

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 sensibilidad 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).

3. MARCO CONCEPTUAL DEL ANÁLISIS

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

$$\frac{C'}{\gamma t \sin \alpha} + \frac{\tan \Phi}{\tan \alpha} - \frac{m \gamma_w \tan \Phi}{\gamma \tan \alpha} \quad \frac{\text{FUERZAS DE RESISTENCIA}}{\text{FUERZAS PROMOTORAS}}$$

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.

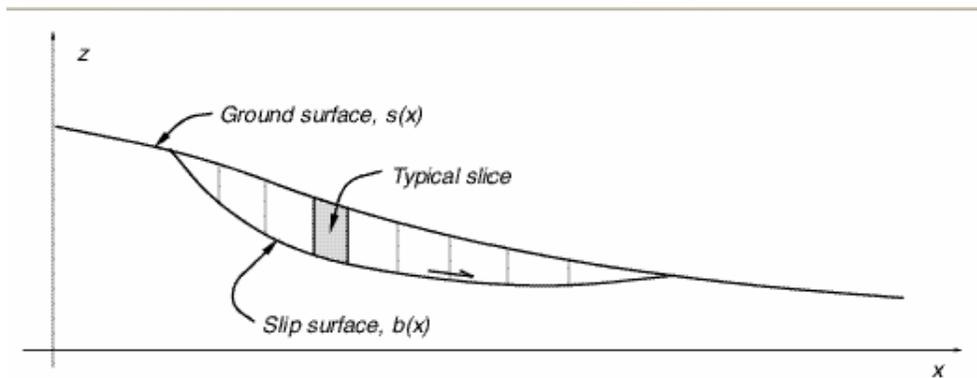
Para la estimación de los valores de factor de estabilidad se utilizó la ecuación mostrada en la sección anterior. La ecuación es utilizada en un programa en lenguaje Fortran adaptado por Baum (2,000) a partir de la fórmula de Bishop (método conocido como

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).

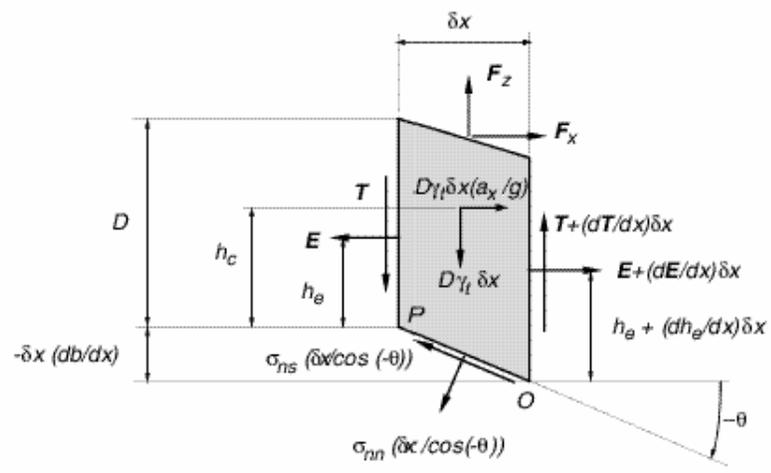


Figura 1. Ubicación de la sección transversal de terreno (línea negra) evaluada en el asentamiento Nuevo Amanecer.

Para cada una de las tajadas se deben considerar 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*.



A



B

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.

