

"Historia y ocurrencia de los deslizamientos generados por lluvia en Guatemala, Centro América"



Autor:

Edy Manolo Barillas

Bajo el auspicio del Programa de Intercambio Científico para Centro América y el Caribe de la Fundación Fullbright; embarillas@gmail.com

Con la asesoría y dirección de Jeff Coe, U.S. Geological Survey, Central Geologic Hazards Team, Golden, Colorado, 80401, jco@usgs.gov

La presente investigación fue realizada gracias al financiamiento de la Fundación Fullbright a través del Programa de Intercambio Científico para Centro América y el Caribe; con el apoyo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) a través del Centro Nacional de Amenaza ante Deslizamientos; con información y datos de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED) y el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) de Guatemala. El contenido del documento es completa responsabilidad del autor.



Fotografía de portada:

Vista desde el sur-oeste de la corona y cuerpo principal del mega-deslizamiento de Los Chorros en San Cristóbal Verapaz, Guatemala. Autor: Manolo Barillas.

CONTENIDO

PRESENTACIÓN.....	6
MARCO DE REFERENCIA.....	7
Guatemala en el contexto centroamericano.....	7
Relieve y fisiografía.....	7
Geología.....	9
Régimen de lluvias.....	13
INFORMACIÓN HISTÓRICA SOBRE DESLIZAMIENTOS.....	15
Detalles del inventario de deslizamientos del INSIVUMEH.....	16
Detalles de la base de datos de incidentes de la CONRED.....	17
Distribución espacial de los deslizamientos históricos.....	17
Casos de deslizamientos excepcionales.....	18
Alcances y limitaciones de la investigación.....	27
ANÁLISIS DE INFORMACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	28
Susceptibilidad ante deslizamientos generados por lluvia.....	28
Los deslizamientos a lo largo de la historia reciente.....	31
La lluvia como factor disparador de los deslizamientos.....	34
Deslizamientos asociados a eventos meteorológicos extremos.....	40
DISCUSIÓN DE RESULTADOS: consideraciones e implicaciones.....	44
¿Dónde suceden los deslizamientos en Guatemala?.....	45
La alerta a poblaciones en riesgo: ¿Que hacer y cuando hacerlo?.....	48
Los terremotos como factor generador de deslizamientos.....	49
El camino por recorrer.....	51
CONCLUSIONES.....	52
AGRADECIMIENTOS.....	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
ANEXOS.....	61

LISTA DE TABLAS	(página)
1. Densidad de ocurrencia de deslizamientos por unidad geológica.	(28)
2. Susceptibilidad a deslizamientos generados por lluvia en departamentos de Guatemala.	(30)
3. Personas fallecidas debido a movimientos de ladera entre el período 1900-1991.	(34)
4. Deslizamientos asociados con eventos meteorológicos extremos en Guatemala entre los años 2008 y 2011.	(40)
5. Deslizamientos catastróficos en Guatemala (1998-2010).	(44)
6. Municipios más afectados por deslizamientos por el terremoto de 1976 en Guatemala.	(58)
7. Características de los cuatro deslizamientos más grandes generados por el terremoto del 4 de febrero de 1976 en Guatemala.	(59)

LISTA DE FIGURAS	(página)
1. Ubicación, división política y población de Guatemala, Centro América.	(8)
2. Relieve y fisiografía del territorio Guatemalteco.	(10)
3. Mapa Geológico de la República de Guatemala.	(12)
4. Distribución de lluvia histórica anual entre los años 1961-1991 en Guatemala.	(14)
5. Gráfica de distribución de lluvia histórica (1961-1991) a lo largo del año.	(15)
6. Ubicación de los deslizamientos históricos incluidos en las bases de datos de INSIVUMEH y CONRED.	(19)
7. Mapa de distribución regional de los deslizamientos generados por el huracán Mitch (1998) en la zona nor-oriental de Guatemala.	(20)
8. Extracto del mapa de amenaza ante lahares elaborado para el volcán de Agua.	(25)
9. Zonas volcánicas en Guatemala con antecedentes de deslizamientos.	(26)

