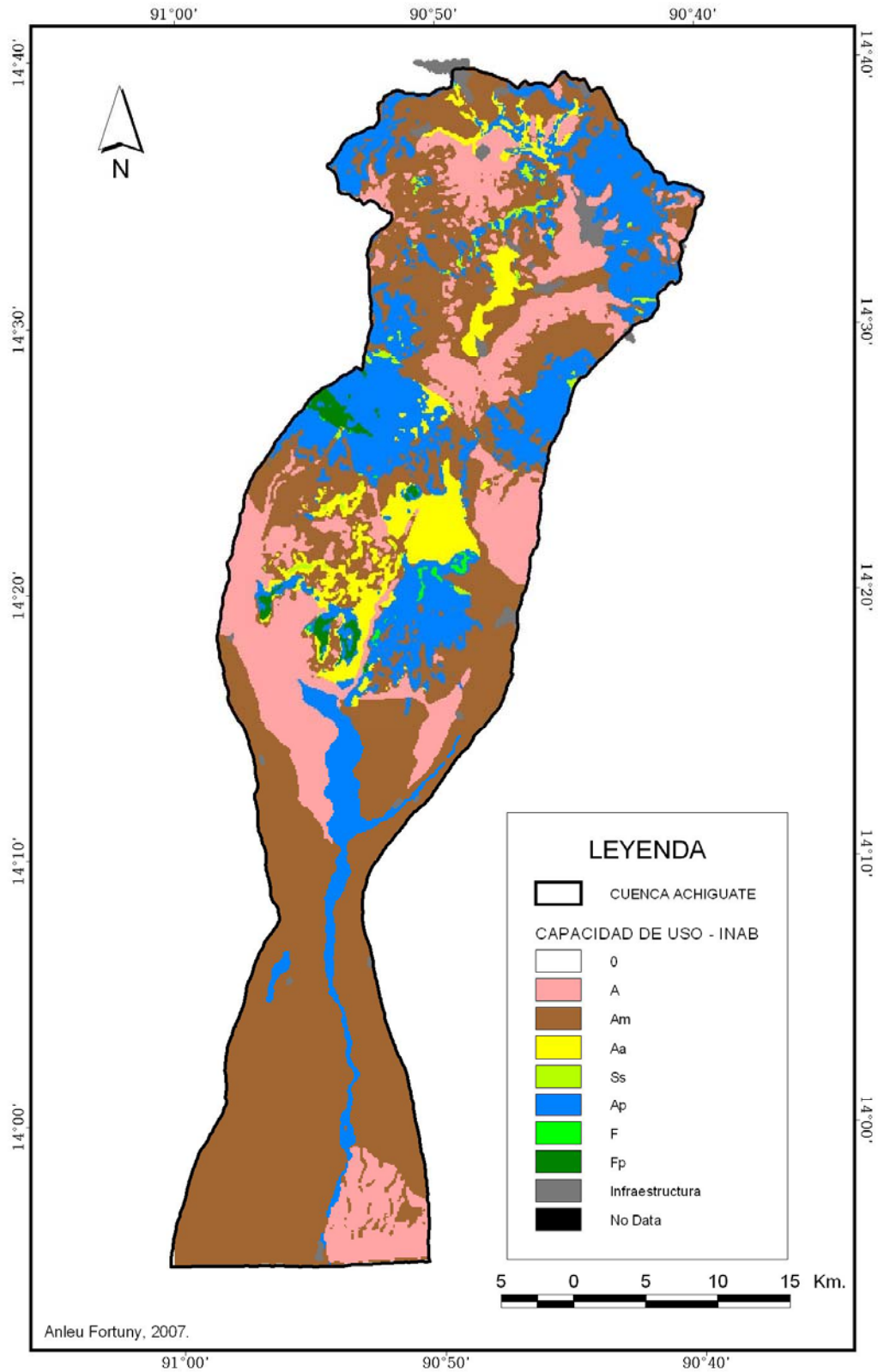
Código	Nombre de Categorías
A	Agricultura sin limitaciones
Am	Agricultura con mejoras
Aa	Agroforestería con cultivos anuales
Ss	Sistemas silvopastoriles
Ap	Agroforestería con cultivos permanentes
F	Tierras forestales para producción
Fp	Tierras forestales para protección

Para evaluar este criterio se recurrió a un método indirecto, basado en la información disponible sobre profundidad efectiva de suelo la cual se determinó de acuerdo a los pedones característicos para cada unidad de suelos mapeada por Herrera (1984), Lavarreda (1987) y Lam (1989). La pendiente se derivó de un modelo de elevación digital del terreno, generado a partir de las curvas a nivel digitalizadas de las hojas topográficas del IGN. Al combinar ambos factores de acuerdo a las matrices para la asignación de capacidad de uso, para cada Región Natural que cubre la cuenca del río Achiguate se determinaron las áreas con determinada categoría de capacidad de uso. En la Figura 45 se muestra el mapa de capacidad de uso para la cuenca del río Achiguate y en la Tabla 35 las áreas que cada una ocupa sobre la cuenca del río Achiguate.

Para valorar adecuadamente los resultados de este análisis es importante considerar dos elementos fundamentales; el primero es que la información sobre los suelos, a pesar de haberse generado a una escala 1:50,000, presenta deficiencias en el detalle, en especial en las zonas montañosas, sobre las cuales no se ubican pedones representativos en los trabajos de Herrera (1984), Lavarreda (1987) y Lam (1989). También es importante reconocer que el detalle espacial varía entre los trabajos. El segundo elemento es la forma en que los Sistemas de Información Geográfica, estiman la pendiente del terreno, haciendo uso de un modelo de elevación digital del terreno, el cual ha discretizado de manera indiscriminada la superficie continua del terreno, representando la altura promedio del área cubierta por una superficie discreta (píxel). Debido a lo anterior la pendiente estimada representa una pendiente promedio entre unidades de terreno discretas, las cuales no se corresponden con las laderas sino con porciones de las mismas, mezcladas con porciones de valles y mesetas en las zonas límite.

Tabla 35: Áreas por categoría de capacidad de uso para la cuenca del río Achiguate.

Categoría	Area_Km2	% Área
Agricultura sin limitaciones	268	20
Agricultura con mejoras	676	51
Agroforestería con cultivos anuales	73	6
Sistemas silvopastoriles	8	1
Agroforestería con cultivos permanentes	265	20
Tierras forestales para producción	2	0
Tierras forestales para protección	11	1
No determinado (cubierta urbana)	19	1
Total	1322	100



MAPA DE CAPACIDAD DE USO DE LA TIERRA
METODOLOGÍA DEL INAB
Suelos: Herrera, Lam, Lavarreda - FAUSAC
Pendientes: Derivadas por SIG de curvas hojas IGN 1:50,000.

Figura 45: Mapa de capacidad de uso del suelo para la cuenca del río Achiguate.

7.4.2.2 Probabilidad de Ocurrencia de Amenazas a Niveles Aceptables

Para establecer la probabilidad de ocurrencia de amenazas a niveles aceptables, se recurrió a un método que permitiera establecer las pérdidas esperadas para los distintos usos y fijar de manera proporcional a estas, la probabilidad aceptable de ser afectadas por una amenaza, mediante la fijación subjetiva de dicha probabilidad para uno de los usos. Esto como enfoque alternativo al óptimo económico y la aplicación de valores subjetivos a cada uso, dadas las limitaciones para la aplicación y uso de ambos métodos. De los doce usos definidos, no se hizo el análisis para vivienda dispersa por considerarse que debería tener las mismas condiciones de riesgo aceptable que la vivienda concentrada; para bosques de protección y la recreación basada en espacios abiertos porque son los usos que deberían tener las áreas bajo mayor amenaza y por consiguiente todo lo que no sea aceptable para otros usos debe destinarse a las anteriores, y por último para edificios públicos que deben presentar condiciones de seguridad muy por encima a las demás. Así para los restantes usos se determinaron las **pérdidas esperadas** con base en la información de la Tabla 36, aplicando la **ecuación 1** para las tres combinaciones de altura de inundación – probabilidad de ocurrencia definida en la Tabla 12. Los resultados se muestran en la Tabla 37.

Tabla 36: Porcentajes de daño de acuerdo a la función de daño, niveles teóricos de inundación y costo estimado de reposición por unidad de área.

Usos	Vida Útil	%Daño_0.25m	%Daño_0.50m	%Daño_1.0m	Q. Rep_m2
Agricultura sin limitaciones	1 - 3 años	0.85	0.98	1.00	10
Agricultura con mejoras	2 - 5 años	0.85	0.98	1.00	20
Agroforestería con cultivos anuales	4 - 10 años	0.65	0.83	0.98	10
Sistemas silvopastoriles	2 - 5 años	0.65	0.85	1.00	5
Agroforestería con cultivos permanentes	5 - 15 años	0.29	0.45	0.65	5
Bosques productivos	10 - 40 años	0.13	0.20	0.35	2
Bosques de protección	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Edificios Públicos	25 - 75 años	No aplica	No aplica	No aplica	800
Vivienda concentrada	20 - 60 años	0.18	0.25	0.35	400
Vivienda dispersa	20 - 40 años	No aplica	No aplica	No aplica	300
Industria, comercio, alojamiento o recreación basada en infraestructura.	20 - 40 años	0.18	0.25	0.50	400
Recreación basada en espacios abiertos	10 - 30 años	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

La tabla 37 muestra la aplicación para el uso Agricultura sin limitaciones.

Tabla 37: A) Aplicación de la ecuación de Daño esperado para el uso Agricultura limitaciones y la serie 1 de la tabla 12. B) Aplicación de la ecuación de Daño esperado para el uso Agricultura limitaciones y la serie 3 de la tabla 12.

