ESTUDIO HIDRO-GEOLÓGICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y ALERTA ANTE DESLIZAMIENTOS EN ASENTAMIENTOS URBANOS DEL DEPARTAMENTO DE GUATEMALA, CENTRO AMÉRICA

Elaborado por Geopetrol S.A.



Para la Alianza Oxfam GB – ESFRA – ISMUGUA







En el marco del PROYECTO DIPECHO V "Fortaleciendo capacidades de preparación ante desastres en los asentamientos urbanos del departamento de Guatemala"

Guatemala, Agosto 2007

Proyecto financiado por la Comisión Europea a través del Programa de Preparación ante Desastres DIPECHO

COMISION EUROPEA



Ayuda Humanitaria

en coordinación con la Secretaría Ejecutiva de CONRED (SE-CONRED), la Municipalidad de Guatemala y la Municipalidad de Chinautla



Este documento ha sido elaborado y publicado con la contribución financiera de la Comisión Europea quien no se hace responsable de las opiniones aquí recogidas ya que no reflejan su posición oficial.

INDICE

PRESENTACIÓN	4
OBJETIVOS DEL ESTUDIO Y AREA DE INTERÉS	8
ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS (Mora – Vahrson)	10
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LADERAS	41
INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS Y ANÁLISIS DE LLUVIAS HISTÓRICAS	55

PRESENTACIÓN

La ocurrencia de deslizamientos en Guatemala cobra cada vez más importancia en el marco de la prevención y mitigación de desastres. Por un lado, las cambiantes condiciones meteorológicas, la degradación del medio ambiente y la expansión de la frontera agrícola parecen estar intensificando la periodicidad del fenómeno. Y en el otro extremo, la falta de ordenamiento territorial y la pobreza como factor generador de vulnerabilidad aumentan los niveles de riesgo de ciertos grupos poblacionales.

En los últimos años han ocurrido innumerable cantidad de deslizamientos catastróficos en el país lo cual ha dejado una secuela de más de 650 personas fallecidas y millones de quetzales en pérdidas materiales. Entre estos eventos sobresalen los flujos de lodo ocurridos en los años 2000 y 2005 en la cabecera municipal de Senahú, Alta Verapaz en donde fallecieron alrededor de 34 personas; el flujo de lodo en la aldea El Porvenir, San Lucas Tolimán en el 2002 en donde fallecieron 23 personas y el catastrófico flujo de lodo que sepultó gran parte del cantón Panabaj en Santiago Atitlán durante la tormenta tropical Stan en octubre del 2005 con una fatídica cauda de más de 600 personas fallecidas.

En los barrancos y áreas empinadas de la zona metropolitana de Guatemala se presentan condiciones geológicas y topográficas que predisponen el terreno a la ocurrencia de deslizamientos. La

4

presencia de materiales piroclásticos de pómez y cenizas volcánicas combinados con fuertes pendientes crea un escenario de mayor susceptibilidad. Peor aún, actividades antropogénicas como la urbanización y extracción de materiales, entre otras, incrementan considerablemente dicha susceptibilidad. Ante tal combinación de factores cada vez es más factible la ocurrencia de deslizamientos catastróficos principalmente en época lluviosa o derivados de actividad sísmica.

En el presente análisis se incluyen varias componentes de trabajo tendientes a estimar la susceptibilidad a deslizamientos a nivel de la zona metropolitana, la estabilidad de laderas a nivel local y la realización de una base de datos (inventario) de deslizamientos históricos y lluvias relacionadas.

Para estimar la susceptibilidad a deslizamientos a nivel de zona metropolitana se aplicó la metodología Mora y Vahrson (1984) la cual utiliza información geológica, topográfica y meteorológica para estimar el índice de susceptibilidad ante deslizamientos. En la forma más simple, asumimos que este índice nos ilustra la susceptibilidad propia y natural del terreno a deslizarse. En pasos posteriores la metodología permite incorporar los factores de disparo (lluvia y/o actividad sísmica) para la determinación de la amenaza relativa. En nuestro análisis, solamente se estimó la amenaza relativa ante deslizamientos provocados por lluvias fuertes. En general, los resultados del análisis sugieren que alrededor del 88% del área metropolitana estaría catalogada como de baja a moderada amenaza ante deslizamientos. En contraste, el 10 del área corresponde a la categoría de alta amenaza y el 2% se catalogaría como zona de muy alta amenaza. Sin embargo, las limitaciones de información geológica y meteorológica a detalle en la totalidad del área estudiada podrían estar sub-estimando el porcentaje de superficie ubicada en amenaza alta y moderada.

En materia de preparación ante desastres, el hecho que el 12% del área metropolitana con condiciones de alta a muy alta amenaza corresponda a zonas de asentamientos urbanos de alta vulnerabilidad y sea el hogar de alrededor de 82,700 personas presupone altos niveles de riesgo que merecen especial atención por parte de las autoridades municipales y de las instituciones miembros del sistema CONRED.

Adicionalmente, los análisis de estabilidad de laderas utilizando la metodología del factor de estabilidad demuestran que el factor crítico en la ocurrencia de deslizamientos en la zona metropolitana de Guatemala es el agua de lluvia. Al parecer, los niveles de saturación del suelo en los meses álgidos del invierno (septiembre y octubre) favorece la ocurrencia de deslizamientos. Por lo tanto, las medidas de mitigación deberán estar enfocadas al manejo y canalización de las aguas de lluvia, escorrentía e infiltración.

6

Una de las posibilidades para reducir la pérdida de vidas humanas ante la ocurrencia de deslizamientos catastróficos en la zona metropolitana de Guatemala es la implementación de un sistema de monitoreo de lluvias y alertamiento operado por las propias comunidades en coordinación con instituciones de respuesta a emergencias y apoyado por funcionarios de instituciones de nivel nacional.

Los resultados del presente estudio han sido enfocados a proporcionar elementos de juicio para el diseño, implementación y operación de un sistema con tal estructura.

> Ing. Edy Manolo Barillas, M.Sc. Coordinador Proyecto DIPECHO V Oxfam Gran Bretaña

OBJETIVOS DEL ESTUDIO Y ÁREA DE INTERÉS

El objetivo principal del presente estudio ha sido la realización de análisis de susceptibilidad a deslizamientos, estabilidad de laderas, inventarios de deslizamientos y análisis de lluvias históricas para el diseño, implementación y operación de un sistema de monitoreo de lluvias y alertamiento ante deslizamientos cuyos beneficiarios principales serán los habitantes de los asentamientos en el departamento de Guatemala.

Los resultados son presentados en forma de mapas ilustrativos, listados de comunidades amenazadas, cortes de terreno, gráficas y reportes narrativos. En todos los casos, se añadió información demográfica, urbanística y de referencia para lograr una mejor presentación de los resultados y favorecer su interpretación.

El área de análisis comprende alrededor de 610 kilómetros cuadrados de 8 municipios del departamento de Guatemala, incluyendo San Lucas Sacatepéquez, Mixco, Chinautla, Guatemala, Santa Catarina Pinula, Villa Canales, San Miguel Petapa y Villa Nueva (Figura 1).



Figura 1. Ubicación del área de interés.

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD ANTE DESLIZAMIENTOS GENERADOS POR LLUVIAS FUERTES EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA - Metodología Mora Vahrson -

1. MARCO CONCEPTUAL DEL ANÁLISIS.

1.1 Definiciones.

Para los propósitos del presente análisis aplican las siguientes definiciones:

• Deslizamiento.

Movimiento de una masa de roca, escombros o suelo a lo largo de una ladera (Cruden, 1991; en Cruden y Varnes, 1996).

Este concepto tan amplio no hace énfasis en el tipo de movimiento, no especifica el tipo y características del material involucrado y tampoco proporciona información sobre la distribución espacial o temporal del evento. Para propósitos generales, informativos o de referencia es común y apropiado utilizar el término deslizamiento.

• Amenaza.

Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino en un tiempo y un área dada (WMO, 1999).

• Susceptibilidad (a deslizamientos).

Predisposición del terreno a sufrir un deslizamiento en función de sus condiciones geológicas, topográficas y de humedad propia (Mora y Vahrson, 1984).