- 10.** Zonas susceptibles a deslizamientos provocados por lluvias en la República de Guatemala. (29)
- 11.** Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos provocados por lluvia para la zona metropolitana de Guatemala. (31)
- 12.** Distribución anual de los deslizamientos históricos a lo largo del siglo XX. (33)
- 13.** Ocurrencia de deslizamientos mensuales en el período 1950-1990 y el Índice de El Niño Oceánico. (35)
- 14.** Frecuencia de deslizamientos históricos mensuales entre 1900-1990 y distribución de lluvia histórica mensual para el mismo período. (36)
- 15.** Gráfico de lluvia diaria y lluvia acumulada durante el invierno de 1970 en la estación Nebaj, Quiché. (38)
- 16.** Gráfico de lluvia diaria y lluvia acumulada durante el invierno de 1979 en la estación San Pedro Soloma, Huehuetenango. (38)
- 17.** Gráfico de lluvia diaria y lluvia acumulada durante el invierno de 1988 en la estación INSIVUMEH, Guatemala. (39)
- 18.** Gráfico de lluvia diaria y lluvia acumulada durante el invierno de 1970 en la estación Camotán, Chiquimula. (39)
- 19.** Distribución regional de deslizamientos 2008-2011 provocados por eventos meteorológicos extremos. (41)
- 20.** Distribución espacial de la lluvia acumulada de la tormenta tropical Agatha entre los días 29 de mayo y 3 de junio del 2010. (42)
- 21.** Gráfico de lluvia diaria y lluvia acumulada durante el invierno del 2010 en la estación Santiago Atitlán, Sololá. (43)
- 22.** Vista del deslizamiento en Sta. Cruz Barillas (20-Sep-2011). (45)
- 23.** Ejemplos de deslizamientos en zonas de alta actividad e influencia humana (47)
- 24.** Flujograma de posibles acciones de alerta ante deslizamientos invernales (50)
- 25.** Mapa de distribución regional de los deslizamientos generados por el terremoto del 4 de febrero de 1976 en la región centro-occidental de Guatemala. (65)

Entre los múltiples riesgos invernales que impactan a la República de Guatemala sobresalen los deslizamientos como responsables de la pérdida de vidas humanas, daños a viviendas y a la infraestructura vial. Año con año, las pendientes pronunciadas y taludes a lo largo de las cadenas montañosas, flancos volcánicos, barrancos y carreteras condicionan la ocurrencia de movimientos de masa de diversos tamaños y tipos. Según los registros oficiales y reportes de prensa, alrededor de 900 personas han fallecido en la última década debido a deslizamientos catastróficos, incluyendo las aproximadamente 750 personas que fueron literalmente sepultadas en Panabaj, Sololá por el alud generado por las lluvias de la tormenta tropical Stan en octubre del 2005. Como parte de una evaluación global de riesgo ante deslizamientos, Nadim y colaboradores (2006) han estimado que la probabilidad anual de ocurrencia de un gran deslizamiento en Guatemala es de 0.05 a 0.2% por kilómetro cuadrado (la categoría más alta de amenaza global por deslizamientos) y han estimado que alrededor de 0.01 a 0.1 personas por kilómetro cuadrado podrían morir en estos eventos (la más alta categoría de riesgo por deslizamientos en Centro América).

La ocurrencia de estos deslizamientos está directamente relacionada con las cuantiosas lluvias asociadas con los fenómenos climáticos extremos (como Mitch, 1998; Stan, 2005; Agatha, 2010 y 12E, 2011) y a las tormentas convectivas locales. Pero también, la inestabilidad del terreno parece incrementarse debido a factores socio-económicos como la deforestación, la degradación ambiental, el rápido y desordenado crecimiento poblacional y el desarrollo territorial no planificado e insostenible. Este escenario de mayor inestabilidad también se aplica a aquellos deslizamientos que pudieran provocarse por terremotos o actividad volcánica.

En términos generales, en Guatemala se ha realizado muy poco trabajo de investigación y caracterización de los deslizamientos y sus impactos a la sociedad y la infraestructura. La gran mayoría del trabajo realizado no se publica para su disseminación masiva y, lo poco publicado, es trabajo realizado por científicos extranjeros, por ejemplo después de un desastre importante. Los catálogos históricos disponibles están incompletos, desactualizados y sin estandarización. Peor aún, los eventos actuales o recientes no se registran en forma sistemática y uniforme.