A

Altura Inunda (m)	% Daño	Valor (Q)	tr	Pb	Daño (Q)	D _I (Q)	Daño esperado
A	B	C	D	E=1/D	F=B * C	G=Ec 2	ΣG _i +G _{i-1}
0.00	0.00	10.00	1	1.00	0.00	0.00	Q. 4.50
0.25	0.85	10.00	2	0.50	8.50	2.13	Q. 2.37
0.50	0.98	10.00	5	0.20	9.75	1.78	Q. 0.59
1.00	1.00	10.00	10	0.10	10.00	0.59	0

B

Altura Inunda (m)	% Daño	Valor (Q)	tr	Pb	Daño (Q)	D _I (Q)	Daño esperado
A	B	C	D	E=1/D	F=B * C	G=Ec 2	ΣG _i +G _{i-1}
0.00	0.00	10.00	1	1.00	0.00	0.00	Q. 4.30
0.25	0.85	10.00	20	0.05	8.50	4.04	Q. 0.26
0.50	0.98	10.00	50	0.02	9.75	0.21	Q. 0.05
1.00	1.00	10.00	100	0.01	10.00	0.05	0

Ecuación 2

$$D_I = \left[\frac{D_{(X_{i-1})} + D_{(X_i)}}{2} \right] \left[P_{(X \geq X_{i-1})} - P_{(X \geq X_i)} \right]$$

Donde

- D_I = Costo de daños esperados para evento X_i.
- D_(X_{i-1}) = Daño para el evento X_i - 1.
- D_(X_i) = Daño para el evento X_i.
- P_(X ≥ X_{i-1}) = Probabilidad que el evento X iguale o exceda a X_i - 1.
- P_(X ≥ X_i) = Probabilidad que el evento X iguale o exceda a X_i.

La columna F muestra el daño ó pérdida en quetzales que 1 m² de Agricultura sin limitaciones presentará ante determinadas alturas de inundación. La columna G muestra la contribución que harán, las distintas alturas de inundación con distinta probabilidad de ocurrencia, al daño esperado anual. En la primera casilla de la última columna de la tabla, aparece el daño esperado anual, que contiene la contribución de los eventos considerados.

En la Tabla 38, se muestran los valores de pérdida esperada obtenidas para cada uso, normalizadas entre el valor más bajo, con el fin de conocer cuánta más pérdida representa un uso con relación al que representa las menores pérdidas.

Tabla 38: Posiciones relativas de acuerdo a las pérdidas esperadas en tres combinaciones distintas de períodos de retorno.

Tr	1, 2, 5, 10	1, 5, 10, 20	1, 20, 50, 100		
Usos	PosREsp_01	PosREsp_02	PosREsp_03	Pos_X	PosCostos
Agricultura sin limitaciones	26	29	32	29	5
Agricultura con mejoras	52	59	64	58	10
Agroforestería con cultivos anuales	21	23	25	23	5
Sistemas silvopastoriles	11	12	12	12	3
Agroforestería con cultivos permanentes	5	6	6	6	3
Bosques de producción ⁵	1 \approx 0.173	1 \approx 0.147	1 \approx 0.135	1	1 \approx 2.00
Vivienda concentrada	252	265	274	264	200
Industria, comercio, alojamiento o recreación basada en infraestructura	269	275	276	273	200

La interpretación de la Tabla 38 indica que la pérdida esperada en sistemas silvopastoriles es doce veces mayor que para los bosques de producción, mientras que para la vivienda, las pérdidas esperadas es doscientas setenta y seis veces mayor. Para fines de comparación, se normalizaron los costos de reposición entre el costo de reposición más bajo, mostrando magnitudes y orden entre usos distintos a los dados por las pérdidas esperadas, lo que muestra el efecto de la vulnerabilidad diferenciada entre distintos usos. Por ejemplo, para los sistemas silvopastoriles, los costos de reposición son únicamente tres veces mayores que para los bosques de producción, pero las pérdidas esperadas son doce veces mayores. Lo cual, como ya se mencionó responde a la vulnerabilidad diferenciada que presentan ambos usos.

La prueba de sensibilidad para conocer la variación en la pérdida esperada normalizada, muestra que esta no presenta influencia significativa debido a relaciones variable de nivel de inundación – probabilidad de ocurrencia.

Esta estimación es una primera aproximación, que puede mejorarse significativamente con una estimación más precisa de los costos de reposición, la aplicación de funciones de daño revisadas y con relaciones de nivel de inundación (o de manera más general magnitud de amenaza) – probabilidad de ocurrencia determinadas para las condiciones del área de estudio. Aspectos todos que quedan fuera del alcance de esta investigación.

⁵ Las pérdidas esperadas de los demás usos se normalizaron por las pérdidas esperadas más bajas, que corresponden a los valores en quetzales del tipo de uso: Tierras Forestales para Producción.

Para definir las probabilidades aceptables de afección por una amenaza para cada uso del suelo, se fijó esta para el uso *Vivienda concentrada*, de manera subjetiva en 0.01 anual ($Tr=100$). Aplicando las pérdidas esperadas como factor de proporcionalidad para determinar la probabilidad aceptable para los demás usos se obtuvieron estas P_b para los restantes usos, como se muestra en la Tabla 39.

Tabla 39: Probabilidad aceptable de afección para cada uso del suelo.

Usos	Cod Uso	Pb anual aceptable	Tr anual aceptable	Pb redon
Edificios Públicos	10	0.005	200	< 0.005
Vivienda concentrada	8	0.010	100	< 0.01
Vivienda dispersa	9	0.010	100	< 0.01
Industria, comercio, alojamiento o recreación basada en infraestructura	11	0.010	~ 100	< 0.01
Agricultura con mejoras	2	0.045	~ 22	< 0.05
Agricultura sin limitaciones	1	0.091	~ 11	< 0.10
Agroforestería con cultivos anuales	3	0.115	~ 9	< 0.10
Sistemas silvopastoriles	4	0.226	~ 4	< 0.20
Agroforestería con cultivos permanentes	5	0.453	~ 2	< 0.50
Bosques de producción ⁶	6	> 0.453	< 2	≥ 0.50
Bosques de protección	7	> 0.453	< 2	≥ 0.50
Recreación basada en espacios abiertos	12	> 0.453	< 2	≥ 0.50

Como se puede apreciar de la Tabla 39, de acuerdo al análisis realizado, se presentan siete niveles de amenaza distintos. También se determinaron las áreas con P_b anual aceptable < 0.001 ($Tr = 1000$), la cual puede considerarse para ciertos usos críticos que requieran condiciones especiales de seguridad.

Bajo la concepción que un área puede tener restricciones de uso, ya sea por el daño del que puede ser sujeto el entorno y/o por el daño que el entorno puede provocar a la actividad del hombre, se hizo necesario establecer como se combinaría ambos criterios. Siguiendo la metodología del INAB y de manera más general, las metodologías de zonificación para ordenamiento territorial, se considera un criterio base y los demás criterios, se consideran como factores modificadores. En este trabajo la capacidad de uso se ha seleccionado como criterio de base y la probabilidad de ocurrencia de amenazas igual o superior a los límites definidos en la Tabla 38, la que se constituye como factor modificador. En este sentido es importante aclarar que los factores modificadores de la metodología de capacidad de uso del INAB, no han sido considerados en ningún momento.

⁶ Las pérdidas esperadas de los demás usos se normalizaron por las pérdidas esperadas más bajas, que corresponden a los valores en quetzales del tipo de uso Bosques productivos.

Con base en lo anterior, un área que de acuerdo a la capacidad de uso es apta para sistemas silvopastoriles, pero presenta una probabilidad de 0.3 de ser afectada por alguna amenaza, no puede utilizarse para sistemas silvopastoriles y deberá dedicarse para agroforestería con cultivos permanentes o cualquier otro uso que pueda generar un menor deterioro del suelo y a la vez requiera menores niveles de seguridad.

Para los usos del 1 al 6 (utilización del suelo como sustrato) la aplicación es directa y no involucra ninguna consideración adicional. Para los usos restantes, se aplicaron criterios auxiliares sobre la capacidad de uso debido a la limitación conceptual de la escala de capacidad de uso para ser aplicada a todos los usos definidos. Estos criterios intentan establecer condiciones para el mejor aprovechamiento del suelo y la compatibilidad con los uso del primer tipo. En la Tabla 40 se detallan los criterios auxiliares utilizados.

Tabla 40: Criterios auxiliares aplicados sobre la capacidad de uso, para usos que utilizan el suelo como sustrato.

Uso	Criterio Auxiliar	Razonamiento
Bosques de protección	No se pueden establecer sobre suelos A, Am.	Se considera que habría subutilización del suelo si este se destinara al uso de recreación.
Bosques de protección	Se pueden establecer sobre los suelos Aa, siempre y cuando representen zonas ribereñas.	Dado que las zona ribereñas pueden presentar condiciones como suelos Aa, esta condición representa una excepción. Si no son zonas ribereñas, no se deben destinar para bosques de protección.
Edificios públicos	No se pueden establecer sobre suelos A.	Los suelos tipo A deben ser reservados para la producción agrícola.
Edificios públicos	No se pueden establecer sobre suelos Ss, Fp, F.	Estos suelos presentan ya sea condiciones de pobre drenaje o pendientes relativamente fuertes, que pueden significar erosión. Condiciones no deseables para un edificio público.
Vivienda concentrada	No se pueden establecer sobre los suelos A.	Los suelos tipo A deben ser reservados para la producción agrícola.
Vivienda concentrada	No se pueden establecer sobre los suelos Fp y F.	Estos suelos presentan limitaciones para la construcción debido principalmente a la pendiente. Aunque no sean áreas óptimas de recarga hídrica, pueden cumplir esa función y por ello se considera que sean dedicadas a estos usos exclusivamente.