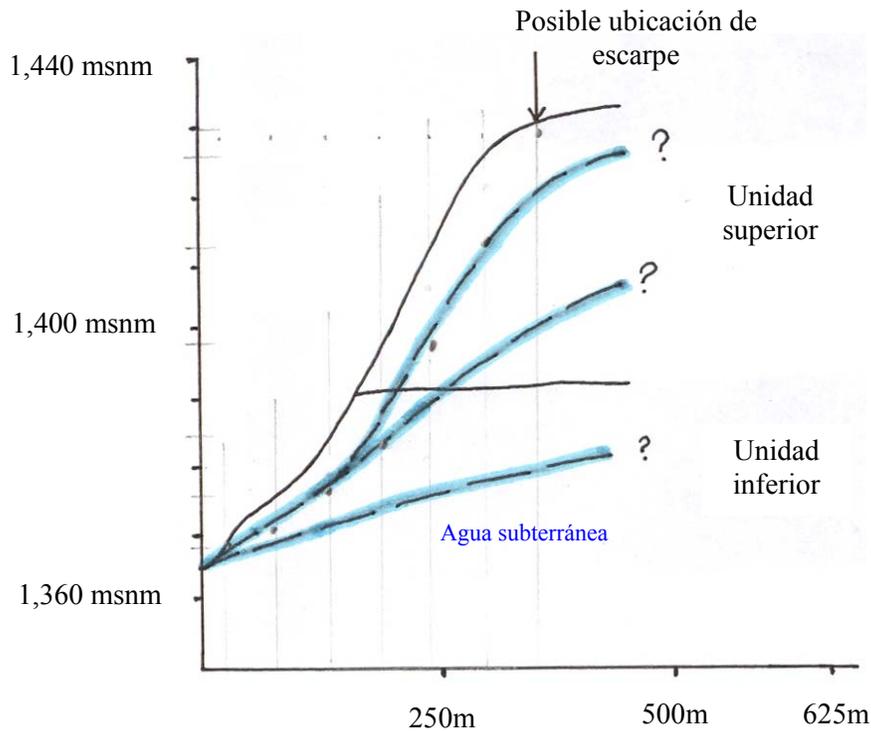


Figura 3. Modelo teórico del terreno mostrando relieve (línea negra inclinada continua), unidades geológicas (superior e inferior) y tres escenarios de agua subterránea (líneas celestes discontinuas).

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.

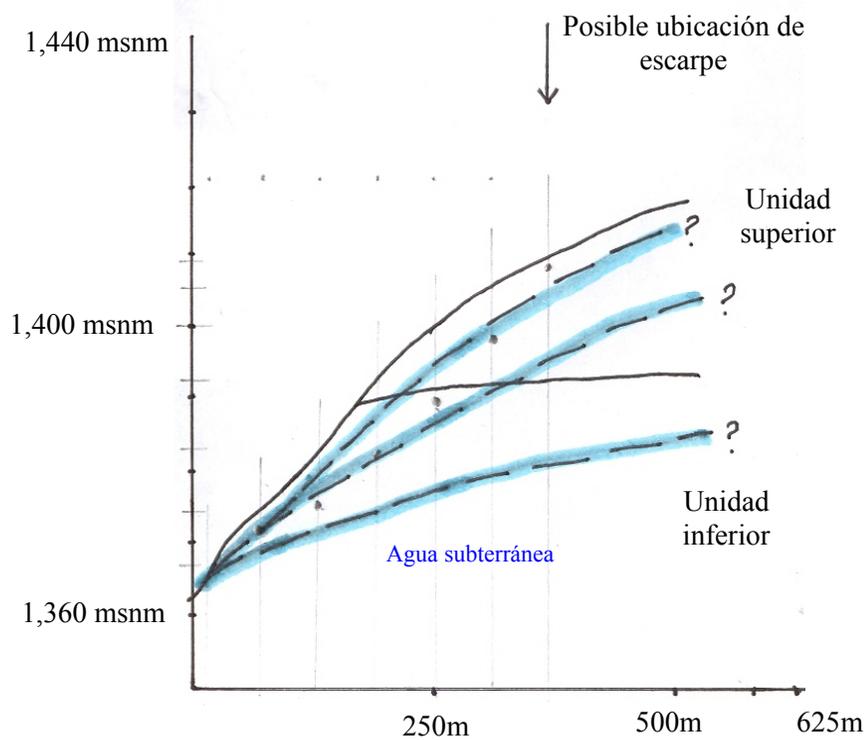


Figura 4. Modelo teórico del terreno mostrando relieve “modificado”, unidades geológicas y tres escenarios de agua subterránea.

Tabla 1

Unidad geológica superior:

Tefra, pómez gris a blanco y ceniza gris a negra intercalados con paleosuelos

Parámetros geotécnicos *			
Cohesión	Fricción	Peso Unitario Seco	Peso Unitario 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 Seco	Peso Unitario 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 "marginamente 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 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 "marginamente 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”.

En el presente estudio se preparó un inventario 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.

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).