1.2 Clasificación de deslizamientos por el tipo de movimiento (Cruden y Varnes, 1996).

La cinemática de los deslizamientos, es decir, el movimiento que gobierna el desplazamiento de la masa de material, es uno de los principales criterios para su clasificación. De igual importancia es el hecho que el tipo de movimiento es uno de los principales criterios que deben ser utilizados para el diseño e implementación de las medidas correctivas o de mitigación. Por ejemplo, la *caída* de rocas desde la parte alta de una ladera puede ser mitigada con la colocación de barreras de contención a lo largo de la ladera mientras que el *volcamiento* de esas mismas rocas necesitará medidas como el anclaje.

Los cinco tipos de movimientos que se pueden presentar en un deslizamiento son: caída (*fall*), volcamiento (*topple*), deslizamiento (*slide*), deslizamiento extensivo (*spread*) y flujo (*flow*). Estos tipos de movimiento no necesariamente ocurren en forma independiente ya que en muchos eventos pueden encontrarse dos o más diferentes tipos ocurriendo sucesiva o simultáneamente.

• Caída.

Un evento de caída de material se inicia con el desprendimiento de suelo o roca desde la parte alta de una ladera empinada y su posterior desplazamiento (cayendo, rodando, rebotando o mixto) a lo largo de la ladera. <u>El identificador</u> principal para este movimiento es que el frotamiento o fricción entre la masa desplazada y la superficie de la ladera es mínimo o nulo. El principal factor que condiciona el tipo de desplazamiento es la pendiente. Se acepta que en pendientes mayores de 76 grados el desplazamiento principal será la caída libre y el rebote mientras que en pendientes menos pronunciadas (45 grados o menos) y de mayor longitud prevalecerá el rodamiento. En ambos casos, la masa desplazada estará expuesta a disgregarse y ese podría ser un factor que modifique el tipo de desplazamiento. La velocidad de ocurrencia de este tipo de movimiento es normalmente entre rápido a extremadamente rápido. En la Figura 2 se muestra un esquema ilustrativo para este tipo de deslizamiento. Muchos de los pequeños deslizamientos que ocurren a lo largo de las carreteras y caminos de los límites oriental y occidental del valle de la ciudad de Guatemala (Ciudad San Cristóbal, Mixco y Carretera a El Salvador, respectivamente) pertenecen a este tipo.



Figura 2. Esquema ilustrativo de <u>caída</u> de rocas. Todas las figuras de esta sección tomadas de Cruden y Varnes (1996).

En la Fotografía 1 se muestra una caída ocurrida en un macizo de rocas volcánicas en los alrededores de la confluencia de los ríos Las Vacas y Chinautla. Como puede observarse en la fotografía, los fragmentos de roca caen desde la parte alta del macizo y se acumulan en la parte basal cercanos al cauce del río. Debido a la poca altura del talud se presume que en este fue un movimiento de caída libre.



Fotografía No. 1 Caída de rocas volcánicas en la margen norte del río Las Vacas en su confluencia con el río Chinautla.

• Volcamiento.

Este tipo de movimiento se define como la rotación hacia el frente y hacia fuera con base en un punto o eje de rotación ubicado bajo el centro de gravedad de la masa desplazada (<u>caída de dominó</u>). En muchas ocasiones, este tipo de movimiento es el detonante para movimientos posteriores de caída o de deslizamiento del material. La velocidad de ocurrencia de este tipo de movimiento varía de extremadamente lento a extremadamente rápido algunas veces acelerándose como producto del propio movimiento. En la Figura 3 se muestra un esquema ilustrativo para este tipo de deslizamiento. En la zona metropolitana de Guatemala no se tienen registros de deslizamientos tipo volcamiento en parte debido a las



Figura 3. Esquema ilustrativo de volcamiento de rocas.

• Deslizamiento.

Este tipo de movimiento ocurre cuando una masa de roca o suelo se desliza dominantemente a lo largo de una o varias superficies de ruptura o de una delgada zona de intensa deformación de material. Este movimiento no ocurre inicialmente en forma simultánea sobre lo que eventualmente será dicha superficie de ruptura sino más bien se inicia en forma local y luego se extiende en una o varias direcciones. Normalmente, los primeros signos para este tipo de movimiento son las fracturas o grietas en superficie en donde luego se podrá formar el escarpe del deslizamiento. Este tipo particular de movimiento está subdivido en dos categorías en función de las características de la superficie de ruptura. Los deslizamientos **rotacionales** son aquellos en donde la superficie de ruptura tiene una forma <u>curva y cóncava</u>. Este tipo de movimientos ocurren más frecuentemente en materiales homogéneos. Normalmente, en la zona alta del deslizamiento observamos "gradas" debido al desplazamiento casi vertical de la masa deslizada. Es muy común encontrar acumulaciones de agua en esta parte alta del deslizamiento lo cual mantiene el material con tal contenido de humedad que el movimiento puede perpetuarse en el tiempo. La Figura 4a es un esquema ilustrativo para este tipo de deslizamiento. El ejemplo clásico de movimiento rotacional lo podemos observar en una ladera de la carretera que de Santa Catarina Pinula conduce a Boca del Monte más o menos 500 metros al sur de El Pueblito en donde pueden observarse las grietas cóncavas de la corona del deslizamiento afectando directamente la carretera.



Figura 4. Esquema ilustrativo de deslizamiento de material. a) rotacional y b) traslacional.

Los deslizamientos **traslacionales** son aquellos en donde el material se desliza a lo largo de una superficie de ruptura <u>plana u ondulada</u>. Estas superficies de ruptura (o traslado) normalmente coinciden con discontinuidades geológicas como fallas, fracturas o planos de estratificación aunque también es normal que se formen a lo largo del contacto entre el basamento rocoso y la capa superficial de suelo o material residual en cuyo caso tendrán una forma irregular. Tan pronto como el deslizamiento traslacional progresa la masa desplazada puede quebrarse, particularmente si su velocidad o contenido de agua se incrementa, y entonces puede convertirse en un flujo de material. La Figura 4b muestra un esquema ilustrativo para este tipo de deslizamiento. Posiblemente, los flujos de lodo que se disparan en la época de invierno en los asentamientos urbanos del área metropolitana de Guatemala puedan ser originados por deslizamientos traslacionales someros y de poco volumen de pómez y/suelo altamente saturados que al viajar a lo largo de la ladera se convierten en torrentes fluidos de material.

Deslizamiento Extensivo.

Este tipo de movimiento ocurre en forma de extensión lateral de una masa de material en combinación con un hundimiento general sobre una delgada capa de material suave, húmedo y/o deformable (arena, limo, arcilla, o mixta = "<u>capa mantequilla</u>"). En este tipo de movimiento la superficie de ruptura tampoco sufre un movimiento friccional de intensa deformación. El material superior puede entonces hundirse, moverse por traslación y/o rotación, desintegrarse, o "licuarse" y entonces empezar a fluir. A pesar que este tipo de movimiento es complejo son lo suficientemente comunes en ciertos materiales geológicos que es factible clasificarlos como un tipo de movimiento diferente al traslacional. La Figura 5 muestra un esquema ilustrativo para este tipo de deslizamiento. No existen registros de este tipo de movimiento en la zona metropolitana de Guatemala aunque eso no signifique que el fenómeno no se pueda presentar.



Figura 5. Esquema ilustrativo de deslizamiento extensivo de material homogéneo y macizo (roca) sobre material suave (arcilloso).

• Flujo.

Un flujo es un movimiento espacialmente continuo en el cual las superficies de fricción son de corta duración, poco espaciadas y usualmente no preservadas. En muchas ocasiones pueden observarse evoluciones de movimientos finalizando en flujos en función del contenido de agua, movilidad y pendiente del terreno. Normalmente, los flujos de detritos (fragmentos mayores de 2 centímetros) pueden tener velocidades extremadamente altas conforme el material desplazado pierde cohesión, incrementa su contenido de agua o encuentra pendientes más fuertes. La Figura 6 muestra un ejemplo ilustrativo para este tipo de fenómeno.

Los flujos de lodo son los responsables de la mayoría de los eventos más catastróficos en la historia reciente de Guatemala. Fue un flujo de lodo el responsable de la tragedia de doña Beatriz de la Cueva en épocas coloniales en la Antigua Guatemala. Fue un flujo de lodo el responsable de la muerte de más de 600 personas en el cantón Panabaj, Santiago Atitlán durante el Stan. Y fue un flujo de lodo el responsable de la colonia El Edén, zona 5 de Guatemala.



Figura 6. Esquema ilustrativo de flujo a lo largo de una ladera empinada.