Vivienda dispersa.	No se pueden establecer sobre los suelos A.	Los suelos tipo A deben ser reservados para la producción agrícola.
Vivienda dispersa.	No se pueden establecer sobre los suelos F.	Estos suelos presentan limitaciones para la construcción debido principalmente a la pendiente, pero dado que este tipo de uso ocupa en promedio el 50% del área, el restante se mantiene cubierto con vegetación que usualmente permite un buen control de la erosión.
Industria, comercio, alojamiento o recreación basada en infraestructura.	No se pueden establecer sobre los suelos A.	Los suelos tipo A deben ser reservados para la producción agrícola.
Industria, comercio, alojamiento o recreación basada en infraestructura.	No se pueden establecer sobre los suelos Am.	Los amplios espacios requeridos por estos usos significarían subutilización del suelo.
Industria, comercio, alojamiento o recreación basada en infraestructura.	No se pueden establecer sobre los suelos Fp y F.	Estos suelos presentan pendientes relativamente fuertes, que pueden significar erosión. Condiciones no deseables para áreas de uso público.
Recreación basada en espacios abiertos.	No se pueden establecer sobre los suelos A, Am y Aa.	Se considera que habría subutilización del suelo si este se destinara al uso de recreación.

Tabla 41: Combinaciones posibles de criterios y usos permisibles en cada combinación.

Cat PbAmen		B	C	D	E	F	G	H
Cat CapaUso								
A		A-B	A-C	A-D	A-E	A-F	A-G	A-H
Am		Am-B	Am-C	Am-D	Am-E	Am-F	Am-G	Am-H
Aa		Aa-B	Aa-C	Aa-D	Aa-E	Aa-F	Aa-G	Aa-H
Ss		Ss-B	Ss-C	Ss-D	Ss-E	Ss-F	Ss-G	Ss-H
Ap		Ap-B	Ap-C	Ap-D	Ap-E	Ap-F	Ap-G	Ap-H
F		F-B	F-C	F-D	F-E	F-F	F-G	F-H
Fp		Fp-B	Fp-C	Fp-D	Fp-E	Fp-F	Fp-G	Fp-H
Categ	Combin	Usos Permisibles			Categ	Combin	Usos Permisibles	
1	(12) A-B	1,2,3,4,5,6 – 7			13	(42) Ss-B	4,5,6,7,8,9,11,12	
1	(13) A-C	1,2,3,4,5,6 – 7			13	(43) Ss-C	4,5,6,7,8,9,11,12	
1	(14) A-D	1,2,3,4,5,6 – 7			14	(44) Ss-D	4,5,6,7,12	
2	(15) A-E	1,3,4,5,6 – 7			14	(45) Ss-E	4,5,6,7,12	
3	(16) A-F	4,5,6 – 7			14	(46) Ss-F	4,5,6,7,12	
4	(17) A-G	5,6 – 7			15	(47) Ss-G	5,6,7,12	
5	(18) A-H	6 – 7			16	(48) Ss-H	6,7,12	
6	(22) Am-B	2,3,4,5,6,7,8,9,10			17	(52) Ap-B	5,6,7,8,9,10,11,12	
7	(23) Am-C	2,3,4,5,6,7,8,9			18	(53) Ap-C	5,6,7,8,9,11,12	
8	(24) Am-D	2,3,4,5,6,7			15	(54) Ap-D	5,6,7,12	
9	(25) Am-E	3,4,5,6,7			15	(55) Ap-E	5,6,7,12	
3	(26) Am-F	4,5,6,7			15	(56) Ap-F	5,6,7,12	
4	(27) Am-G	5,6,7			15	(57) Ap-G	5,6,7,12	
5	(28) Am-H	6,7			16	(58) Ap-H	6,7,12	
10	(32) Aa-B	3,4,5,6,7,8,9,10,11			19	(62) F-B	6,7,8,12	
11	(33) Aa-C	3,4,5,6,7,8,9,11			19	(63) F-C	6,7,8,12	
12	(34) Aa-D	3,4,5,6,7			20	(64) F-D	6,7,12	
12	(35) Aa-E	3,4,5,6,7			20	(65) F-E	6,7,12	
3	(36) Aa-F	4,5,6,7			20	(66) F-F	6,7,12	
4	(37) Aa-G	5,6,7			20	(67) F-G	6,7,12	
5	(38) Aa-H	6,7			20	(68) F-H	6,7,12	
---	---	---			21	(70s) Fp-x	7, 12	

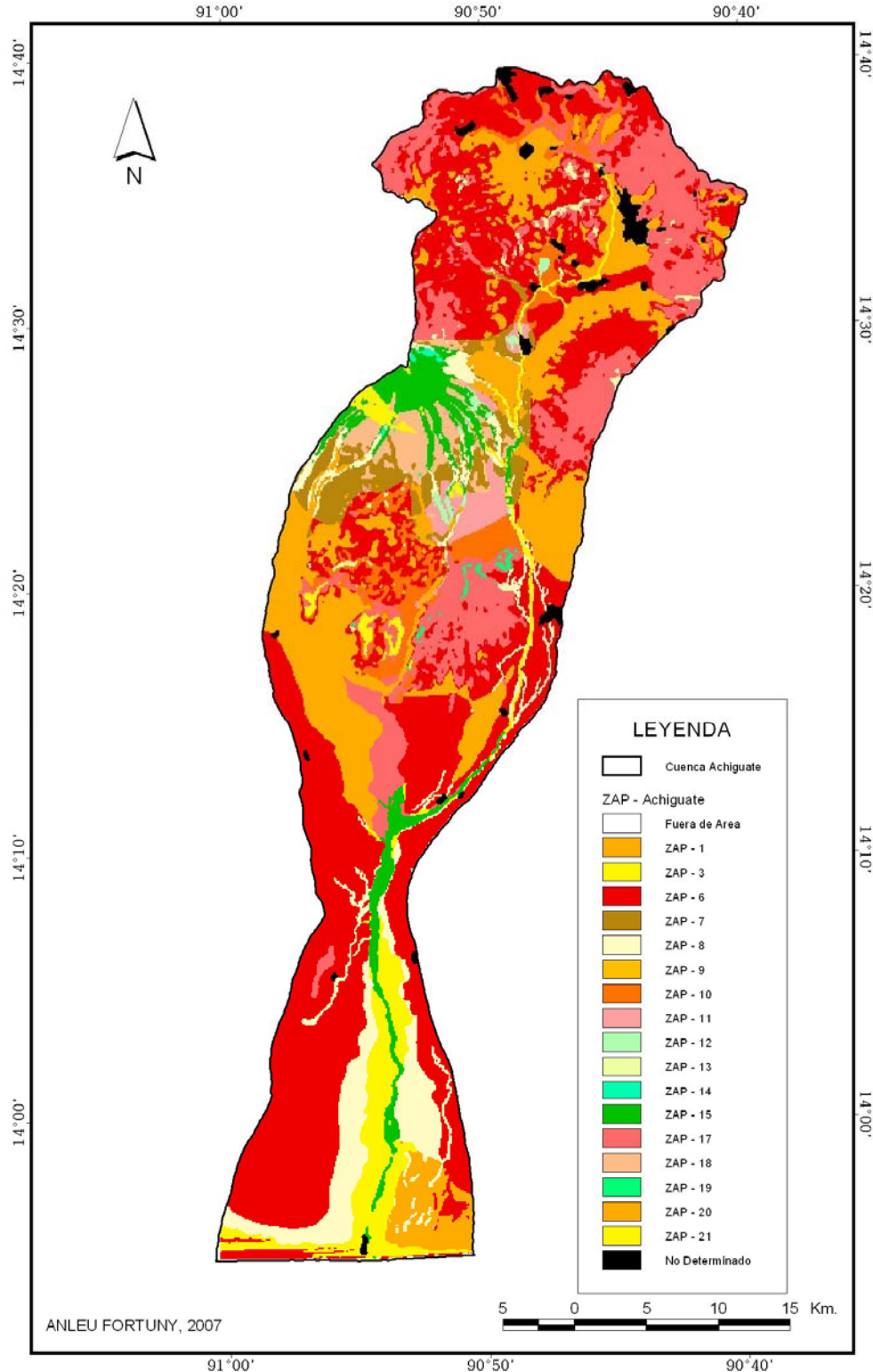
Como se observa en la tabla anterior, existen una serie de combinaciones que permiten los mismos usos, por lo que se han agrupado en Zonas de Aptitud – ZAP –. Es de hacer notar que de 49 combinaciones posibles, el número de ZAP es únicamente 21, aspecto de importancia para facilitar su aplicación. Así en la Tabla 42 se muestran las ZAP, los Usos

Permisibles en cada una de ellas, el área que ocupan en la cuenca del río Achiguate y el porcentaje de área que ocupan.

Tabla 42: Zonas de Aptitud de acuerdo a las combinaciones de criterios y usos permisibles determinados en la Tabla 40.