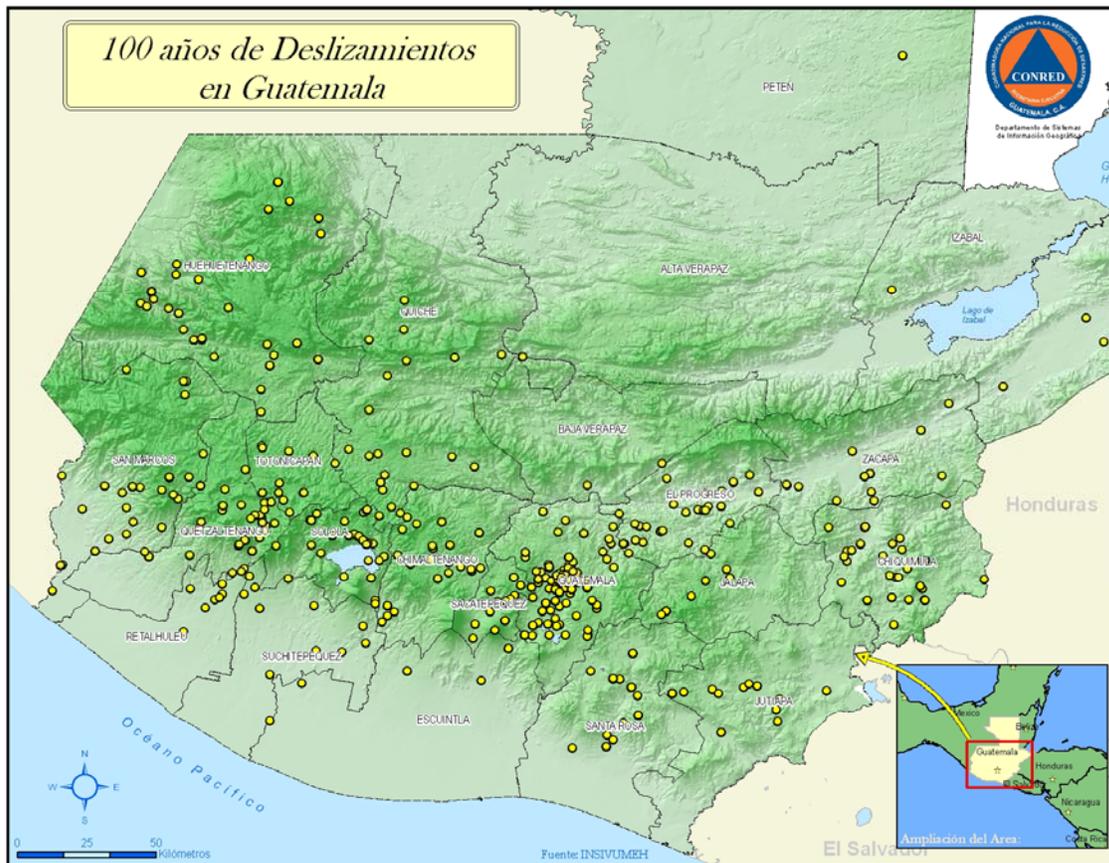


Figura 1. Mapa de la base de datos de deslizamientos históricos del INSIVUMEH (período 1918 – 1998). Cortesía del laboratorio SIG de la SE-CONRED.

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. Desafortunadamente, los datos de la DGC-COVIAT no consignan la fecha exacta de ocurrencia del evento sino más bien la fecha de inicio de actividades de limpieza y rehabilitación de la carretera. 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 ideales 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.