Por el tipo de análisis e información de entrada, se asume que la metodología Mora-Vahrson evalúa la susceptibilidad del terreno a sufrir deslizamientos principalmente del tipo traslacional. El autor considera que los resultados obtenidos indicarían las posibles "zonas de iniciación" de tales fenómenos y no la extensión total del material desplazado.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Para la evaluación de la susceptibilidad ante deslizamientos provocados por lluvias fuertes se utilizó la metodología de Mora y Vahrson (1994) la cual fue desarrollada y probada en una provincia lluviosa de Costa Rica.

En general, con la metodología Mora-Vahrson se estima inicialmente el Índice de Susceptibilidad a partir de la evaluación de tres parámetros considerados como críticos para la ocurrencia de deslizamientos:

- pendiente,
- geología y
- humedad del suelo.

Seguidamente, se analiza la influencia de la lluvia como factor desencadenante de deslizamientos utilizando datos de lluvia máxima diaria de estaciones meteorológicas vecinas. A pesar que con la metodología Mora-Vahrson también es posible analizar la influencia de la energía sísmica como factor desencadenante esta variable no fue considerada en el presente análisis.

La metodología Mora-Vahrson para la evaluación de susceptibilidad ante deslizamientos provocados por lluvias fuertes se aplica siguiendo los pasos enumerados a continuación:

2.1 Estimación del Índice de Susceptibilidad.

Para la estimación del Índice de Susceptibilidad es necesario considerar los tres factores críticos mencionados anteriormente: la pendiente, las unidades litológicas (geología) y la humedad propia del terreno.

Con base a la correlación entre deslizamientos históricos provocados por lluvias fuertes, Mora y Vahrson (1984) sugirieron las diferentes clases en que debe dividirse cada factor y su correspondiente valor numérico.

a) Factor pendiente del terreno – FP.

El mapa de pendiente es derivado del Modelo Digital del Terreno (DTM, por sus siglas en inglés) el cual a su vez es la representación de las altitudes del terreno. Los valores de pendiente se agrupan en clases y a cada una de ellas se le asigna un "factor de peso relativo" tal y como se muestra en la Tabla 1. Aquellas zonas que tienen mayor valor de pendiente se les asigna un mayor factor de peso. El mapa correspondiente al Factor de Pendiente se muestra en la Figura 7.

Valor de la Pendiente	Clase	Factor
<12°	Muy baja	1
12° - 20°	Baja	2
20° - 28°	Moderada	3
28° - 40°	Alta	4
> 40°	Muy alta	5



Figura 7. Mapa de factor de pendiente del terreno. Factores altos (en colores rojos) corresponden a zonas con pendientes fuertes.

b) Factor litológico (geología) – FL.

Desafortunadamente, para la estimación del factor litológico no se tuvo disponibilidad de mapas geológicos a escala 1:50,000 para toda el área de interés. Como puede verse en la Figura 8, solamente se tiene información de las hojas geológicas San Juan Sacatepéquez, San José Pinula, Amatitlán y Guatemala elaborados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). El resto del área fue analizada con información geológica a escala 1:250,000 también obtenida del IGN.



Figura 8. Disponibilidad de información geológica a escala 1:50,000 en el área de estudio.

A cada unidad litológica presente en el área de estudio se le asignó un valor numérico (factor) basado en el tipo de roca, el grado de alteración o meteorización y susceptibilidad al deslizamiento similar a lo mostrado en la Tabla 2. El mapa resultante de Factor Litológico (geología) se muestra en la Figura 9.

Litología	Clase	Factor
Aluvión permeable, caliza permeable, intrusiones algo fracturadas, basaltos, ignimbritas, gneiss; bajo nivel de alteración, agua subterránea baja, fracturas limpias y rugosas, resistencia a cizalla	Baja	1
Mayor grado de alteración de las rocas, menor resistencia a la cizalla y fracturas deformables	Moderada	2
Rocas volcánicas, metamórficas, intrusivas y sedimentarias considerablemente alteradas, suelos residuales arenosos, mayor fracturamiento, agua subterránea fluctuante	Media	3
Rocas muy meteorizadas y alteradas, fuertemente fracturadas, rellenos de arcilla en las fracturas, piroclastos y suelos fluvio-lacustres pobremente compactados, agua subterránea superficial	Alta	4
Rocas extremadamente alteradas, coluviones y suelos residuales con baja resistencia a la cizalla, agua subterránea muy superficial	Muy Alta	5

Tabla 2. Clasificación del Factor Litológico

c) Factor humedad del suelo – FH.

Para el caso del factor de humedad del terreno se utilizaron los datos de balance hídrico estimados por personal de la División de Hidrología del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH, 2004). En dichas estimaciones se utilizaron datos diarios de lluvia y evapo-transpiración para el período comprendido entre 1982 y 2003. En forma general, el cálculo de balance hídrico puede ser considerado como el contenido de humedad natural del suelo ya que para su estimación se restan los valores diarios de evapo-transpiración a los valores diarios de precipitación pluvial. Para los propósitos del presente análisis se consideraron los valores <u>máximos</u> del período analizado. En la Figura 10 se muestra el mapa de factor de humedad del suelo.



Figura 9. Mapa de factor litológico (geología). Factores altos (en colores rojos) corresponden a rocas más susceptibles a deslizarse.

En el cálculo final, los mapas de factor (pendiente, litológico y humedad del suelo) son multiplicados entre sí para obtener el Mapa de Índice de Susceptibilidad ante deslizamientos (FP*FL*FH). Este mapa representa la susceptibilidad propia del terreno a deslizarse en función de las características topográficas del terreno (representadas por la pendiente), las propiedades litológicas de las rocas y el contenido de humedad natural en las mismas. El mapa de Índice de Susceptibilidad es mostrado en la Figura 11.



Figura 10. Mapa de factor de humedad del suelo. Factores altos (en colores rojos) corresponden a zonas con mayores contenidos de humedad.



Figura 11. Mapa de índice de susceptibilidad a deslizamientos. Factores altos (en colores rojos) corresponden a zonas con mayor susceptibilidad.

2.2 Factor de disparo: las lluvias fuertes – FD.

Luego de definido el Mapa de Índice de Susceptibilidad es momento de evaluar la influencia de la lluvia como factor desencadenante de posibles deslizamientos. Para dicha evaluación, Mora y Vahrson (1984) han asumido que los deslizamientos que superficiales suelos involucran depósitos 0 residuales son comúnmente producidos por precipitaciones de tipo convectivo de corta duración pero de gran intensidad. En forma simplificada, en el presente análisis se consideraron los datos de lluvias máximas mensuales entre el período 1982 y 2003 con las cuales se realizó una interpolación lineal para cubrir la totalidad del área de estudio. El mapa resultante se presenta en la Figura 12.

2.3 Zonas de amenaza relativa.

Luego de estimado el Índice de Susceptibilidad y el Factor de Disparo por lluvia fuerte se realiza la multiplicación de dichos mapas para la determinación del nivel de amenaza relativa. Los valores del Índice de Susceptibilidad pueden variar entre 1 y 125 unidades, este último valor siendo posible únicamente en el caso que el Factor de Pendiente del terreno, Factor Litológico y Factor de Humedad del suelo hubiesen tenido valores máximos de 5 (5 x 5 x 5 = 125). El máximo Índice de Susceptibilidad (Figura 11) obtenido en el área de estudio fue de 125. Debido a que el mapa de Índice de Susceptibilidad es multiplicado por el mapa de Factor de disparo por lluvias fuertes el máximo valor posible en el mapa final de amenaza relativa será de 625 unidades. En este caso, el máximo valor de amenaza obtenido fue de 600.



Figura 12. Mapa de Factor de disparo por lluvia fuerte. Factores altos (colores rojos) corresponden a zonas con mayor precipitación.

Basado en dicha calificación máxima, se definieron 4 diferentes niveles de amenaza por deslizamientos producidos por lluvias fuertes en la zona metropolitana de Guatemala. Para la definición de los límites de clases se realizó un análisis estadístico (histograma) separando las clases en los "quiebres naturales" de la curva. El mapa correspondiente a las zonas de amenaza relativa es mostrado en la Figura 13.



Figura 13. Mapa de Amenaza por Deslizamientos provocados por lluvias Fuertes en la zona metropolitana de Guatemala.