Zonas de Aptitud – ZAP –	Usos Permisibles (Cod Uso)	Área_Km²	% Área
ZAP – 1	1, 2, 3, 4, 5, 6 – 7	255.2	19.3
ZAP – 2	1, 3, 4, 5, 6 – 7	No se presentó	No se presentó
ZAP – 3	4, 5, 6 – 7	65.7	5.0
ZAP – 4	5, 6, 7	No se presentó	No se presentó
ZAP – 5	6 – 7	No se presentó	No se presentó
ZAP – 6	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	491.5	37.2
ZAP – 7	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	42.9	3.2
ZAP – 8	2, 3, 4, 5, 6, 7	89.7	6.8
ZAP – 9	3, 4, 5, 6, 7	0.1	0.0
ZAP – 10	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	49.7	3.8
ZAP – 11	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11	17.2	1.3
ZAP – 12	3, 4, 5, 6, 7	4.8	0.4
ZAP – 13	4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12	7.1	0.5
ZAP – 14	4, 5, 6, 7, 12	1.1	0.1
ZAP – 15	5, 6, 7, 12	51.7	3.9
ZAP – 16	6, 7, 12	No se presentó	No se presentó
ZAP – 17	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	186.3	14.1
ZAP – 18	5, 6, 7, 8, 9, 11, 12	27.0	2.0
ZAP – 19	6, 7, 8, 12	2.3	0.2
ZAP – 20	6, 7, 12	0.1	0.0
ZAP – 21	7, 12	10.6	0.8
Total		1321.5	100.0

En la Figura 46 se muestra el mapa de Zonas de Aptitud (ZAP) determinado para la cuenca del río Achiguate de acuerdo a los criterios definidos tanto para los criterios de Capacidad de Uso, como los de Probabilidad de Ocurrencia de Amenazas y su combinación. Como puede observarse, es difícil determinar algún patrón de manera visual, aunque algunos elementos significativos resaltan como una ZAP – 15 alrededor del Volcán de Fuego que está fuertemente determinada por la zona de amenazas del mismo volcán.



MAPA DE ZONAS DE APTITUD POR COMBINACIÓN DE CRITERIOS
CAPACIDAD DE USO (INAB) - P_b OCURRENCIA DE AMENAZAS
DIVERSAS FUENTES

Figura 46: Mapa de Zonas de Aptitud (ZAP) por combinación de criterios de Capacidad de Uso (INAB) y Probabilidad de Ocurrencia de Amenazas.

Para poder realizar una valoración objetiva de los resultados obtenidos se tomaron quince (15) puntos distribuidos aleatoriamente dentro de la cuenca, para los cuales se discute la validez de la categoría determinada para cada uno. Esta discusión se presenta en la Tabla 43.

Tabla 43: Discusión sobre el desempeño de la zonificación para quince puntos distribuidos en la cuenca del río Achiguate.

No.	Coord	Zap Determinada	Condiciones y Discusión	Evaluación de Desempeño
1	-90.982051 14.101708	ZAP – 17	Pendiente mínima, suelo superficial, área de amenaza mínima, mal drenado pero este criterio no ha sido incluido	3
2	-90.920669 14.318082	ZAP – 1	Pendiente baja, suelo muy superficial, área de amenaza media, próxima al cauce de un río pero no mapeada para inundaciones	4
3	-90.988877 14.526018	ZAP – 17	Pendiente media – alta, suelo de profundidad media, área de amenaza baja, en ladera	4
4	-90.948731 14.236552	ZAP – 17	Pendiente mínima, suelo superficial, área de amenaza mínima	3
5	-90.964145 14.653649	ZAP – 6	Pendiente mínima, suelo de profundidad media, área de amenaza mínima	3
6	-90.919619 14.447510	ZAP – 21	Pendiente fuerte, suelo muy superficial, área de amenaza alta, en el área de mayor amenaza de actividad volcánica y se configura como una isla entre una categoría más permisiva que no parece congruente.	3
7	-90.972417 13.947349	ZAP – 8	Pendiente mínima, suelo de profundidad media, área de amenaza alta, en la zona de divagación del río Achiguate	3
8	-90.931705 14.464522	ZAP – 15	Pendiente fuerte, suelo muy superficial, área de amenaza alta, en el área de mayor amenaza del volcán de Fuego.	5
9	-90.984286 14.279944	ZAP – 1	Pendiente baja, suelo profundo, área de amenaza mínima.	3
10	-90.955737 14.367921	ZAP – 10	Pendiente baja, suelo superficial, área de amenaza baja	3
11	-90.984801 14.501012	ZAP – 17	Pendiente media – alta, suelo profundo, área de amenaza mínima, sobre la ladera del volcán Acatenango	4
12	-90.999240 13.987626	ZAP – 15	Pendiente mínima, suelo muy superficial, área de muy alta amenaza, en la zona de divagación del río Achiguate	3
13	-90.932080 14.366083	ZAP – 10	Pendiente media, suelo profundo, área de amenaza mínima, una unidad de suelo que no parece representativa puede causar su sobrevaloración	5
14	-90.982150 14.578849	ZAP – 17	Pendiente media alta, suelo profundo, área de amenaza baja	4
15	-91.008607 13.917661	ZAP – 6	Pendiente mínima, suelo de profundidad media, área de amenaza mínima	3

Tabla 44: Resumen de la evaluación de desempeño de la Zonificación.

Criterio	Calificación	Número de Sitios
Muchos más usos permitidos de lo que se percibe sea adecuado con información de contexto.	5	2
Más usos permitidos de lo que se percibe sea adecuado con información de contexto.	4	4
Usos permitidos adecuados a lo que se percibe es adecuado, con información de contexto.	3	9
Menos usos permitidos de lo que se percibe sea adecuado con información de contexto.	2	0
Mucho menos usos permitidos de lo que se percibe sea adecuado con información de contexto.	+	0

La Tabla 44 muestra un resumen del desempeño de la zonificación respecto a la percepción del autor sobre el contexto, identificándose un sesgo hacia la permisividad, es decir que de acuerdo a los criterios utilizados se presenta áreas que permiten más usos que los que el autor esperaría en ciertas áreas. De los puntos evaluados el caso más notorio es el número 8 de la Tabla 43, que se encuentra a ~1 Km. del cráter del volcán de Fuego y al ser clasificado en la categoría ZAP – 15, permite su uso para pastizales, lo cual parece inapropiado dadas las condiciones del área que incluyen ausencia de suelo, fuertes pendientes y una alta amenaza. Esto implica sin duda alguna, que es necesario evaluar y revisar los criterios, así como la información de base para su aplicación.

8. CONCLUSIONES

- 8.1 Las Tablas 39, 40, 41 y 42 representan la propuesta de zonificación de uso apropiado para la cuenca del río Achiguate – Guacalate. En estas se definen las restricciones de uso de acuerdo a la interacción entre los distintos niveles de amenaza y distintas categorías de capacidad de uso.
- 8.2 Las amenazas naturales se han integrado a la zonificación de uso apropiado como un factor modificador de las categorías de capacidad de uso. Dicha integración se logró a través del criterio de daño esperado aceptable para cada uno de los usos definidos, definidos en la tabla 39. Sin embargo se hizo necesario desarrollar criterios auxiliares para hacer más eficiente la zonificación, presentándose estos en la tabla 40.
- 8.3 Es factible aplicar criterios homogéneos de zonificación entre las distintas amenazas, toda vez estas se expresen en términos de su probabilidad de ocurrencia y el daño hipotético que causarían a determinados usos por medio de consideraciones de vulnerabilidad aplicadas a través de las funciones de daño.
- 8.4 En la cuenca del Río Achiguate ocurren una serie de amenazas naturales, de las cuales se logró caracterizar la actividad volcánica, deslizamientos, flujos de lodo e inundaciones, en términos espaciales y temporales.
- 8.5 Las caracterizaciones de amenazas naturales en la cuenca del río Achiguate presentan un detalle no homogéneo, tanto en términos espaciales como temporales, de manera que se dificulta su aplicación para una zonificación apropiada.
- 8.6 Los inventarios de eventos disponibles actualmente tienen aplicación limitada dado que no cuentan con una cuantificación apropiada de los daños y son dependientes de fuentes de información no especializada como los diarios.
- 8.7 La información existente sobre los perfiles de suelo y la topografía de la cuenca del río Achiguate – Guacalate, permitieron la elaboración de una zonificación de capacidad de uso del suelo a escala 1:50,000 de acuerdo con la metodología del INAB.
- 8.8 La información disponible para determinar la capacidad de uso del suelo presenta distinto detalle espacial para toda la cuenca, a pesar de haber sido generada para una escala homogénea (1:50,000).
- 8.9 Las categorías de uso del INAB responden únicamente al criterio de grado de protección de la cobertura del suelo ante la erosión, lo cual resulta limitante para tratar todos los usos posibles de una porción de tierra.

8.10 La cuenca no es la unidad más apropiada para la zonificación de aptitud territorial, considerando que las amenazas, con excepción de la amenaza de inundaciones no responden a límites de cuenca; e. g. actividad volcánica, deslizamientos. Por otro lado al tratar la definición de cuenca se dejan por un lado las porciones de unidades político administrativo (municipios) fuera del análisis y posiblemente de la distribución de recursos. Una limitante práctica muy importante, considerando que en el ámbito de la administración pública, los recursos no son vertidos en un espacio territorial de una cuenca, sino más bien en los municipios. Derivado de lo anterior, es que la cuenca en todo caso debe considerarse como un criterio más a utilizar para la planificación del territorio, que juega su papel más importante en la distribución de las aguas.