En aras de contribuir con el entendimiento de estos fenómenos, en la presente investigación se ha realizado una revisión y descripción de las bases de datos disponibles; correlaciones preliminares de eventos, o familias de eventos, con la lluvia generadora; reconstrucción de los eventos provocados por las más recientes tormentas y caracterización de los principales factores condicionantes (como pendiente, unidades geológicas o humedad natural del suelo). De forma complementaria, se ha incluido la descripción de los deslizamientos asociados con zonas volcánicas y los generados por el terremoto del 4 de febrero de 1976.

La principal intención de este estudio es sentar las bases para fomentar la investigación de los deslizamientos en Guatemala y proveer criterios prácticos que puedan utilizarse en planes de ordenamiento y desarrollo del territorio, regulaciones municipales y la disseminación de alertas a la población vulnerable, particularmente en aquellos casos cuando el país es impactado por eventos meteorológicos extremos.

Guatemala en el contexto centroamericano.

La República de Guatemala es el más septentrional de los países del istmo centroamericano limitada al norte y occidente por México, al nororiente por Belice y al oriente y sur-oriente por Honduras y El Salvador. Posee una línea costera en el Océano Pacífico de alrededor de 255 kilómetros de largo y comparte con Belice y Honduras una pequeña porción del mar Caribe (Figura 1).

Según estimaciones al 2012 del Instituto Nacional de Estadística (INE), Guatemala tiene una población de 14 millones de habitantes con una división política territorial de 22 departamentos y 334 municipios. La densidad poblacional es de 129 habitantes por kilómetro cuadrado, solamente después de El Salvador, el más densamente poblado de la región. Es la única de las repúblicas de Centro América con una población indígena mayoritaria (alrededor del 50% del total, según datos del INE) distribuida entre 21 diferentes comunidades lingüísticas (datos de la Academia de Lenguas Mayas, www.almg.org.gt al 13 Oct. 2012). Información adicional sobre población y extensión territorial está incluida en la Figura 1.

La ubicación geográfica y características fisiográficas, geológicas y topográficas de Guatemala favorecen su exposición a diferentes fenómenos naturales como huracanes y tormentas tropicales, actividad volcánica, movimientos sísmicos y sequías/heladas que, junto con las condiciones sociales, económicas y culturales generan altos niveles de riesgos e impactos a lo largo del año. La combinación de estos factores, junto a los alarmantes niveles de deforestación, degradación ambiental y pobreza extrema, colocan a Guatemala como el 5^{to} país a nivel mundial con alto riesgo económico ante 3 o más amenazas (CEPAL, 2010; IFRC, 2010; GFDRR, 2011).

Relieve y fisiografía.

Guatemala es un país de fuertes contrastes en relieve y accidentes geográficos. Presenta altitudes desde el nivel del mar hasta los 4,220 metros, el punto más alto de Centro América, que es la cima del volcán Tajumulco. Se reconocen, de sur a norte, cuatro grandes provincias fisiográficas (Figura 2):

La planicie costera del Pacífico, con entre 17 y 65 kilómetros de ancho, marca el límite continental del país con el Océano Pacífico entre las fronteras con México (al occidente) y El Salvador (al oriente). Transversalmente a esta extensa planicie fluyen gran cantidad de ríos que drenan sus aguas desde las partes altas de las cordilleras montañosas y cadena volcánica apilando sus depósitos en diversas planicies de inundación y terrazas fluviales (por ejemplo, los ríos Suchiate, Samalá, Coyolate, Nahualate, Achiguate, Guacalate, María Linda, Los Esclavos y Paz). Esta planicie presenta gradientes de menos de 10 metros de altitud por kilómetro lineal.