En la siguiente figura se muestra un flujograma que resume los diferentes pasos realizados para la estimación de la susceptibilidad a deslizamientos en la zona metropolitana de Guatemala utilizando la metodología de Mora y Vahrson (1984).



Figura 14. Flujograma de actividades para la estimación de susceptibilidad ante deslizamientos disparados por lluvias fuertes utilizando la metodología Mora y Vahrson (1984).

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Limitaciones en la aplicación de la metodología.

La metodología Mora y Vahrson (1984) es considerada una metodología de análisis semi-regional (en el artículo original se habla de "macrozonificación"). Es el tipo de metodología que permite tener una primera sobrevista de los posibles niveles de amenaza ante deslizamiento en una región determinada. Posterior a Mora-Vahrson, deberían ser aplicadas otras metodologías de análisis para obtener resultados de mayor detalle en las áreas de interés.

Para la aplicación de metodologías de análisis como la de Mora y Vahrson en Guatemala se cuenta con información digital de diferente calidad, escala y fecha. En el caso de la topografía, la información oficial más detallada a nivel nacional está a escala 1:50,000. La mayoría de estos mapas topográficos datan de la década de los años setenta por lo que no reflejan los cambios urbanísticos y paisajísticos de los últimos 30 años. Solamente una pequeña parte de la zona metropolitana cuenta con información oficial topográfica a escala 1:15,000. Fue hasta hace poco que la Municipalidad de Guatemala ha producido información topográfica a detalle (curvas de nivel a intervalos de 1 metro) como parte de la elaboración de las bases de datos catastrales.

En el caso de la información geológica, están disponibles a nivel nacional los mapas oficiales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:1,000,000. Obviamente, esta información no tiene el detalle

análisis suficiente para utilizarla en de susceptibilidad а deslizamientos. Al mismo tiempo, aunque no validada oficialmente, se cuenta con información geológica a escala 1:250,000 para todo el país la cual fue digitalizada y editada por el Laboratorio SIG del Ministerio de Agricultura. Solo una pequeña parte del país cuenta con información geológica a escala 1:50,000. Para el área metropolitana de Guatemala se utilizó una combinación entre información geológica 1:50,000 (la mayoría del área) complementada con información a escala 1:250,000 – ver Figura 8. En ambos casos, pero especialmente en la escala regional 1:250,000; el detalle de la información geológica no es el ideal ya que no se pueden incorporar estructuras o elementos geológicos con tamaño menor a 50 metros. Existen innumerable cantidad de estructuras o elementos geológicos menores de 50 metros que pueden contribuir a la ocurrencia de deslizamientos, entre los cuales se pueden mencionar: zonas de falla, zonas de fracturamiento, zonas de alteración, digues, chimeneas volcánicas, discontinuidades estratigráficas, entre otras.

Finalmente, la cobertura espacial de la red de estaciones meteorológicas no es uniforme en el país. La información de humedad del suelo y lluvias mensuales máximas para este análisis fue obtenido de un estudio de balance hídrico realizado por la División de Hidrología del INSIVUMEH con base a la información de alrededor de 30 estaciones en todo el país. Sin embargo, para la zona metropolitana solamente se tiene la estación INSIVUMEH dentro del listado de estaciones mencionadas por lo que fue necesario incorporar la información de otras estaciones aledañas para interpolar la información a lo interno del área de estudio. Entre las estaciones utilizadas se encuentra la de Sábana Grande en Escuintla, San Martín Jilotepeque en Chimaltenango, San Pedro Ayampuc en Guatemala y Los Esclavos en Santa Rosa. Se presume que la interpolación pudo haber generado resultados no del todo satisfactorios principalmente en la zona norte del área de estudio.

Por las limitaciones en la información de entrada se recomienda utilizar los resultados del presente análisis como información de referencia y no como resultados concluyentes a detalle.

Niveles de amenaza.

En general, como puede observarse en la Figura 13, los resultados del análisis sugieren que alrededor del <u>88% del área</u> metropolitana estaría catalogada como de <u>baja a moderada amenaza</u> ante deslizamientos. En contraste, el <u>10% del área</u> corresponde a la categoría de <u>alta amenaza</u> y el <u>2% del área</u> se ubica en zona de <u>muy alta amenaza</u>. Sin embargo, como ya se ha mencionado en el apartado anterior, las limitaciones de información geológica y meteorológica a detalle en la totalidad del área estudiada podrían estar sobreestimando el porcentaje de superficie catalogada como baja a moderada amenaza, es decir, mucha del área catalogada como moderada podría ser realmente de alta amenaza.

En el anexo de este reporte se presenta un listado de poblados que se ubican en cada una de estas zonas de moderada, alta y muy alta amenaza (basado en la información del Instituto Nacional de Estadística – INE del censo 2,002). <u>En general, la mayoría de</u>

33

poblados en alta y muy alta amenaza se ubican en la parte sur y <u>suroeste del área de estudio (Figura 15) totalizando 70 poblados y</u> alrededor de 82,716 habitantes. A pesar que Ciudad Peronia (12,040), El Exodo (4,490), Ciudad Real (4,177); todas ellas en el municipio de Villa Nueva; y Santa Inés Petapa (4292) en Petapa y San José El Tablón (4,237) en Villa Canales se constituyen en centros poblados con amenaza alta es de hacer notar que, seguramente, no toda la población se encuentra en ese nivel de amenaza. No es posible desmenuzar los resultados del análisis por área poblada ya que cada comunidad está representada únicamente por un punto y no por un polígono. Este análisis adicional podría realizarse utilizando la información catastral de cada de una las Municipalidades involucradas.

Se ha estimado que 646 poblados se encontrarían ubicados en zonas de moderada amenaza ante deslizamientos para un total de 823,420 habitantes (ver listado de poblados en Anexo).

Sistema de monitoreo de lluvias y alertamiento.

Los resultados obtenidos del análisis de susceptibilidad ante deslizamientos utilizando la metodología Mora y Vahrson sugieren que las zonas de mayor amenaza se encuentran ubicadas en el sector sur y sur-oeste del área metropolitana de Guatemala en la jurisdicción municipal de San Lucas Sacatepéquez, Villa Nueva, San Miguel Petapa y Villa Canales (ver Figura 15). Por lo tanto, se debería considerar la posibilidad de implementar la mayor cantidad de estaciones de monitoreo de lluvias en ese sector del área de estudio. Sin embargo, existe la posibilidad de que las extensas zonas de baja a moderada amenaza obtenidas en la parte central y norte del área metropolitana hayan sido sub-estimadas debido a la carencia de información meteorológica (lluvias) y falta de detalle en la información geológica en dicha área.



Figura 15. Mapa de poblados ubicados en zonas de moderada, alta y muy alta amenaza ante deslizamientos. Los puntos corresponden a la base de datos del INE (Censo 2,002).

4. CONCLUSIONES.

Basados en la metodología Mora y Vahrson (1984) y en la información topográfica, meteorológica y geológica utilizados en el presente análisis se concluye que el 88% del área analizada corresponde a la categoría de amenaza ante deslizamientos entre baja a moderada. Según datos demográficos del INE (Censo del 2002), en esa área vivirían alrededor de 823,420 personas distribuidas en 646 centros poblados. Como ya se discutió en la sección anterior, esta zonificación de baja y moderada amenaza pudiera estar sobre-estimada debido a la falta de información meteorológica y geológica a detalle. En términos de preparación ante desastres quizás sea conveniente poner atención a aquellas localidades ubicadas en los barrancos de los ríos Chinautla, El Zapote, Negro, Santa Rosita y Las Vacas.

Así mismo, el 10% del área analizada corresponde a la categoría de amenaza alta y el 2% corresponde a la categoría de muy alta amenaza. Estas zonas de alta y muy alta amenaza se ubican a lo largo de la zona sur y sur-occidental de la zona metropolitana en donde habitarían alrededor de 82,700 personas distribuidas en 70 centros poblados (ver Figuras 13, 15 y Anexos 1 y 2).

En los asentamientos que están siendo trabajados por la alianza Oxfam GB – ESFRA – ISMUGUA con el proyecto DIPECHO V se ha estimado que las pendientes del área de Tierra Nueva II son catalogadas como de moderada amenaza. Igualmente, en la zona de Las Joyas (La Verbena), el área de los barrancos se considera como de moderada amenaza ante deslizamientos provocados por lluvias fuertes. Por el contrario, las laderas y barrancos que bordean los asentamientos de Nuevo Amanecer y Areneras son catalogados como de moderada a alta amenaza. Adicionalmente, otros asentamientos y colonias en los alrededores de Nuevo

Amanecer aparecen en zonas de alta amenaza, entre ellos: Joya del Mezquital, 30 de enero, Eben Ezer, La Cuchilla, El Esfuerzo y Anexo Sur Villalobos II.