9. RECOMENDACIONES

- 9.1 Establecer un sistema de colección de información sobre pérdidas calificadas como “desastres” o por determinadas amenazas, especializado, que permita realizar comparaciones y análisis.
- 9.2 Precisar con mayor detalle la definición de las categorías macro de uso del suelo que se han planteado en este estudio. Esto no significa incrementar las categorías, ya que de hacerse se estarían incrementando exponencialmente las categorías de zonificación final.
- 9.3 Revisar y complementar la caracterización de los suelos de la cuenca del río Achiguate.
- 9.4 Fijar criterios para la elaboración de mapas de amenaza, fundamentados en la aplicación de los mismos y con ello homogenizar la información disponible sobre la probabilidad de ocurrencia de las amenazas.
- 9.5 Predefinir criterios que determinen las necesidades de generación de información, dentro de un proceso iterativo, en el que se mejoran los criterios con base en investigación realizada sobre la información generada.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. Bollin, C. 2003. Gestión local de riesgo: experiencias de América Central. Trad. Servicios Lingüísticos GTZ. Alemania, GTZ. 63 p.
2. Brooks, KN. *et al.* 1998. Hydrology and the management of watersheds. 2 ed. India, Panima. 502 p.
3. Cardona, OD. 1993. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo: elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. *In* Maskrey, A. 1993. Los desastres no son naturales. Guatemala, Red de Estudios en Prevención de Desastres en América Latina. p. 45–65.
4. _____. 1993. Manejo ambiental y prevención de desastres: dos temas asociados privado. *In* Maskrey, A. 1993. Los desastres no son naturales. Guatemala, Red de Estudios en Prevención de Desastres en América Latina. p. 66–81.
5. _____. 2001. Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Tesis PhD. España, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals i Ports. 322 p.
6. Claxton, R. 1986. Weather-based hazards in colonial Guatemala. Georgia, US, West Georgia College, Studies in The Social Sciences 25:139–163.
7. CONRED (Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres, GT). 2000. Consolidado de eventos 1990–2002. Guatemala. Hoja Excell.
8. Consejo de Ministros, ES. 1995. Directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo de inundaciones. Boletín Oficial del Estado, Madrid, ES, feb 14:4846–4858. Consultado 10 abr 2005. Disponible en: http://www.proteccioncivil.org/centrodoc/legisla/r_386595.htm
9. CORDILLERA, GT. 2006. Evaluación de riesgos por deslizamientos y flujos de detritos en Santiago Atitlán, Sololá. Guatemala, CONRED. 178 p.
10. Chow, VT; Maidment, DR; Mays, LW. 2000. Hidrología aplicada. Trad. Juan Saldarriaga. Colombia, McGraw-Hill. 584 p.
11. Delgado, JC. 2002. Escorrentía, caudales y erosión hídrica: carga de lavado y carga de sedimentos del lecho. *In* Curso superior interactivo sobre la lucha contra la desertificación y defensa contra la sequía y las inundaciones (11, 2002, Antigua Guatemala). 2002. Ponencias. España, TRAGSATEC. 41 p.
12. Escobar, R. 2004. El riesgo sísmico y volcánico en Guatemala (entrevista). Guatemala, CONRED.
13. Escobar, R; Anleu, R. 2003. Escenario extremo de flujos piroclásticos para el volcán de Fuego. Guatemala, SE-CONRED. 15 p. Sin publicar.
14. Escobar, R; Miner, Y; Anleu, R. 2003. Marco teórico sobre la gestión del riesgo a desastres. Guatemala, SE-CONRED. 12 p. Sin publicar.
15. Espinosa, A; Asturias, J; Quezada, A. 1980. Applying the lessons learned in the 1976 Guatemalan earthquake to earthquake hazard zoning problems in Guatemala. *In* Simposio Internacional sobre el terremoto de Guatemala del 4 de febrero de 1976 y el proceso de reconstrucción (5, 1978, Guatemala). 1980. Memorias. Guatemala, FHA / CEMAT. tomo 2.
16. Feldman, L. 1993. Mountains of fire, land that shakes: earthquakes and volcanic eruptions in the historic past of Central America 1505–1899. US, Labyrinthos. 295 p.

17. Global Volcanism Program, US. 2004. Fuego (en línea). US, Smithsonian National Museum of Natural History. Consultado 17 jul 2004. Disponible en <http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=1402-09>
18. Guimaraes, R. 2001. Fundamentos territoriales y biorregionales de la planificación. Chile, Comisión Económica para América Latina. 88 p. (Medio Ambiente y Desarrollo no. 39). Consultado 12 abr 2005. Disponible en: <http://www.eclac.cl/cgi-bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/7/7687/P7687.xml&xsl=/dmaah/tpl/p9f.xsl&base=/uruguay/tpl/top-bottom.xslt>
19. Haapala, J et al. 2005. Volcanic hazards at Atitlan volcano, Guatemala. US, United States Geological Survey. 13 p. (Open File Report 2005-1403).
20. Harp, E; Wilson, R; Wieczorek, G. 1981. Landslides from the February 4, 1976, Guatemala earthquake. US, United States Geological Survey. 35 p. (Geological Survey Professional Paper 1204-A).
21. Harp, E; Wilson, R; Wieczorek, G. 1981. Seismically induced landslides from the February 4, 1976, Guatemala earthquake: eastern & western sectors, plate 1. US, United States Geological Survey. 1:50,000. Color. (Geological Survey Professional Paper 1204-A).
22. Harp, E; Wilson, R; Wieczorek, G. 1981. Seismically induced landslides from the February 4, 1976, Guatemala earthquake: eastern & western sectors, Plate 2. US, United States Geological Survey. 1:50,000. Color. (Geological Survey Professional Paper 1204-A).
23. Herrera, I. 1984. Levantamiento semidetallado de suelos de la cuenca del río Achiguate: fase 1. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 199 p.
24. _____. 1995. Manual de hidrología. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 223 p.
25. INAB (Instituto Nacional de Bosques, GT). 1999. Clasificación de tierras por capacidad de uso: aplicación de una metodología para tierras de la república de Guatemala. Guatemala. 96 p.
26. INE (Instituto Nacional de Estadística, GT). 1996. X censo de población y V de vivienda 1994. Guatemala. s.p.
27. INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT). 1991. Inventario de los principales deslizamientos ocurridos en la república de Guatemala. Guatemala. 247 p.
28. _____. 2004. Lluvia máxima diaria período de retorno de 2 años. Guatemala. Esc. 1:250,000. Color. 1 CD.
29. _____. 2004. Lluvia máxima diaria período de retorno de 10 años. Guatemala. Esc. 1:250,000. Color. 1 CD.
30. _____. 2004. Lluvia máxima diaria período de retorno de 30 años. Guatemala. Esc. 1:250,000. Color. 1 CD.
31. _____. 2006. Registros de lluvia diaria histórica para Guatemala. Guatemala. 1 CD.
32. JICA (Japan Internacional Cooperation Agency, GT). 1985. Proyecto de control de inundaciones: los ríos Achiguate y Pantaleón, informe ejecutivo. Guatemala, Ministerio de Comunicaciones, Transportes y Obras Públicas. 220 p.
33. Johansson, J. 2000. The soil liquefaction web site (en línea). US, University of Washington, College of Engineering. Consultado 24 feb 2005. Disponible en <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html>
34. Kanji, M; Massad, F; Cruz, P. 2003. Debris flows in areas of residual soils: occurrence and characteristics (en línea). *In* Internacional workshop on occurrence and mechanisms of flows in natural slopes and earthfills (5, 2003, Sorrento, IT). Consultado 10 ene 2007. Disponible en <http://www.unina2.it/flows2003/flows2003/articoli/articoli.htm>

35. Kiremidjian, A; Shah, H; Zsutty, T. 1980. Seismic hazard mapping for Guatemala. *In* Simposio internacional sobre el terremoto de Guatemala del 4 de febrero de 1976 y el proceso de reconstrucción (5, 1978, Guatemala). 1980. Memorias. Guatemala, FHA / CEMAT. tomo 2.
36. Kokusai Kogyo, JP. 2003. Estudio del establecimiento de los mapas básicos y mapas de amenaza para el sistema de información geográfica de la república de Guatemala: informe final, resumen ejecutivo. Guatemala, JICA / IGN / INSIVUMEH / SEGEPLAN. 172 p.
37. LA RED – CONRED. 2000. Base de datos de Guatemala: 1990 a 1999. Guatemala. Consultado 14 nov 2004. Disponible en <http://www.desinventar.org/sp/download/paso2.html>
38. LA RED – FLACSO. 2000. Base de datos de Guatemala: 1998 a 2000. Guatemala. Consultado 14 nov 2004. Disponible en <http://www.desinventar.org/sp/download/paso2.html>
39. LA RED (La red de estudios sociales para la prevención de desastres en América Latina, GT). 2003. Guía metodológica de desinventar. Guatemala, La Red / Universidad del Valle, CO. 38 p. Consultado 15 feb 2004. Disponible en <http://www.desinventar.org/sp/metodologia/index.html>
40. Lam, E. 1989. Levantamiento semidetallado de los suelos de la parte baja de la cuenca del río Achiguate. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 148 p.
41. Lavarreda, P. 1987. Levantamiento semidetallado de la cuenca del río Achiguate II. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 132 p.
42. Leopold, LB. 2000. A view of the river. US, Harvard University Press. 298 p.
43. Ligorria, J *et al.* 1995. Seismic hazard for Guatemala. Guatemala, NORSAR / CEPREDENAC. 46 p. (Reduction of natural disasters in Central America, earthquake preparedness and hazard mitigation, seismic zonation and earthquake hazard assesment. Technical Report no. 2-21).
44. López, F. 2003. Movimiento de sedimentos del río Samalá. *In* CONRED. 2004. Informe de avances del programa permanente de monitoreo e investigación Santiaguito–Samalá. Guatemala. Anexo 5B1.
45. MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT). 2001. Cartografía básica digital para Guatemala. Esc. 1:250,000. Guatemala. 1 CD.
46. Maskrey, A. 1993. Vulnerabilidad y mitigación de desastres. *In* Los desastres no son naturales. Guatemala, Red de estudios en prevención de desastres en América Latina. p. 93–110.
47. Matías, O. 2003. Mapas de amenaza en el volcán de Fuego (entrevista). Guatemala, INSIVUMEH.
48. Mears, A. 2002. Avalanche zoning (en línea). US, Westwide Avalanche Network. Consultado 20 mar 2005. Disponible en <http://www.avalanche.org/~moonstone/zoning/AVALANCHE%20ZONING.htm>
49. Mendoza, M; Domingues, L. 2004. Estimación de la amenaza y el riesgo de deslizamientos de laderas. *In* Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. México, CENAPRED. p. 135–178.
50. Miner, Y. 2004. Traslado de comunidades en riesgo (comunicación personal). Guatemala, CONRED.
51. Molina, E; Villagran, M; Ligorria, JP. 1996. Amenaza sísmica en Guatemala. *In* Diagnóstico de la prevención de desastres naturales en Guatemala con motivo del XX aniversario del terremoto del 4 de febrero de 1976 (2, 1996, Guatemala). Trabajos presentados. Guatemala. p. 19-38.
52. Monzón, H. 2004. Riesgo sísmico (comunicación personal). Guatemala, SISMOCONSULT.