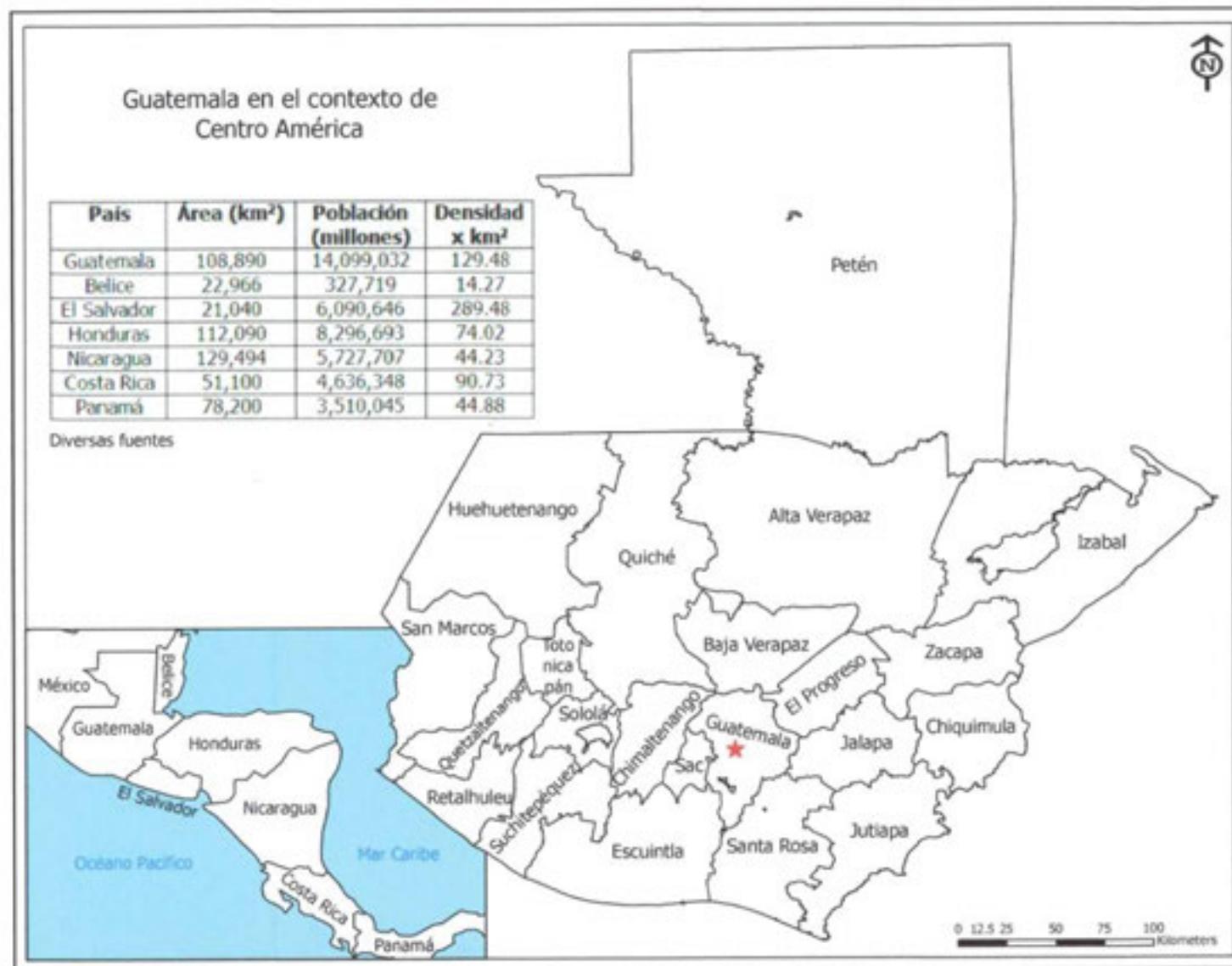


Figura 1. Ubicación, división política y población de Guatemala, Centro América.

La cadena volcánica, es parte del "anillo de fuego" que discurre a lo largo de toda la costa pacífica de Norte América, Centro América y Sur América. En nuestro país se contabilizan alrededor de 32 edificios volcánicos, al menos 7 de ellos activos (Tacaná, Santiaguito, Cerro Quemado, Atitlán, Fuego, Acatenango y Pacaya), (Rudiger Escobar, comunicación personal). En esta región se observan gradientes altitudinales de hasta 600 metros verticales por kilómetro lineal en los bordes de los cráteres volcánicos.