En cuanto al diseño e implementación de un sistema de monitoreo de lluvias y alertamiento ante deslizamientos se concluye que la mayor cantidad de estaciones de monitoreo deben ser ubicadas en la parte sur y sur-occidente del área metropolitana en jurisdicción de los municipios de Mixco (parte sur), San Lucas Sacatepéquez, Villa Nueva, San Miguel Petapa y Villa Canales (Figura 15). Sin embargo, también habrá que implementar estaciones de monitoreo en la parte norte y nor-oriente del área metropolitana en jurisdicción de los municipios de Chinautla, Guatemala (parte norte) y Santa Catarina Pinula (parte oriente).

Geopetrol S.A. concluye que es necesario realizar monitoreo de lluvias a nivel de las comunidades utilizando pluviómetros, a nivel municipal (alcaldías auxiliares y municipales o instituciones de socorro) utilizando estaciones meteorológicas básicas y a nivel metropolitano con estaciones meteorológicas en tiempo real (vía satélite). En este sentido, la ubicación de estaciones meteorológicas básicas en estaciones de bomberos puede ser de vital importancia para el sistema de monitoreo y alerta por la permanente vigilancia que estas instituciones mantienen en temporadas de lluvia.

En los mapas finales se ha incluido como referencia el inventario de deslizamientos del terremoto de 1976 con más de 1,800 deslizamientos individuales (Harp y colaboradores, 1976). La importancia de contar con esta información radica en el hecho que, la mayoría de las veces, los deslizamientos antiguos pueden ser reactivados durante eventos similares al que les dio origen o, en este caso, estos viejos deslizamientos también podrían ser reactivados por lluvias fuertes.

37

5. **RECOMENDACIONES**.

- Utilizar la información catastral detallada que maneja la Municipalidad de Guatemala para especificar aquellas comunidades o sectores ubicados en laderas de moderada a muy alta amenaza ante deslizamientos.
- Combinar los resultados del presente análisis con el inventario histórico de deslizamientos (provocados por lluvias y el de deslizamientos del terremoto de 1976) para afinar las zonas de alta y muy alta amenaza ante deslizamientos.
- Realizar recorridos de campo por aquellos barrancos que presentan los niveles más altos de amenaza para evaluar las condiciones de vulnerabilidad de las poblaciones ahí ubicadas.
- Considerar los tres niveles de monitoreo de lluvias (local, municipal y metropolitano) en el diseño e implementación del sistema de alertamiento ante deslizamientos.
- Ejecutar una campaña de divulgación de los resultados del presente análisis en las Municipalidades, instituciones de gobierno, ONG´s, organizaciones comunitarias y población en general

6. **REFERENCIAS**

- Cruden, D.M. and Varnes, D.J., Landslides Types and Processes in Turner, A.K and Schuster, R.L. (eds.), 1996, Landslides Investigation and Mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 672 p.
- Harp, E. L., Wilson, R.C. and Wieczorek, G.F., 1981, Landslides from the February 4, 1976, Guatemala Earthquake, Geological Survey Professional Paper 1204-A, United States Department of the Interior, Washington, D.C., 35 p.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN), Hojas Topográficas y Geológicas San Juan Sacatepéquez, Guatemala, San José Pinula y Amatitlán, escala 1:50,000

Instituto Nacional de Estadística (INE), 2002, Censo Poblacional.

- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, 2004, Atlas Climatológico de Guatemala, División de Hidrología.
- Mora C., S., and Vahrson, W.G., 1994, Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination: Association of Engineering Geologists Bulletin, Vol. XXXI, No. 1, pp. 49-58.
- World Meteorological Organization, 1999, Comprehensive Risk Assessment for Natural Hazards, 92 p.

7. ANEXOS

No. 1:

Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos en la Zona Metropolitana de Guatemala

No. 2:

Centros Poblados Ubicados en Zonas de Moderada, Alta y Muy Alta Amenaza ante Deslizamientos Provocados por Lluvias Fuertes (Archivos Excel).

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LADERAS – FACTOR DE ESTABILIDAD

Área Nuevo Amanecer, zona 21, Ciudad de Guatemala

1. PRESENTACIÓN

El análisis de amenaza ante deslizamientos disparados por lluvias fuertes, al igual que otras amenazas, puede ser realizado en forma secuencial iniciando con información a escala de poco detalle a escalas de mayor detalle. Así por ejemplo, la metodología desarrollada por Mora y Vahrson (1984), de amplia utilización en Centro América, se aplica para tener una primera idea de cómo se distribuyen las zonas susceptibles a deslizamientos a lo largo y ancho de cierta zona de interés a escalas 1:100,000 o 1:50,000.

En etapas posteriores, pueden aplicarse otras metodologías de análisis detallado en aquellas áreas en donde se detectan los mayores índices de susceptibilidad. Tal es el caso del cálculo del factor de estabilidad del terreno (*Safety Factor*). En tal sentido, se combinan diferentes parámetros topográficos, geológicos y geotécnicos para estimar índices numéricos que indican la estabilidad (valores mayores que 1) o inestabilidad del terreno (valores menores que 1). En el presente análisis, se estimaron los valores de estabilidad del terreno a lo largo de una sección topográfica de Nuevo Amanecer. Sin embargo, en recientes publicaciones se ha demostrado que este análisis también puede aplicarse a una superficie de terreno (Harp y colaboradores, 2006).

2. OBJETIVOS DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

El objetivo principal del presente análisis ha sido estimar los valores de factor de estabilidad a lo largo de una ladera de Nuevo Amanecer.

Durante el análisis, se modificó intencionalmente el grado de saturación del terreno (al variar la altura y morfología del agua subterránea) con el propósito de evaluar la sensitividad del cálculo ante los cambios bruscos en los niveles de agua subterránea. Además, se modificó también intencionalmente el relieve a lo largo de la ladera con el propósito de evaluar el cambio en valor de factor de estabilidad al disminuir la pendiente del terreno.

En ambos casos, los resultados del análisis permiten sugerir el tipo de medidas de mitigación que pueden ser implementadas en estos terrenos ya sea al evitar la infiltración y escorrentía de agua (que eleva los niveles de agua subterránea) o al modificar el paisaje del terreno (reconfiguración de la pendiente).

42

3. MARCO CONCEPTUAL DEL ANÁLISIS

En términos generales, el Factor de Estabilidad se calcula utilizando la siguiente ecuación:

 $\begin{array}{c|c} \underline{C'} & + & \underline{Tan \ \Phi} & \underline{m \ \gamma w \ Tan \ \Phi} & \underline{FUERZAS \ DE \ RESISTENCIA} \\ \gamma \ t \ Sin \alpha & Tan \ \alpha & \gamma \ Tan \ \alpha & FUERZAS \ PROMOTORAS \end{array}$

Donde:

C' = cohesión del material,

 γ = peso específico del material,

 γ_w = peso específico del agua,

 Φ = ángulo de fricción interna entre partículas,

 α = pendiente del terreno,

t = espesor esperado del bloque a deslizarse, y

m = contenido de humedad del material (grado de saturación).

Lo cual en términos prácticos significa que, en el numerador de la ecuación se suman todas las fuerza que evitan la ocurrencia de deslizamientos (resistencia), por ejemplo la cohesión, la fricción del material y el grado de saturación del terreno, mientras que en el denominador de la ecuación se suman todas las fuerzas que favorecen la ocurrencia de deslizamientos (promotoras), por ejemplo la pendiente, el espesor del material susceptible a deslizarse y la componente horizontal del peso del material. Matemáticamente, es entonces sencillo suponer los posibles valores de Factor de Estabilidad:

- Si la sumatoria de fuerzas de resistencia es igual a la sumatoria de las fuerzas promotoras el terreno estará en completo equilibrio (Factor de Estabilidad = 1),
- Si la sumatoria de fuerzas de resistencia es mayor que la sumatoria de fuerzas promotoras el terreno será relativamente estable (Factor de Estabilidad > 1), y
- Si la sumatoria de fuerzas de resistencia es menor que la sumatoria de fuerzas promotoras el terreno será relativamente inestable (Factor de Estabilidad < 1).