- **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

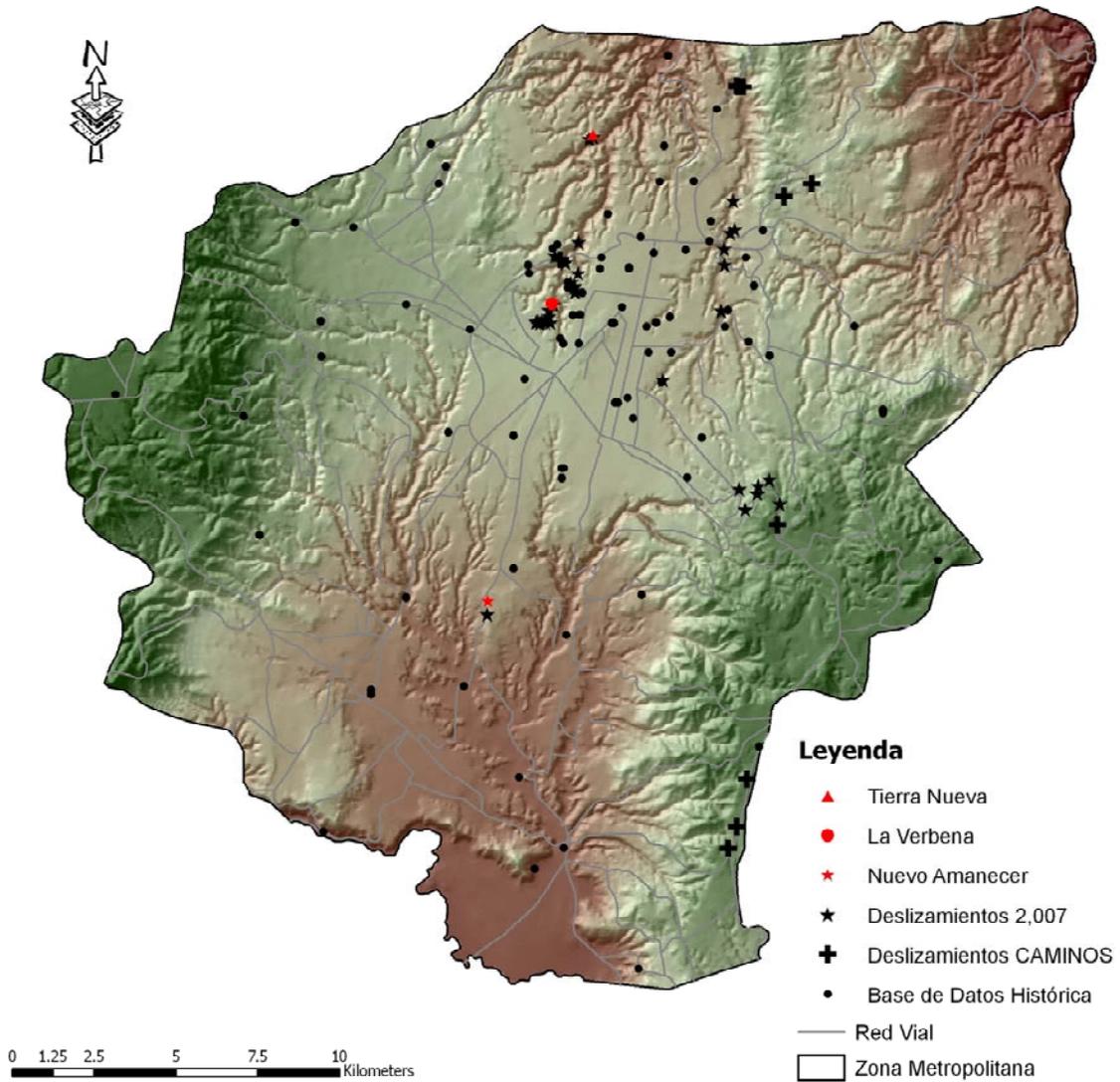


Figura 2. Ubicación de deslizamientos históricos en la zona metropolitana de Guatemala.

- **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).