Las tierras altas cristalinas, constituidas por un imponente macizo montañoso que cruza el país de occidente a oriente. En la zona fronteriza con México se ubican las mayores altitudes en la cordillera de Los Cuchumatanes. Hacia la región oriental, esta cordillera se divide en tres grandes ramales: la Sierra del Merendón, al sur; la Sierra de las Minas, al centro y las Sierras de Chamá y Santa Cruz, al norte. En esta provincia se presentan pendientes de hasta 80° en los flancos montañosos así como en barrancos y cabeceras de los valles fluviales mayores.

Las tierras bajas del Petén, se forman desde el flanco norte de las montañas en Huehuetenango, Quiché y las Verapaces y se prolonga, al norte, por todo el territorio petenero hasta la inmensa plataforma de Yucatán, México. Cuatro grandes ríos dominan la red hidrográfica en esta región (La Pasión, San Pedro, Salinas y Usumacinta) drenando su caudal hacia la vertiente del Golfo de México, al occidente.

El escenario topográfico se complementa con los grandes valles aluviales de dirección oeste-este de los ríos Polochic y Motagua, drenando sus aguas hacia la boca costa del Mar Caribe, en la Bahía de Amatique, Izabal.

Geología.

El mosaico geológico de Guatemala está relacionado con la dinámica tectónica de la región caribeña y la interacción de las placas Coco, Caribe y Norte América que han originado, entre otros, las cadenas montañosas en la parte central del país, la cadena volcánica paralela a la costa pacífica y los cinturones metamórficos en el centro-oriental del territorio. Asociados con esta intensa actividad tectónica, grandes zonas del piso oceánico fueron levantadas formando los cinturones montañosos sedimentarios y la plataforma carbonatada del Petén y Yucatán (Burkart, 1983; Meschede y Frisch, 1998).

El límite entre placas tectónicas, del tipo transcurrente, a lo largo de la zona de falla Polochic-Motagua ha generado los más recientes elementos estructurales mayores en dirección este-oeste, como las zonas de falla de Chixoy, Polochic, Motagua y Jocotán, y algunas estructuras de dirección aproximada norte-sur, como los grábenes de Guatemala o Ipala (Donnelly et al., 1990; Finch y Dengo, 1990). Los depósitos aluviales recientes, a lo largo de la costa del Pacífico y en los valles fluviales intermontanos complementan la panorámica geológica (ver Figura 3).