Esta lógica de análisis puede ser aplicada en un área de terreno basado en la ecuación anterior aplicándola en un análisis espacial con un Sistema de Información Geográfica (SIG) en el cual cada uno de los parámetros puede ser representado como un mapa.

4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El análisis de factor de estabilidad fue realizado a lo largo de una ladera en el asentamiento Nuevo Amanecer tal y como se muestra en la Figura 1.

Para la estimación de los valores de factor de estabilidad se utilizó la ecuación mostrada en la sección anterior. La ecuación es utilizada en un programa en lenguaje Fortran adaptado por Baum (2,000) a partir de la fórmula de Bishop (método conocido como Análisis de "*Slices*"). Con esta fórmula, la sección transversal es dividida en "tajadas" de ancho apropiado tal que su estabilidad pueda ser analizada como elementos separados (Figura 2).



Figura 1. Ubicación de la sección transversal de terreno (línea negra) evaluada en el asentamiento Nuevo Amanecer.

Para cada una de las tajadas se deben consideran los parámetros geotécnicos (cohesión, fricción y peso unitario) de la unidad geológica mayoritaria y también la posible configuración de las condiciones del agua subterránea. Para mayores detalles consultar la publicación de Rex Baum (2,000) – *Computer Programs for Limit Equilibrium Slope-Stability Análisis: FelleniusGS, Bishop GS, and JanbuGS*.



Figura 2. Sección transversal (A) y diagrama de "cuerpo libre" (B) mostrando las "coordenadas" de referencia y las fuerzas involucradas para cada tajada de la ecuación de Bishop (tomado de Baum, 2000).

Como puede verse en la Figura 3, se desarrolló un modelo teórico del terreno con la línea de relieve obtenida del mapa topográfico del IGN escala 1:15,000 (Hoja 4 – Ciudad de Guatemala), dos unidades geológicas obtenidas del mapa geológico del IGN escala 1:50,000 (Hoja Ciudad de Guatemala) y una configuración de agua subterránea hipotética siguiendo el principio de que "el agua subterránea adopta una configuración aproximadamente similar al relieve del terreno". Esto último se tuvo que asumir a falta de información hidro-geológica real.



Figura 3. Modelo teórico del terreno mostrando relieve (línea negra inclinada continua), unidades geológicas (superior e inferior) y tres escenarios de agua subterránea (líneas celestes discontinuas). En el eje "X" se representan distancias horizontales según el mapa topográfico mientras que en el eje "Y" las altitudes sobre el nivel del mar. Se aplicó entonces el programa de Baum (2,000) para analizar la estabilidad de la ladera en tres posibles escenarios (Figura 3):

- Configuración real del terreno seco (lo que se esperaría durante el verano y durante las primeras semanas del verano): nivel de agua subterránea más bajo,
- Configuración real del terreno semi-saturado (lo que se esperaría durante los primeros dos o tres meses del invierno): con un nivel de agua subterránea más elevado, y
- Configuración real del terreno saturado (lo que se podría esperar a partir del tercer o cuarto mes del invierno): con el nivel de agua subterránea en su punto más alto.

Posteriormente, se desarrolló un modelo de terreno "modificado" (Figura 4) en el cual se idealiza un relieve menos abrupto (menos pendiente) pero manteniendo la lógica de los tres posibles niveles de agua subterránea (terreno seco, semi-saturado y saturado). Este análisis se realizó con el objeto de evaluar el cambio en los valores de Factor de Estabilidad si tuviéramos un terreno con menor pendiente.

En la tabla 1 se muestran las características de las unidades geológicas y los parámetros geotécnicos utilizados para la corrida del análisis.



- Figura 4. Modelo teórico del terreno mostrando relieve "modificado", unidades geológicas y tres escenarios de agua subterránea.
 - Tabla 1

Unidad geológica superior: Tefra, pómez gris a blanco y ceniza gris a negra intercalados con paleosuelos

Parámetros geotécnicos *			
Cohesión	Fricción	Peso Unitario	Peso Unitario
		Seco	Saturado
13	23	15	21

Unidad geológica inferior:

Tefra intercalada con bolsones de pómez y sedimentos de ríos y lagos

Parámetros geotécnicos *			
Cohesión	Fricción	Peso Unitario	Peso Unitario
		Seco	Saturado
17	25	19	25

En ambos casos, se utilizaron parámetros geotécnicos obtenidos de referencias bibliográficas para unidades geológicas similares.

5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Limitaciones en la aplicación de la metodología

Como ya se mencionó anteriormente, la gran limitante en la aplicación de esta metodología fue la disponibilidad de datos reales del terreno analizado.

En primer lugar, la configuración del relieve ha sido obtenida de un mapa topográfico elaborado por la Agencia de Cartografía de Defensa y el Centro de Hidrografía y Topografía de los Estados Unidos en 1985. Por lo tanto, es fácil imaginar que la configuración actual, 22 años después, ya no es la misma. A eso habrá que agregarle que, la forma en que estos asentamientos urbanos se desarrollan es a través del movimiento del terreno derivado del corte de la ladera para la formación de las terrazas en donde se construyen las viviendas. De tal modo entonces que la inestabilidad provocada por esta práctica antropogénica no ha sido posible incorporarla en el análisis.

Adicionalmente, la información hidro-geológica necesaria para delinear la configuración del agua subterránea no está disponible para el área analizada (información de pozos mecánicos por ejemplo) así como tampoco hay disponibilidad de información geotécnica (cohesión, fricción y peso unitario) derivada de pruebas de laboratorio a las unidades geológicas presentes.

Ante tal situación, hay que hacer notar que los resultados del análisis no son completamente concluyentes por lo que, a juicio del equipo consultor, habrá que considerarlos como preliminares y de referencia. Esto último significa que posiblemente los resultados sean bastante conservadores y que quizás los niveles de inestabilidad del terreno sean mayores.

Niveles de estabilidad en las laderas evaluadas

Al analizar el terreno con su configuración topográfica "actual" en condiciones de agua subterránea a bajo nivel (terreno seco) se obtuvo un valor de Factor de Estabilidad de 3.47 lo cual significa que el terreno durante los meses de verano y principios del invierno es bastante estable. Igualmente, para condiciones de parcial saturación (principios de invierno) todavía se obtiene un valor de Factor de Estabilidad que denota terreno estable (2.24). Por el contrario, al analizar el terreno en condiciones de alta saturación se obtuvo un Factor de Estabilidad de 1.02 lo cual en teoría significa todavía condición de terreno estable pero, a juicio del equipo consultor, es más conveniente referirlo como "marginalmente estable".

Al analizar el terreno con una configuración topográfica "modificada" (menor pendiente) se calcularon condiciones estables en los tres escenarios de agua subterránea: terreno seco FE = 4.21; terreno semi-saturado FE = 3.28 y terreno saturado FE = 1.64.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos del análisis.

Tabla	a 2
-------	-----

Configuración actual del terreno			
(Figura 3)			
Factor de Estabilidad			
Terreno Seco	Semi-saturado	Saturado	
3.47	2.24	1.02	

Configuración "modificada" del terreno			
(Figura 4)			
Factor de Estabilidad			
Terreno Seco	Semi-saturado	Saturado	
4.21	3.28	1.64	

6. CONCLUSIONES.

- En condiciones de terreno con relieve "actual" se observa que solamente en el caso de terreno saturado se obtiene un valor de estabilidad "marginalmente estable". Si a esto añadimos el hecho que, a falta de datos hidro-geológicos y geotécnicos reales, se considera haber sub-estimado los valores de estabilidad habrá que concluir que a partir que el terreno se encuentra semi-saturado (posiblemente a partir de julio) las condiciones de inestabilidad empiezan a aumentar.
- Si se tuviera un terreno con un relieve menos abrupto (menos pendiente), como el mostrado en la Figura 4, ni siquiera el nivel de agua subterránea más alto (terreno saturado) sería capaz de provocar inestabilidad de la ladera.
- El análisis de los dos diferentes escenarios nos muestra que las medidas de mitigación más efectivas, aunque quizás las más costosas, serían las que permitieran re-configurar el relieve del terreno disminuyéndole la pendiente (movimiento de material). Estas medidas son imposibles de aplicar ya que la ladera se encuentra poblada lo cual impide cualquier actividad de movimiento de tierras.
- Alternativamente, ante la imposibilidad de re-configurar el relieve del terreno habrá que pensar en medidas de mitigación que regulen la escorrentía y la infiltración del agua de lluvia al sistema hidro-geológico para evitar el ascenso del nivel de agua subterránea (por ejemplo, canalización lateral de las aguas de lluvia en las partes altas del asentamiento, canalización de las aguas de lluvia a lo largo de la ladera y pavimentación de calles).