53. Newhall, C; Hoblitt, R. 2002. Constructing event trees for volcanic crises. *Bulletin of Volcanology* 64:3–20.
54. OCEANO, ES. 1990. Océano uno: diccionario enciclopédico ilustrado. España. 1782 p.
55. Palacio, E Del *et al.* 1999. Las ramblas: los ríos invisibles. España, Organismo Autónomo de Parques Nacionales. 42 p.
56. Ponce, H. 1972. Evaluación de crecidas en Guatemala. Guatemala, Instituto Geográfico Nacional. 184 p.
57. Reed, S. 1995. Introducción a las amenazas (en línea). 2 ed. Costa Rica, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. Consultado 20 jun 2005. 181 p. Disponible en <http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/spa/doc6771/doc6771.htm>
58. Rose, W *et al.* 1987. Volcanic hazards of Fuego volcano, Guatemala: preliminary report. US, Michigan Technological University. 13 p.
59. Schilling, S *et al.* 2001. Riesgos de lahar en el volcán de Agua, Guatemala. US, Investigación Geológica de los Estados Unidos. 18 p. (Reporte de Archivo Abierto 01–431).
60. Stephenson, R. 1991. Desastres y desarrollo. Costa Rica, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. Consultado 21 jun 2005. 57 p. Disponible en <http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/spa/doc3842/doc3842.htm>
61. Strahler, A; Strahler, A. 1999. *Introducing physical geography*. 2 ed. US, John Wiley. 575 p.
62. Tavakoli, B; Monterroso, D. 2004. Monte Carlo seismic hazard maps for northern Central America, covering El Salvador and surrounding area. *Geological Society of America SPE* 375–31. In press.
63. Tax, P; Rosales, M. 1999. Mapa de amenaza de inundación: registro histórico de inundaciones en el país. 2 ed. Guatemala, INSIVUMEH. s.p.
64. Van Dine, D. 1985. Debris flows and debris torrents in southern Canadian Cordillera. *Canadian Geotechnical Journal* 22:44–68.
65. Varnes, D. 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Francia, UNESCO. 63 p.
66. Ventura, E. 1980. Recomendaciones para la elaboración de un código de diseño antisísmico para Guatemala. *In* Simposio Internacional sobre el terremoto de Guatemala del 4 de febrero de 1976 y el proceso de reconstrucción (5, 1978, Guatemala). 1980. Memorias. Guatemala, FHA / CEMAT. tomo 2.
67. Villagrán, JC. 2002. La naturaleza de los riesgos: un enfoque conceptual. Guatemala, CIMDEN. 76 p.
68. Wallance, J *et al.* 2001. Riesgos volcánicos en los volcanes Fuego y Acatenango, Guatemala. US, Investigación Geológica de los Estados Unidos. 18 p. (Reporte de Archivo Abierto 01–431).
69. Wilches-Chaux, G. 1993. La vulnerabilidad global. *In* Maskrey, A. 1993. Los desastres no son naturales. Guatemala, Red de estudios en prevención de desastres en América Latina. p. 11–44.
70. Zhai, G *et al.* 2003. Flood damage and it´s modelling: case of Tokai Flood 2000. *In* Annual meeting IIASA – DPRI on Integrated Disaster Risk Management: coping with regional vulnerability (3, 2003, Japón). 2003. Trabajos presentados. Japón, IASA / DPRI. 11 p.

ANEXOS

ANEXO I: Amenazas (eventos) definidos por DESINVENTAR.

Accidente	Licuación
Alud	Litoral
Aluvión	Lluvias
Avenida	Marejada
Biológico	Nevada
Contaminación	Neblina
Deslizamiento	Ola de calor
Epidemia	Otros
Erupción	Pánico
Escape	Plaga
Estructura	Sedimentación
Explosión	Sequía
Forestal	Sismo
Granizada	Tempestad
Helada	Tormenta E.
Huracán	Tsunami
Incendio	Tornado
Inundación	Vendaval

Accidente [Accident]

Accidentes de transporte vehicular, férreo, aéreo o naviero. Se limita a aquellos inducidos por fenómenos naturales como deslizamientos, sismos, huracanes, lluvias, o condiciones atmosféricas adversas, etc. Incluye aquellos accidentes de transporte que generan escapes de sustancias tóxicas, cualquiera sea su causa.

Alud [Avalanche]

Desprendimiento de masas de hielo y/o nieve.

Aluvión [Alluvion]

Avenidas torrenciales con arrastre de grandes cantidades de material sólido (guijarros, gravas y bloques de rocas), aplicable a aquellas regiones secas o cauces secos en los que las lluvias ocasionales los producen. Equivalente al término "huaico" utilizado en el Perú.

Avenida [Spate]

Avenida torrencial. Flujo violento de agua en una cuenca, a veces reportado como creciente (súbita, rápida), o como torrente. Se aplica cuando en los reportes aparece como "avalancha", cuando la avenida transporta troncos de árboles y/o abundantes sedimentos desde finos hasta bloques de roca. Pueden ser generados por lluvias, por ruptura de represamientos o por abundantes deslizamientos sobre una cuenca. Excluye los aludes, porque éstos implican desprendimiento de hielo o nieve.

Biológico [Biological]

Mortandad o migración de especies biológicas con causas conocidas o no. Pueden, en última instancia, estar asociados a contaminación o a cambios drásticos de parámetros ambientales. Un ejemplo es la "marea roja", el calentamiento de las aguas por el fenómeno de El Niño u obstáculos que el mismo hombre impone a ciertas especies, como los diques.

Contaminación [Pollution]

Concentración de sustancias contaminantes en el aire, el agua o los suelos, con niveles perjudiciales para la salud humana, para cultivos o especies animales.

Deslizamiento [Landslide]

Todo movimiento de masa en la superficie terrestre, diferente a erosión superficial. Incluye términos como derrumbe, asentamiento, corrimiento, movimiento de masa, reptación, desplazamiento, hundimiento, formación de grietas, colapso de cavernas o minas, caída de rocas, desprendimiento (lento o rápido) sobre vertientes o laderas, de masas de suelo o de rocas. Incluye los reportes de "falla" en cortes o taludes de laderas, vías, canales, excavaciones, etc.

Epidemia [Epidemic]

Enfermedad que ataca en una misma zona numerosos individuos (días, semanas, meses), como el cólera, la fiebre tifoidea, la peste bubónica, etc.

Erupción [Eruption]

Erupción volcánica con efectos desastrosos: erupciones y emisiones de gases y cenizas, caída de piedras (piroclastos), flujos de lava, etc. Incluye erupciones de volcanes de lodo (diapiros), presentes en algunas regiones.

Escape [Leak]

Escape, derrame o fuga de sustancias tóxicas, líquidas, sólidas o gaseosas (p. ej. fuga de gas propano), radioactivas o no, generadas por accidentes tecnológicos, por error humano o negligencia.

Estructura [Structure]

Daño o colapso de cualquier tipo de estructuras (incluidas aquellas relacionadas con las redes eléctricas, acueducto o alcantarillado), debidas a fenómenos como sobrecargas en escenarios públicos, puentes, etc. Incluye daños en estructuras, que sin llevarlas al colapso, las inhabilitan y que suelen ser reportadas como "fallas" (en el sentido de falla estructural). Los daños en estructuras inducidos por fenómenos naturales se reportan como efectos de ellos.

Explosión [Explosion]

Explosión de cualquier tipo, relacionadas con errores humanos, fallas en sistemas de infraestructura, etc. En los inventarios (típicos) con DesInventar se excluyen actos de guerra o terrorismo.

Forestal [Forest fire]

Incendio forestal. Incluye todos los incendios en campo abierto en áreas rurales, sobre bosques nativos, bosques cultivados, praderas, etc.

Granizada [Hailstorm]

Precipitación de granizo. Agua congelada que desciende con violencia de las nubes en granos más o menos duros y gruesos, pero no en copos como la nieve.

Helada [Frost]

Disminución de la temperatura hasta el punto de congelación con efectos nocivos en la población, cultivos, bienes y servicios.

Huracán [Hurricane]

En sentido estricto depresión tropical que corresponde a una anomalía atmosférica violenta que gira a modo de torbellino caracterizado por fuertes vientos, acompañados por lluvia. Ocurren en el Mar Caribe y en el Océano Pacífico Tropical. Equivale a los ciclones en el Océano Índico y a los tifones en el Pacífico Occidental. Cuando el término "huracán" se haya usado en las fuentes para vientos huracanados, vendavales locales, torbellinos, borrascas, se reportarán como "vendaval". Tormentas locales se reportarán como "tempestad".