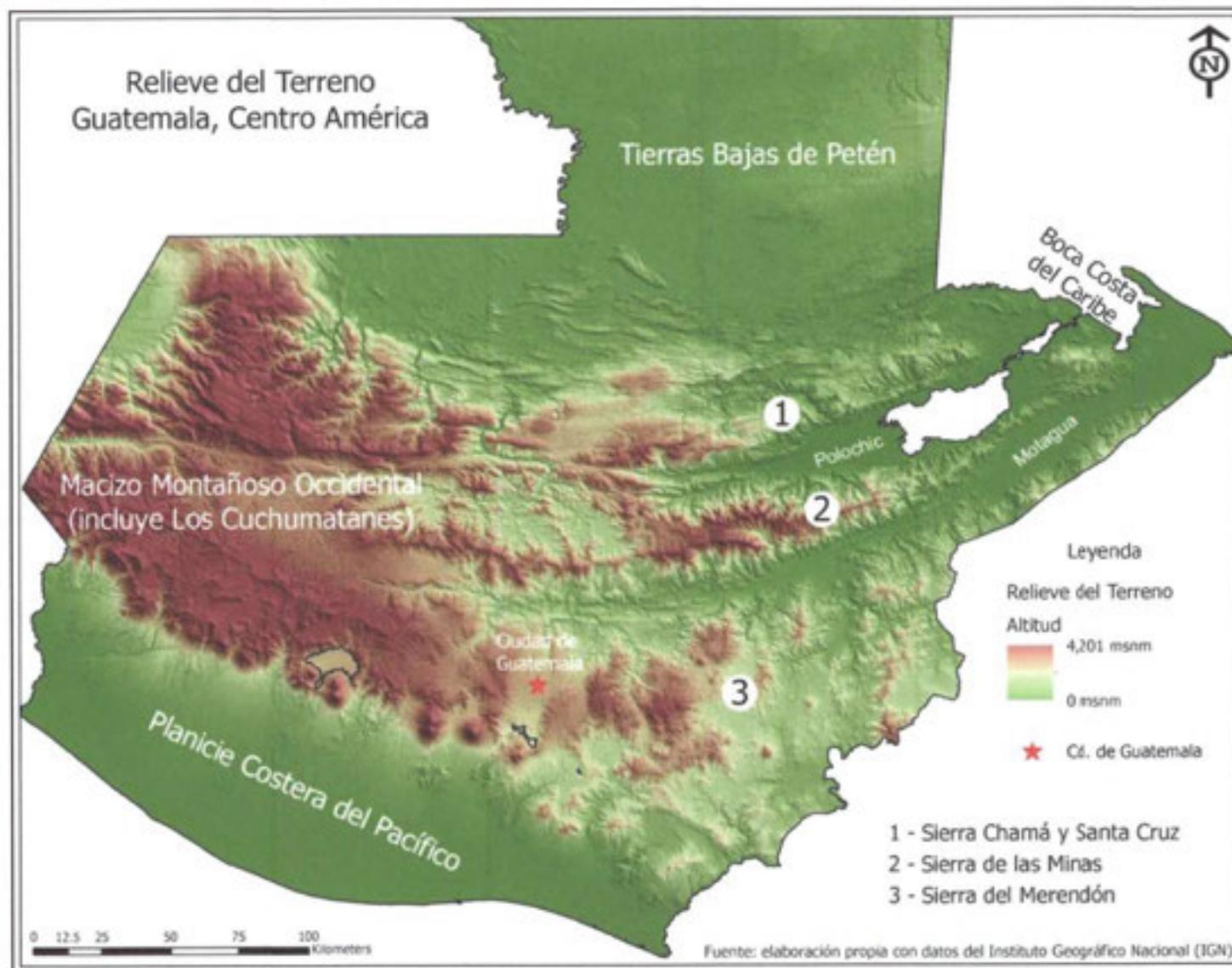


Figura 2. Relieve y fisiografía del territorio Guatemalteco.

El basamento geológico antiguo (Paleozoico y Mesozoico inferior).

Las rocas más antiguas del país son las metamorfitas paleozoicas que afloran a lo largo del cinturón montañoso central, en dirección oeste-este, incluyendo filitas, esquistos, gneises, mármoles y migmatitas. Estas rocas se constituyen en el núcleo de Los Cuchumatanes (al occidente), la Cordillera Central, la Sierra de Las Minas y del Merendón (al oriente). Este cinturón montañoso representa, e incluye, las principales fases de deformación cortical que ha sufrido la zona norte de Centro América como resultado de la evolución tectónica del Caribe (Donnelly et al., 1990; Finch y Dengo, 1990; Meschede y Frisch, 1998). Estratigráficamente por encima, se ubican los depósitos clásticos y meta-sedimentos del Carbonífero-Pérmico del Grupo Santa Rosa que comprende lutitas, areniscas, conglomerados y filitas. Complementan la secuencia los depósitos clásticos de la Formación Todos Santos de edad Jurásico-Cretácico. Esta secuencia geológica aflora en forma combinada y presenta abundantes evidencias de deformación y tectonismo (fracturamiento, fallamiento y plegamiento).

Rocas sedimentarias marinas y de plataforma (Mesozoico - Cenozoico).

A este grupo pertenecen los gruesos bancos carbonatados y evaporíticos de las formaciones Cobán y Campur, del Cretácico medio y superior, que incluyen calizas, dolomitas y sus variaciones, así como anhidrita, halita y otras sales relacionadas. Estas últimas solamente afloran en una pequeña porción del territorio entre Quiché y Las Verapaces y se reportan de los estudios y perforaciones petroleras de la zona. Por su parte, las rocas carbonatadas cubren una extensa zona que incluye la Sierra de Chamá, la Sierra de Chinajá y gran parte de los terrenos planos del Petén. Por encima de estos depósitos marinos se ubican los depósitos clásticos, principalmente lutitas, margas y areniscas, de la formación Sepur del Terciario inferior. En forma marginal, hacia el norte y oriente, se ubican sedimentos marino-continentales Cuaternarios de las formaciones Cayo, Armas y Grupo Petén.