7. RECOMENDACIONES.

- Implementar medidas de mitigación que eviten al máximo la infiltración del agua de lluvia en el sistema hidro-geológico para evitar el ascenso de los niveles de agua subterránea.
- Implementar puntos de monitoreo de los niveles de agua subterránea en pozos artesanales dentro del asentamiento (si los hubiera) o en las colonias vecinas para correlacionar la ocurrencia de posibles deslizamientos.

8. **REFERENCIAS**

- Baum, R.L., 2000, Computer Programs for Limit-Equilibrium Slope-Stability Analysis: FelleniusGS, Bishop GS, and JanbuGS, U.S. Geological Survey Open-File Report 00-107, United States Department of the Interior, Washington, D.C., 23 p.
- Harp, E. L., Michael, A.J., and Laprade, W.T., 2006, Shallow-landslide susceptibility map of Seattle, Washington, U.S. Geological Survey Open File Report 2006-1139, United States Department of the Interior, Washington, D.C., 2 plates.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN), Hojas Topográficas y Geológicas San Juan Sacatepéquez, Guatemala, San José Pinula y Amatitlán, escala 1:50,000
- Mora C., S., and Vahrson, W.G., 1984, Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination: Association of Engineering Geologists Bulletin, Vol. XXXI, No. 1, pp. 49-58.

INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS PROVOCADOS POR LLUVIAS Y ANÁLISIS DE LLUVIAS HISTÓRICAS EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA, CENTRO AMÉRICA

1. PRESENTACIÓN

La caracterización de un deslizamiento en particular debería incluir, entre otras cosas, la identificación del tipo predominante de movimiento que lo ocasionó, la (s) unidad (es) litológica (s) involucradas en el movimiento, la toma de muestras para análisis de laboratorio, la definición de la geometría del mismo (ancho, largo, espesor) y, dependiendo del contexto, quizás la realización de varias perforaciones exploratorias a lo largo y ancho de la masa desplazada. La "radiografía" del deslizamiento nos permite entonces el diseño de las medidas de estabilización o mitigación de movimientos futuros.

A escala más regional, el estudio del historial de deslizamientos en un área determinada nos permite conocer los niveles de susceptibilidad del terreno, quizás la periodicidad de ocurrencia del fenómeno, su correlación con los "disparadores" del movimiento (lluvias fuertes o sismos) y los tipos de movimiento más comunes en el área. En tal sentido, la creación de un inventario de deslizamientos históricos para cada región susceptible debería ser el punto de partida para el conocimiento y diagnóstico de la amenaza como tal. Actualmente, diversos autores reconocen la importancia de contar con inventarios de deslizamientos y proponen diferentes metodologías para su preparación (Wieczoreck, 1984; entre otros). Por otro lado, la correlación de cada uno de los deslizamientos históricos con los niveles de lluvia acumulada en los días previos y en la fecha de ocurrencia permite estimar los posibles "umbrales de disparo".

presente estudio preparó un inventario En el se de deslizamientos históricos disparados por lluvias torrenciales en la zona metropolitana de Guatemala. Complementariamente, se realizó un análisis de lluvias históricas de la misma zona para los últimos 17 años con énfasis en los inviernos de los años 2005, 2006 y 2007. Los resultados obtenidos constituyen la base de los protocolos de alertamiento y evacuación que serán implementados en los asentamientos urbanos del proyecto DIPECHO y que a su vez servirán como referencia para el resto de comunidades ubicadas en zonas de alto riesgo.

2. OBJETIVO DE TRABAJO

El objetivo principal del presente estudio ha sido estimar los "umbrales de disparo" de deslizamientos disparados por lluvias fuertes en la zona metropolitana de Guatemala basados en la elaboración de un inventario de deslizamientos y el análisis de lluvias históricas.

56

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 Inventario de deslizamientos.

Al iniciar la elaboración del inventario de deslizamientos se pensó que la herramienta idónea sería la colección de fotografías aéreas de alta resolución que fueron levantadas en toda la República en el 2,006. Se digitalizarían los deslizamientos observables, incluso diferenciando la línea de escarpe y el polígono de zona de iniciación y masa desplazada, para la creación de una base de datos en formato SIG. El laboratorio SIG del Ministerio de Agricultura proporcionó las orto-fotografías correspondientes al área metropolitana en calidad de donación por la naturaleza y objetivos del proyecto DIPECHO.

Sin embargo, considerando que uno de los datos críticos para cada deslizamiento es la fecha de ocurrencia del mismo se decidió consultar los archivos históricos de la Dirección General de Caminos (DCG), específicamente la División de Mantenimiento y COVIAL, aunque ello implica que se tuvieran únicamente eventos históricos que hayan afectado carreteras y caminos en la zona metropolitana de Guatemala. Las orto-fotografías sirvieron entonces como un elemento de referencia geográfica para la ubicación de los eventos históricos. También se tuvo acceso a informes técnicos de deslizamientos recientes en la Gerencia de Riesgo de la Secretaría Ejecutiva de CONRED y en la Sección de Geología del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). Adicionalmente, se tuvo acceso a la base de datos de deslizamientos históricos del INSIVUMEH titulada "100 años de deslizamientos en Guatemala" (Figura 1).





La información histórica recolectada fue vaciada a una tabla de datos consignando el lugar y fecha de ocurrencia, coordenadas, descripción del evento y comentarios adicionales. <u>Desafortunadamente, los datos de la DGC-COVIAL no consignan la</u> <u>fecha exacta de ocurrencia del evento sino más bien la fecha de inicio</u> <u>de actividades de limpieza y rehabilitación de la carretera</u>. De cualquier forma, se mantuvieron estos registros históricos por ser los únicos que se tienen disponibles para fechas recientes.

3.2 Análisis de lluvias históricas.

Se utilizó la información de la estación meteorológica ubicada en la sede central del INSIVUMEH para el período entre 1,990 y 2,007. Se consideró tanto el valor de lluvia acumulada mensual como lluvia diaria para los meses de invierno entre mayo y octubre de cada año.

La información disponible se graficó en forma compilada (todos los inviernos con datos totales mensuales) y en forma individual (todos los días de cada uno de los meses de invierno del período). Para la correlación con deslizamientos históricos únicamente se utilizó la información de los inviernos del 2005, 2006 y 2007.

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Limitaciones en la aplicación de la metodología

Desafortunadamente, no ha habido un esfuerzo institucional sistemático y ordenado para mantener actualizado el registro de los deslizamientos ocurridos en la zona metropolitana de Guatemala. Individualmente, se recuerdan los grandes deslizamientos que han afectado el acceso a la Central de Mayoreo, o a lo largo de la carretera a El Salvador, o los muchos que han afectado la Calzada La Paz. Ha sido solamente a partir del año 2,005 que se tiene un registro de informes técnicos, de situación o de limpieza de carreteras que permiten ir construyendo la memoria histórica de la ocurrencia de deslizamientos a nivel metropolitano. Por lo tanto, los registros históricos disponibles no llenan las condiciones <u>ideales</u> para servir como base para la elaboración de una base de datos geotécnica y de aplicación general. Entre los aspectos más relevantes podemos mencionar:

- La principal fuente de información de la base de datos histórica del INSIVUMEH es del tipo periodístico a través de recortes de prensa y la Hemeroteca Nacional. Por lo tanto, la ubicación y fecha de ocurrencia de cada evento no es del todo confiable;
- La información del archivo histórico de la DGC-COVIAL está enfocada a deslizamientos ocurridos a lo largo o en los alrededores de las principales carreteras y caminos de la zona metropolitana. Adicionalmente, no se incluye la fecha exacta de ocurrencia de cada evento sino más bien la fecha de inicio de los trabajos de limpieza y rehabilitación de las vías de comunicación;
- A partir del año 2,005 ya empiezan a conservarse registros de deslizamientos evaluados por personal de las instituciones relacionadas con la atención de desastres (SE-CONRED e INSIVUMEH) principalmente aquellos que han afectado comunidades vulnerables.