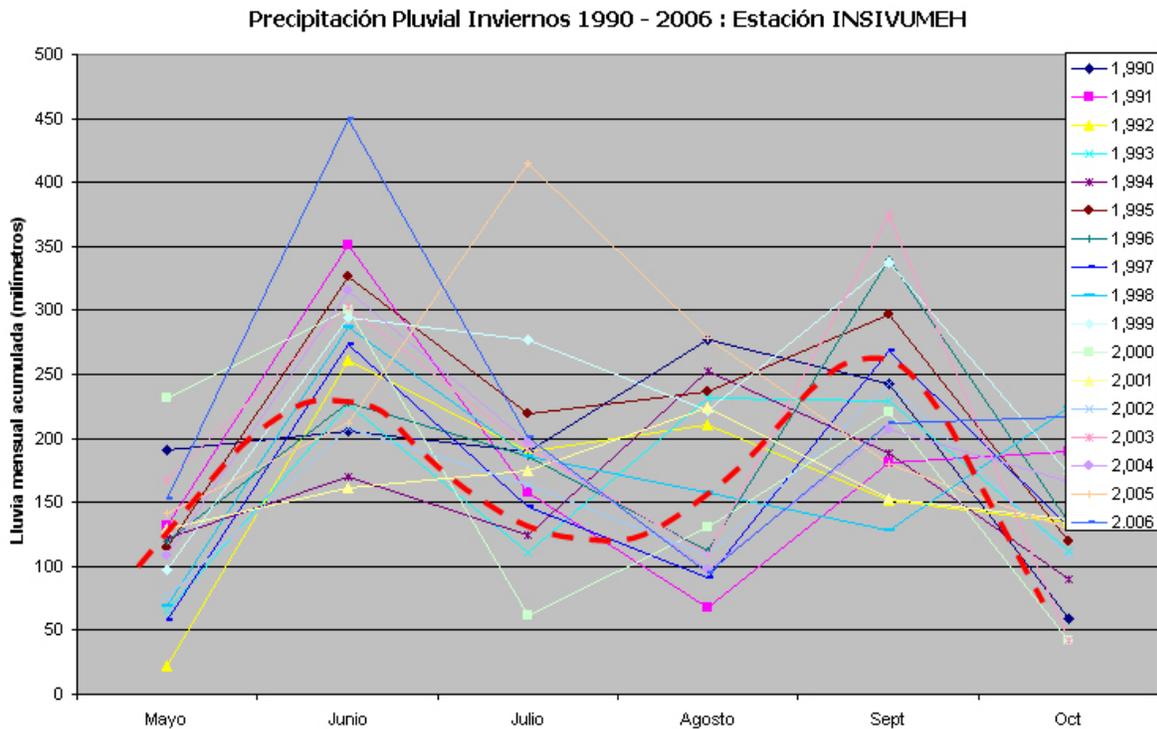


Figura 3. Gráfico de lluvias acumuladas mensuales en milímetros (mayo a octubre) para el período 1990 – 2006. La línea roja discontinua es una aproximación de la tendencia general.

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.

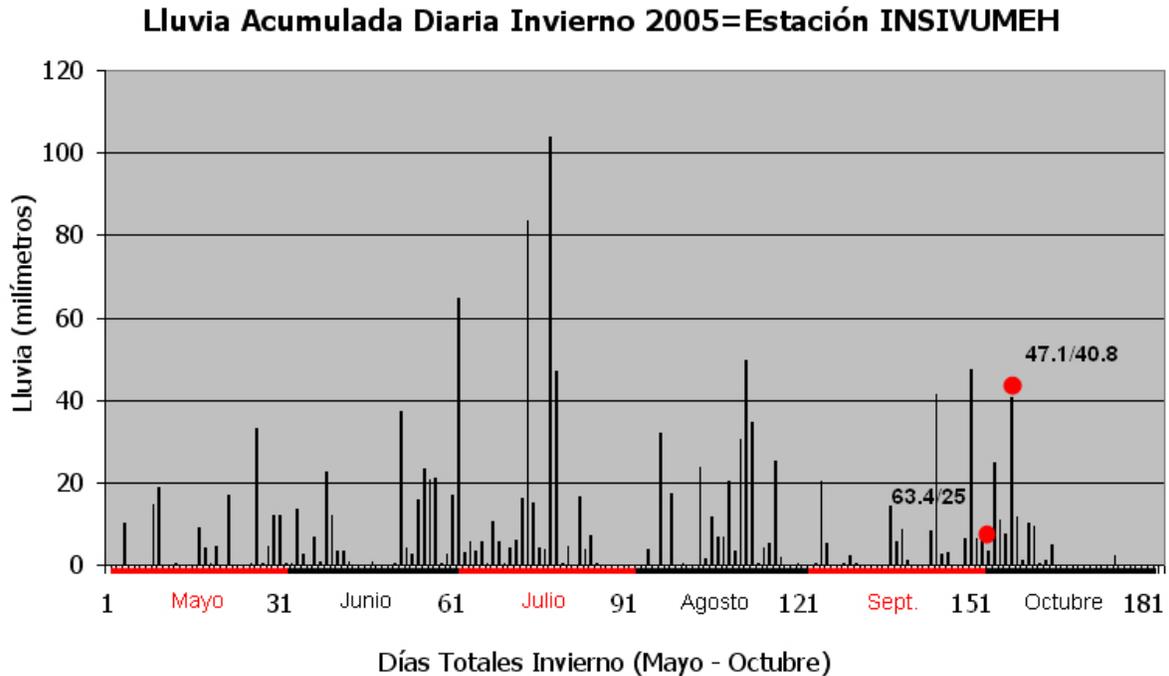


Figura 4. Gráfico de lluvias diarias (milímetros) y deslizamientos entre mayo a octubre del 2005. Los números indican el acumulado de cinco días previos y del día de ocurrencia del deslizamiento.

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 en La Verbena y el catastrófico deslizamiento – flujo de lodo en la colonia El Edén, zona 5 (Tabla 1).