Rocas magmáticas recientes.

La secuencia geológica reciente incluye rocas intrusivas de composición granítica y diorítica del Terciario que afloran principalmente en la zona occidental y oriental del país. Una de las secuencias con mayor cobertura en todo el territorio nacional corresponde a los depósitos volcánicos de caída Terciario-Cuaternario que incluye intercalaciones de tefra como pómez y cenizas. Esta secuencia de depósitos volcánicos, se derivó de la intensa actividad eruptiva del Cenozoico a lo largo de la cadena volcánica así que también incluye las lavas, tefra y depósitos de avalancha de los grandes estratovolcanes y otras estructuras volcánicas (Reynolds, 1980). Asociados con la actividad tectónica del Cretácico tardío, se presentan diversos cuerpos elongados de rocas ultra-básicas, principalmente serpentinitas y jadeítas de edad Terciaria, en la frontera entre los bloques Maya y Chortí y la zona de sutura del Motagua (Donnelly et al., 1990).

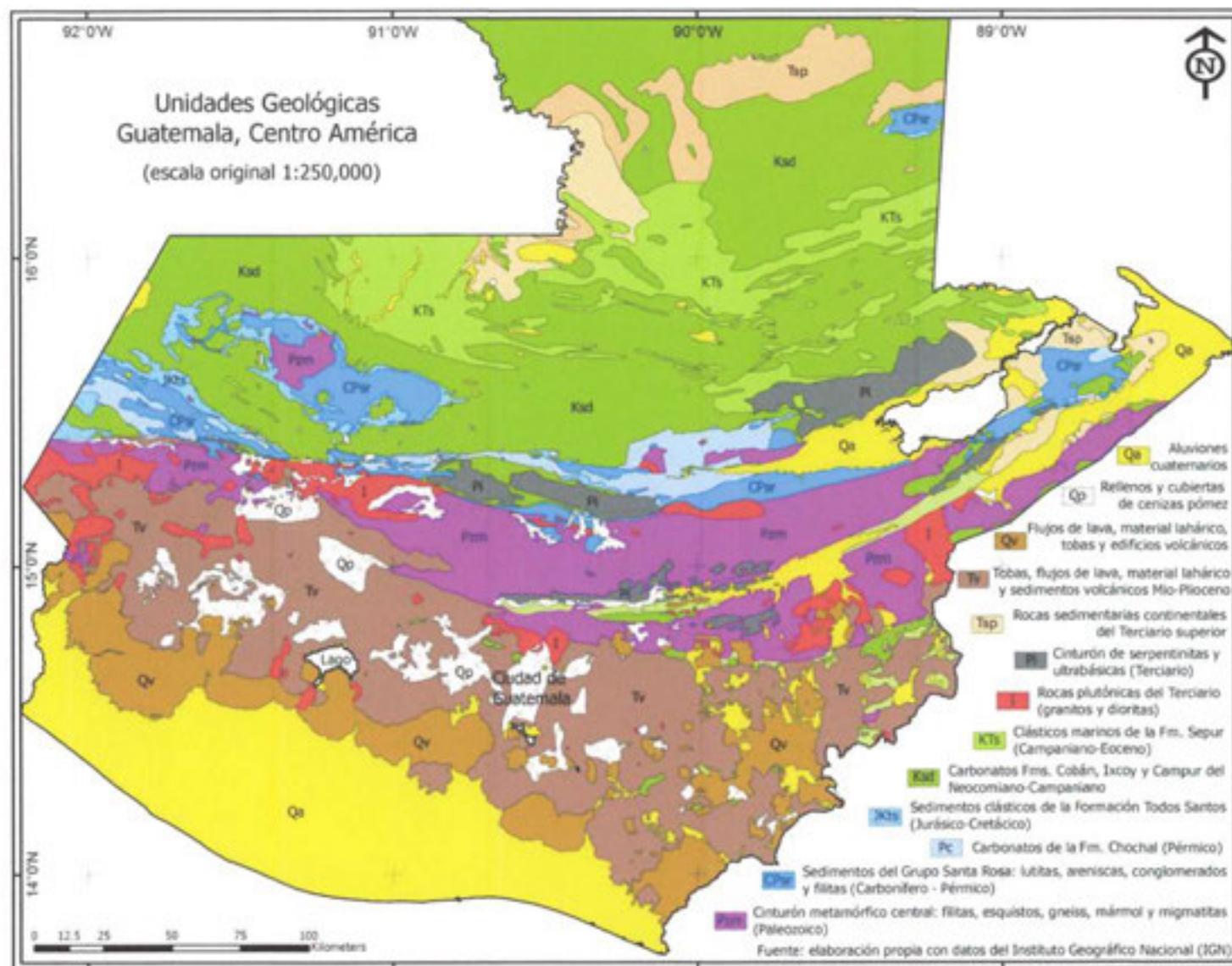


Figura 3. Mapa Geológico de la República de Guatemala.

La cadena volcánica incluye entre 20 a 25 edificios, al menos 7 de ellos activos (Tacaná, Santiaguito, Cerro Quemado, Atitlán, Fuego, Acatenango y Pacaya) y dos grandes complejos caldéricos, Atitlán y Amatitlán (Wunderman y Rose, 1984; Newhall, 1987). Esta cadena volcánica es el resultado de la subducción de la placa de Coco por debajo de la placa Caribe a lo largo de la Trinchería Mesoamericana del Pacífico por lo tanto, se prolonga a lo largo de los países vecinos El Salvador, Nicaragua y Costa Rica.

Al menos 8 unidades de pómez, ceniza y tefra de caída, con un espesor máximo de hasta 300 metros, rellenan el valle de la ciudad de Guatemala y gran parte del centro del país, y son producto de las fases eruptivas explosivas de la caldera de Amatitlán, al sur de la ciudad de Guatemala (Koch y McLean, 1975; Wundermann, 1984). Estos depósitos suelen variar lateralmente en cuanto a sus propiedades físicas, composición, granulometría y