El equipo consultor se ha visto en la necesidad de trabajar con la información disponible ya que la validación y depuración de la información en campo o la búsqueda de información adicional en otras fuentes de información requiere un mayor tiempo de trabajo e inversión de recursos humanos y financieros.

60

Historial de deslizamientos disparados por lluvias fuertes.

Al final de la compilación e investigación histórica, se tienen tres fuentes diferentes de información:

- a) inventario histórico del INSIVUMEH (período 1918 1998),
- b) inventario reciente de la DCG-COVIAL (2005 2007), y
- c) archivo técnico reciente de la SE-CONRED e INSIVUMEH (a partir del 2001).

La ubicación de los 210 eventos históricos compilados de dichas fuentes se muestra en la Figura 2.

Basado en análisis con Sistemas de Información Geográfica, fue posible obtener información adicional que puede servir de base para la caracterización de sitios susceptibles a deslizamientos o para la formulación de planes de ordenamiento territorial. Dicha información se enumera a continuación:

- La mayoría de los deslizamientos históricos (80%) han ocurrido en laderas con pendientes entre los 12 y 35 grados;
- La mayoría de los deslizamientos históricos han ocurrido en unidades litológicas de tetras con pómez y pómez con aluviones, sedimentos y suelos; y
- La mayoría de los deslizamientos históricos han ocurrido entre los meses de agosto y octubre.

Inventario de Deslizamientos Históricos Zona Metropolitana de Guatemala 2,005 - 2,007



Figura 2. Ubicación de deslizamientos históricos en la zona metropolitana de Guatemala.

Análisis de lluvias históricas.

Al observar los datos de lluvia entre los meses de mayo a octubre en el período de 1990 a 2006 (Figura 3) sobresalen los altos valores de precipitación en el mes de junio seguido de una disminución en julio y un segundo período lluvioso que inicia en agosto y alcanza sus máximos valores en septiembre (hasta 375 milímetros).



Figura 3. Gráfico de lluvias acumuladas mensuales en milímetros (mayo a octubre) para el período 1990 – 2006. La línea roja discontinua es una aproximación de la tendencia general.

Complementariamente, al graficar la lluvia diaria entre los meses de mayo a octubre de los últimos tres inviernos (2005 – 2007) se evidencia aproximadamente el mismo comportamiento de lluvias fuertes entre mayo- junio y agosto – octubre (Figuras 4 y 5).

En estas gráficas se han incluido los deslizamientos catastróficos de los últimos inviernos (puntos rojos) dando énfasis a los eventos que se han presentado en forma de "enjambres" y de los cuales se conoce su ubicación y fecha de ocurrencia exacta. Adicionalmente, para cada deslizamiento, se han incluido los valores de lluvia acumulada en milímetros de los cinco días previos a la ocurrencia y el valor de lluvia del propio día de ocurrencia (47.1/40.8 por ejemplo).

Al observar la gráfica del invierno 2005 (Figura 4), se observa que, a pesar que los máximos niveles lluviosos se alcanzaron en julio, los deslizamientos catastróficos ocurrieron hacia finales de septiembre y principios de octubre. Para estos deslizamientos se tuvieron lluvias acumuladas de los cinco días previos entre 47.1 y 63.4 milímetros y lluvia de 25.0 y 40.8 milímetros el día de la ocurrencia. Asumiendo que la lluvia caída el día de la ocurrencia se pueda considerar como el "umbral de disparo", se puede observar que se necesita menor cantidad de lluvia de disparo cuando se tienen mayores valores de lluvia acumulada (63.4/25.0 versus 47.1/40.8).

Igual tendencia se observa en la gráfica del invierno 2006 (Figura 5) en donde la mayoría de deslizamientos ocurren durante septiembre y octubre aunque las mayores lluvias se registraron entre finales de mayo y junio.

64



Figura 4. Gráfico de lluvias diarias (milímetros) y deslizamientos entre mayo a octubre del 2005. Los números indican el acumulado de cinco días previos y del día de ocurrencia del deslizamiento.

El invierno 2007 parece haber mostrado un comportamiento diferente (Figura 5). La distribución de lluvia diaria luce más homogénea lo cual seguramente influyó en que los deslizamientos sucedieron indistintamente a lo largo del invierno. La relación entre la cantidad de lluvia acumulada en los cinco días previos y el día de cada ocurrencia se mantiene similar a los inviernos 2005 y 2006 ya que a mayor cantidad de lluvia previa acumulada menor lluvia de disparo necesaria para las ocurrencias. Entre estos deslizamientos se encuentran los ocurridos Verbena en La V el catastrófico deslizamiento – flujo de lodo en la colonia El Edén, zona 5 (Tabla 1).



Lluvia Acumulada Diaria Invierno 2006=Estación INSIVUMEH

Días Totales Invierno (Mayo - Octubre)



Lluvia Acumulada Diaria Invierno 2007=Estación INSIVUMEH

Figura 5. Gráfico de lluvias diarias (milímetros) y deslizamientos entre mayo a octubre del 2006 (arriba) y 2007 (abajo).

Tabla 1

Deslizamientos utilizados en la determinación de umbrales de disparo (Gráficas en Figuras 5 y 6)

Fecha de	Lugar	Lluvia acumulada	Lluvia de
Ocurrencia		(5 días previos)	disparo
30 sept. 2005	Jocotales – San Pedro	63.4 mm	25.0 mm
	Ayampuc		
05 oct. 2005	Carretera a El Salvador	47.1	40.8
28 jun. 2006	Guatemala – San Pedro	150.2	0.9
	Ayampuc		
20 sept. 2006	Jocotales	59.2	8.7
22 sept. 2006	Sta. Catarina Pinula		
22 sept. 2006	Km. 22.5, carretera a El	82.6	5.4
	Salvador		
22 oct. 2006	La Cuchilla	62.2	1.2
25 oct. 2006		78.5	2.6
06 jun. 2007		52.0	45.9
24 jun. 2007		7.5	14.4
09 sept. 2007	La Verbena, zona 7	66.6	19.7
21 sept. 2007	El Edén, zona 5	11.6	26.1

5. CONCLUSIONES.

 Aparentemente, los inviernos en la zona metropolitana de Guatemala muestran claramente la primera fase lluviosa entre mayo y junio seguido de un corto período de poca lluvia (canícula?) en julio y nuevamente un repunte en la cantidad de lluvia entre agosto y octubre. Cuando se muestra esta tendencia los deslizamientos tienden a suceder en la fase tardía del invierno (agosto a octubre). Cuando se tienen inviernos con distribución de lluvia homogénea, como el recién concluido invierno 2007, los deslizamientos parecen ocurrir indistintamente a lo largo de todo el período lluvioso.

- Luego de analizar la lluvia previa acumulada y la lluvia del día de ocurrencia de cada deslizamiento se concluye que cuando se tienen lluvias fuertes en al menos dos días seguidos aumentan las probabilidades de deslizamientos catastróficos. En general, pareciera que al rebasar los 60 a 70 milímetros acumulados solamente se necesita lluvia continua de 30 minutos para disparar deslizamientos y flujos de lodo.
- Por el contrario, cuando los valores acumulados son bajos, se necesitan lluvias de disparo de al menos 45 minutos para provocar eventos catastróficos.
- No se logró determinar valores de lluvia acumulada y umbrales de disparo en situaciones de impacto de tormentas tropicales o huracanes.

6. **RECOMENDACIONES**.

Con miras a la implementación del sistema de monitoreo de lluvias y alertamiento ante posibles deslizamientos se sugiere utilizar las combinaciones mostradas en la sección anterior de conclusiones:

- Cuando se rebasan los 60 a 70 milímetros de lluvia acumulada en dos o tres días el umbral de disparo al día siguiente será entre 10 a 15 milímetros o entre 30 a 40 minutos de lluvia intensa continua.
- Cuando se tienen valores "normales" de lluvia acumulada el umbral de disparo aumenta a entre 45 a 60 minutos de lluvia intensa continua.

7. **REFERENCIAS**

Wieczorek, G.F., 1984, Preparing a Detailed Landslide-Inventory Map for Hazard Evaluation and Reduction: Association of Engineering Geologists Bulletin, vol. XXI, No. 3, pp. 337-342.

Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos Zona Metropolitana Guatemala, Centro América



Para consulta detallada de los criterios de análisis y parámetros de entrada consultar el informe final y mapas complementarios.