Incendio [Fire]

Incendios urbanos, industriales o rurales, diferentes a incendios forestales.

Inundación [Flood]

Desbordamiento o subida de aguas, de forma rápida o lenta, sobre pequeñas áreas o vastas regiones, que supera la sección del cauce de los ríos o que se relaciona con el taponamiento de alcantarillas. Inundaciones por marejadas en zonas litorales se reportarán bajo el término "marejada".

Licuación [Liquefaction]

Comportamiento momentáneo como un líquido de suelos granulares saturados de agua, perdiendo su capacidad de soportar pesos. A pesar de ser un fenómeno secundario o inducido por "sismo", se ha incluido por ser causa de pérdidas y daños en muchas zonas habitadas, en áreas marítimas y continentales.

Litoral [Coastline]

Variación de la línea costera y/o de las zonas marítimas próximas a la costa. Incluye formación y destrucción de islas, playas y barras de arena, erosión de acantilados, con efectos sobre poblaciones, sobre la navegación, etc.

Lluvias [Rains]

Precipitación pluvial. Incluye lluvias puntuales, persistentes o torrenciales, o por encima de los promedios en una región específica, así como períodos anormalmente largos de precipitaciones. Incluye términos como aguacero, chaparrón, chubasco, diluvio, páramo (llovizna persistente cuando desemboca en desastres, por ejemplo en regiones áridas o semiáridas), turbonada, etc.

Marejada [Surge]

Llegada extraordinaria de grandes olas al litoral, causados por huracanes, vendavales, tempestades; por coincidencia entre la dirección de los vientos y períodos de marea alta o por aumentos del nivel medio del mar durante el fenómeno El Niño. En algunos lugares se llama "creciente" o "puja" a la subida de las mareas hasta los niveles máximos quincenales y "cordónazo" a los máximos anuales. Excluye los reportes asociados con tsunami o maremoto (en el sentido estricto indicado en "tsunami").

Neblina [Fog]

Masas de nubes que descienden hasta o se generan desde la superficie terrestre y que implican efectos sobre el transporte o cualquier otra actividad, por disminución de la visibilidad. Excluye falta de visibilidad por contaminación generada por polución, así sea generada por incendios de cualquier tipo.

Nevada [Snow storm]

Caída y acumulación anómala de nieve. Sobre todo cuando ocurre en zonas no sometidas a cambios climáticos estacionales. En zonas con estaciones de invierno se refiere a precipitaciones por encima de los valores medios multianuales, causando efectos especialmente severos.

Ola de calor [Heat wave]

Aumento de la temperatura media atmosférica muy por encima de los promedios en una región con efectos sobre poblaciones humanas, cultivos, bienes y servicios.

Pánico [Panic]

Pánico o histeria colectiva en concentraciones de personas (estadios, salas de cine, etc.) que conduce a muertes, heridos y/o destrozos materiales.

Plaga [Plague]

Proliferación de bichos que afectan a comunidades, a la agricultura, a la ganadería o a bienes perecederos almacenados. Por ejemplo: ratas, langostas abejas africanizadas, etc.

Sedimentación [Sedimentation]

Deposición de material sólido producido por movimientos de masa en laderas por erosión superficial, en cauces de ríos, por inundaciones, avenidas torrenciales, aludes, marejadas o tsunami.

Sequía [Drought]

Temporada anormalmente seca, sin lluvias, o con déficit de lluvias. En general se trata de períodos prolongados (meses, años, incluso decenios), que pueden ocurrir en áreas continentales restringidas o a escalas regionales. Excluye "Ola de calor" aunque una "Ola de calor" puede ocurrir durante un periodo de "Sequía".

Sismo [Earthquake]

Todo movimiento de la corteza terrestre que haya causado algún tipo de daño o efecto adverso sobre comunidades o bienes. Incluye términos como temblor, terremoto, temer y sismo.

Tempestad [Storm]

Lluvia acompañada de vientos fuertes y/o de descargas eléctricas (rayos, relámpagos), incluye reportes que aparecen como tormenta. En general y también en razón de connotaciones regionales, puede no ser posible diferenciar entre "tempestad" y "vendaval".

Tormenta E. [Electric storm]

Tormenta eléctrica: concentración de descargas estáticas atmosféricas (rayos), con efectos sobre humanos, animales y bienes domésticos, infraestructura (por ejemplo sobre redes eléctricas, conduciendo a apagones), o sobre la industria. Se diferencia de "Tempestad" en que ésta no está acompañada de lluvias y vientos fuertes.

Tornado [Tornado]

Columna de vientos fuertes en remolino en forma de embudo que llega a la tierra desde nubes cúmulonimbus. Puede o no incluir lluvia, granizo y rayos.

Tsunami [Tsunami]

Aplicado exclusivamente a olas generadas por movimiento en el fondo del mar, generado por sismos, erupciones volcánicas o deslizamientos. Los términos maremoto, marejada, maretazo, cordónazo o mareta, serán reportados como "Marejada", si no corresponden a "Tsunami" en sentido estricto.

Vendaval [Strong wind]

Toda perturbación atmosférica que genera vientos fuertes y destructivos, principalmente sin lluvia, o con poca lluvia: sinónimo de temporal, vientos huracanados, torbellinos, borrasca, viento fuerte, ventisca, tromba, ráfaga, racha. Excluye "Tornado" y Ciclón.

Otro [Other]

Cuando el desastre no está relacionado con ninguno de los tipos de eventos anteriormente presentados. Antes de usar este tipo de evento agote las opciones de seleccionar alguno de los eventos de la lista, si el evento es recurrente en su inventario y no hay nada en la lista que le corresponda sugerimos crear un nuevo evento.

Nota:

Los eventos Neblina y Tornado creados respectivamente como eventos locales por el equipo DesInventar de CENTRO en Argentina y el de la Universidad de Gainesville en La Florida (EEUU) fueron incluidos dentro de la lista de eventos predefinidos en DesInventar.

Además de estos eventos predefinidos, algunos usuarios han creado los siguientes, atendiendo a necesidades específicas y se mantienen en los inventarios como "eventos locales", no pertenecen a la lista de eventos predefinidos:

Ahogamiento. Creado por el Sistema Nacional de Protección Civil de Panamá (SINAPROC).

Nafragio o boat capsise. Creados por el SINAPROC, Panamá y UNDP India.

Ozono. Creado por el equipo DesInventar en Chile (Universidad de Chile)

Intoxicación. Creado por el OSSO en Colombia.

ANEXO II: Actividad histórica registrada del volcán de Fuego.

Fuego												
Area of Activity	Start		Stop		Eruptive Characteristics					VEI	Volume	
	Year	MoDy	Year	MoDy	CERF	SIGC	ENPF	FLDS	FDMT		L / T	
	C	-					X					
		1580u	.....	.....	-	-	-	-	-	-
	C	0590u	.....	.....	-	-	X					
	C	0900u	.....	.....	-	-	X					
	C	0970t	.....	.....	-	-	X					
		1524	0430p	1524	0715q	-	-	X			2	
(possibly only earthquakes)	?	1526	.....	.....	-	-	?				2	
		1531	1231p	.....	.....	-	-	X			2	
(possibly an eruption of Atitlán)	@	1541	.....	.....	-	-	?			
		1542	0114	.....	.....	-	-	-		
		1551	.....	1552	0331>	-	-	X			2	
(possibly only an earthquake)	?	1557	0115	.....	.....	-	-	?		
(possibly same as 1557 event)	?	1559	0116	.....	.....	-	-	?		
(possibly only earthquakes)	?	1565	.....	.....	.....	.....	?				2	
(possibly same as 1581 eruption)	?	1571	1225	.....	.....	-	-	X				
(possibly only earthquakes)	?	1575	.....	.....	.....	.....	?				2	
(possibly only an earthquake)	?	1576	.....	.....	.....	.....	?				2	
(possibly only earthquakes)	?	1577	.....	.....	.....	.....	?				2	
		1581	1205	1582	0115	X	-	X	X	-X	4?	- / 8

					-	-	-	-			
		1585	0115	1585	07 ..	---	---	X--	---	----	2
		1586	0603b	1586	12 ..	X--	---	X--	X--	----	2
		1587	0724	....	....	---	---	X--	---	----	2
		1614	....	....	....	---	---	X--	---	----	2
		1617	....	....	....	---	---	X--	---	-X--	3
		1620	....	....	....	---	---	X--	---	----	2
		1623	01 ..	....	....	---	---	X--	---	----	2
		1629	....	1632	....	---	---	X--	---	----	2
(possibly only earthquakes)	?	1679	....	....	....	---	---	?--	---	----
(pumice seen off Guatemala coast)	@	1685	09 ..	....	....	---	---	X--	---	----	2
		1686	....	....	....	---	---	X--	---	----	2
(possibly only an earthquake)	?	1689	....	....	....	---	---	?--	---	----	2
		1699	....	....	....	---	---	X--	---	----	2
		1702	0804	....	....	---	---	X--	---	----	2
		1705	0131	1705	0202	---	---	X--	---	--?-	2
		1706	1004	....	....	---	---	X--	---	----	2
(possibly same as 1710 eruption)	?	1709	1014	....	....	---	---	---	?--	----
		1710	1014	....	....	---	---	X--	---	----	2
		1717	0827	1717	1226e	---	---	X--	---	-X--	4? - / 8
		1730	09 ..	....	....	---	---	X--	---	----	2
		1732	05 ..	....	....	---	---	X--	---	----	2
		1737	0827	1737	0924	-X-	---	X--	---	----	4? - / 8
(possibly	?	1751	....	....	....	---	---	?--	---	----	2

only an earthquake)					-	-	-	-			
(possibly only an earthquake)	?	1765	.....	.....	.....	---	---	?--	---	-----	2
(possibly only earthquakes)	?	1773	.....	.....	.....	-	-	-	-	-----	2
		1799	.....	.....	.....	-	-	X--	---	-----	3 - / 7
		1826	.....	.....	.....	X--	---	X--	---	-----	2
		1829	.....	.....	.....	-	-	X--	?--	-----	2
	?	1850	.....	.....	.....	-	-	?--	---	-----	2
	?	1852	.....	.....	.....	-	-	?--	?--	-----	2
		1855	0929	1855	0930	-	-	X--	---	-----	2
		1856	0109	1856	0307	-	-	X--	X--	-----	2
		1856	0929	1856	0930	-	-	X--	X--	-----	2
		1857	0115	1857	0217	X--	---	X--	X--	-----	4? - / 8
		1857	0917	.....	.....	-	-	X--	X--	-----	2
		1860	0818	1860	0923	X--	---	X--	X--	-X--	2
	?	1861	1121	.....	.....	-	-	?--	---	-----	2
	?	1867	.....	.....	.....	-	-	?--	---	-----	2
		1880	0628	1880	0820	-	-	X--	X--	-----	4? - / 8
		1896	0110	.....	.....	-	-	X--	---	-----	2?
		1932	0121	1932	0122	X--	---	XX-	---	-----	4 - / 8
		1944	1201p	.....	.....	-	-	X--	---	-----	2
		1947	.....	.....	.....	-	-	X--	---	-----	2
		1949	11 ..	.....	.....	-	-	X--	---	-----	2
		1953	0409	1953	0413	X--	---	X--	X-	-----	3
		1955	0726e	.....	.....	X--	---	X--	X--	-----	1
		1957	0219	1957	0221>	X--	---	XX-	---	-----	3 - / 7

1962	0804	1962	1109	X - - - - X - - X - -	- - X -	3	6 / 7
1963	0928	1963	0930	X - - - - X X - X - -	X X X -	3	- / 6
1966	0207	1966	0501	X - - - - X X - X - -	- - - -	3	
1966	0812	1966	0813	X - - - - X - - - -	- - - -	3	- / 6
1967	0422	1967	0424	X - - - - X - - - -	- - - -	2	- / 6
1971	0914	1971	0915	X - - - - X X - - -	X X X -	3	- / 7
1973	0223	1973	0323	X - - - - X X - - -	- - X -	2	- / 6
1974	1010	1974	1204	X - - - - X X - - -	X X - -	4	- / 8
1975	0528	1975	1021	X - - - - X X - - -	- - - -	2	
1977	0303	1977	0419	X - - - - X - - - -	- - - -	1	- / 4
1977	0911	1979	0808	X - - - - X X - X -	- - - -	2	- / 6
1987	0105d	1987	02 . . ?	X - - - - X - - - -	- - - -	1	
1999	0521	2000	1209>	X - - - - X X - X - -	- X X -	2	
2002	0104	2005>	. . . .	X - - - - X X - X - -	- - X -	2	

Fuego

The following references are the sources used for data regarding this volcano. References are linked directly to our volcano data file. Discussion of another volcano or eruption (sometimes far from the one that is the subject of the manuscript) may produce a citation that is not at all apparent from the title. Additional discussion of data sources can be found under [Volcano Data Criteria](#).

Bonis S (pers. comm.), 1994

Bonis S, Salazar O, 1973. The 1971 and 1973 eruptions of volcano Fuego, Guatemala, and some socio-economic considerations for the volcanologist. *Bull Volc*, 37: 394-400

Bullard F M, 1957. Active volcanoes of Central America. *20th Internatl Geol Cong, Mexico City*, Sec 1: 351-371

Carr M J, 1984. Symmetrical and segmented variation of physical and geochemical characteristics of the Central American volcanic front. *J Volc Geotherm Res*, 20: 231-252

Chesner C A, Halsor S, 1997. Geochemical trends of sequential lava flows from Meseta Volcano, Guatemala. *J Volc Geotherm Res*, 78: 221-237

Chesner C A, Rose W I, 1984. Geochemistry and evolution of the Fuego volcanic complex, Guatemala. *J Volc Geotherm Res*, 21: 25-44

Coombs H A, Howard A D, 1960. United States of America. *Catalog of Active Volcanoes of the World and Solfataras Fields*, Rome: IAVCEI, 9: 1-68

Davies D K, Quearry M W, Bonis S B, 1978. Glowing avalanches from the 1974 eruption of the volcano Fuego, Guatemala. *Geol Soc Amer Bull*, 89: 369-384

Dozy J J, 1949. Some notes on the volcanoes of Guatemala. *Bull Volc*, 8: 47-68

Dunn H, 1828. *Guatemala in 1827-28*. New York: G & C Carvill, 318 p

Feldman L H (pers. comm.), 1988

Feldman L H (pers. comm.), 1994

- Feldman L H, 1986. Master list of historic (pre-1804) earthquakes and volcanic eruptions in Central America. *In: Claxton R H (ed) Investigating Natural Hazards in Latin American History*, West Georgia College: Studies Social Sci, 25: 63-105
- Feldman L H, 1993. *Mountains of Fire, Lands that Shake: Earthquakes and Volcanic Eruptions In the Historic Past of Central America (1505-1899)*. Culven City, Calif: Labyrinthos, 295 p
- Hantke G, 1951. Übersicht über die Vulkanische Tätigkeit 1941-1947. *Bull Volc*, 11: 161-208
- Hantke G, 1953. Übersicht über die Vulkanische Tätigkeit 1948-1950. *Bull Volc*, 14: 151-180
- Hantke G, 1955. Übersicht über die Vulkanische Tätigkeit 1951-1953. *Bull Volc*, 16: 71-114
- Hantke G, 1959. Übersicht über die Vulkanische Tätigkeit 1954-1956. *Bull Volc*, 20: 3-36
- Hantke G, 1962. Übersicht über die Vulkanische Tätigkeit 1957-1959. *Bull Volc*, 24: 321-348
- IAVCEI, 1973-80. Post-Miocene Volcanoes of the World. *IAVCEI Data Sheets, Rome: Internatl Assoc Volc Chemistry Earth's Interior*.
- Incer J (pers. comm.), 1988
- Incer J, 1988. Central American volcanic events (1524-1924). *Unpublished manuscript*, 52 p
- Lamb H H, 1977. Supplementary Dust Veil Index assessments. *Climate Monitor*, 6: 57-67
- Martin D P, 1979. The historic activity of Fuego volcano, Guatemala: constraints on the subsurface magma bodies and processes therein. *Unpublished MSci thesis*, Michigan Tech Univ, 87 p
- Martin D P, Rose W I, 1981. Behavioral patterns of Fuego volcano, Guatemala. *J Volc Geotherm Res*, 10: 67-81
- Meyer-Abich H, 1956. Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador. *Anales Serv Geol Nac El Salv*
- Montessus de Ballore F, 1884. *Temblores y Erupciones Volcanicas en Centro-America*. San Salvador: F Sagrini, 246 p
- Mooser F, Meyer-Abich H, McBirney A R, 1958. Central America. *Catalog of Active Volcanoes of the World and Solfataras Fields*, Rome: IAVCEI, 6: 1-146
- Rose W I, Anderson A T, Woodruff L G, Bonis S, 1978. The October 1974 basaltic tephra from Fuego volcano Guatemala: description and history of the magma body. *J Volc Geotherm Res*, 4: 3-53
- Rose W I, Bonis S, Stoiber R E, Keller M, Bickford T, 1973. Studies of volcanic ash from two recent Central American eruptions. *Bull Volc*, 37: 338-364
- Rose W I, Wunderman R L, Hoffman M F, Gale L, 1983. A volcanologist's review of atmospheric hazards of volcanic activity; Fuego and Mount St. Helens. *J Volc Geotherm Res*, 17: 133-157
- Sapper K, 1917. *Katalog der Geschichtlichen Vulkanausbrüche*. Strasbourg: Karl J Trubner, 358 p
- Sapper K, 1925. *The Volcanoes of Central America*. Halle: Verlag Max Niemeyer, 144 p
- Sapper K, 1927. *Vulkankunde*. Stuttgart: J Engelhorn's Nachf, 424 p
- Smithsonian Institution-CSLP, 1968-75. [Event notification cards]. *Center for Short-Lived Phenomena (CSLP) Event Cards*
- Smithsonian Institution-GVN, 1990-. [Monthly event reports]. *Bull Global Volc Network*, v 15-28
- Smithsonian Institution-SEAN, 1975-89. [Monthly event reports]. *Bull Scientific Event Alert Network (SEAN)*, v 1-14
- Stoiber R E, 1975. Eruption of Volcan Fuego; October 14th, 1974. *Bull Volc*, 38(4): 863-869
- Stoiber R E, Rose W I, 1970. The geochemistry of Central American volcanic gas condensates. *Geol Soc Amer Bull*, 81: 2891-2912
- Vallance J W, Schilling S P, Matias O, Rose W I, Howell M M, 2001. Volcano hazards at Fuego and Agua, Guatemala. *U S Geol Surv Open-File Rpt*, 01-431: 1-23
- Vallance J W, Siebert L, Rose W I, Giron J R, Banks N G, 1995. Edifice collapse and related hazards in Guatemala. *J Volc Geotherm Res*, 66: 337-355
- Vazquez de Espinosa A, 1942. Compendium and description of the West Indies. *Smithsonian Inst Misc Coll*, 862 p
- Volcanological Society of Japan, 1960-96. *Bull Volc Eruptions*, no 1-33. [Annual reports issued 1 to 3 years after event year, published since 1986 in *Bull Volc*]