espesor. Adicionalmente, se identifican otras unidades pomáceas originadas en la caldera de Atitlán, unos 75 kilómetros al occidente de la ciudad de Guatemala, incluyendo la unidad "Los Chocoyos" de la cual se reportan afloramientos en estados del sureste de México y en países vecinos de Centro América (Newhall, 1987; Wundermann, 1984).

Régimen de lluvias.

La época lluviosa, o invierno, de Guatemala inicia en el mes de mayo y termina en octubre. Dependiendo de condiciones climáticas regionales, que no se discuten en este documento, los meses de invierno pueden variar, iniciar tempranera o tardíamente o prolongarse hasta el mes de noviembre con algunas lluvias esporádicas en diciembre y febrero.

La información histórica de 30 años (MARN-INSIVUMEH, 2001), entre 1961 y 1991, indica un rango de precipitación entre los 680 y 5,442 milímetros anuales (milímetros = litros por metro cuadrado). Las mayores precipitaciones ocurren en el flanco sur de la cadena volcánica, en su sección centro-occidental, la zona fronteriza con México (San Marcos, Huehuetenango y Quiché) y en áreas al norte del cinturón montañoso central (ver mapa en la Figura 4). En el Anexo 1 se incluye el listado de estaciones meteorológicas de las cuales se extrajo la información de lluvia.

Como puede verse en la gráfica de la Figura 5, la distribución promedio histórica de la lluvia a lo largo de los 6 meses del invierno delinea un patrón con una primera fase de lluvias entre los meses de mayo y julio, un período de poca lluvia a finales de julio o principios de agosto (denominada "canícula") y una segunda fase, generalmente más intensa, entre la segunda mitad de agosto y hasta octubre. La época de tormentas tropicales y huracanes empieza el 1 de junio y finaliza el 30 de noviembre, siendo, normalmente, la segunda fase del invierno, la época más prolífica en formación de este tipo de fenómenos. En secciones posteriores se hará la distinción entre la lluvia del invierno "normal" y la lluvia de los "eventos extremos".

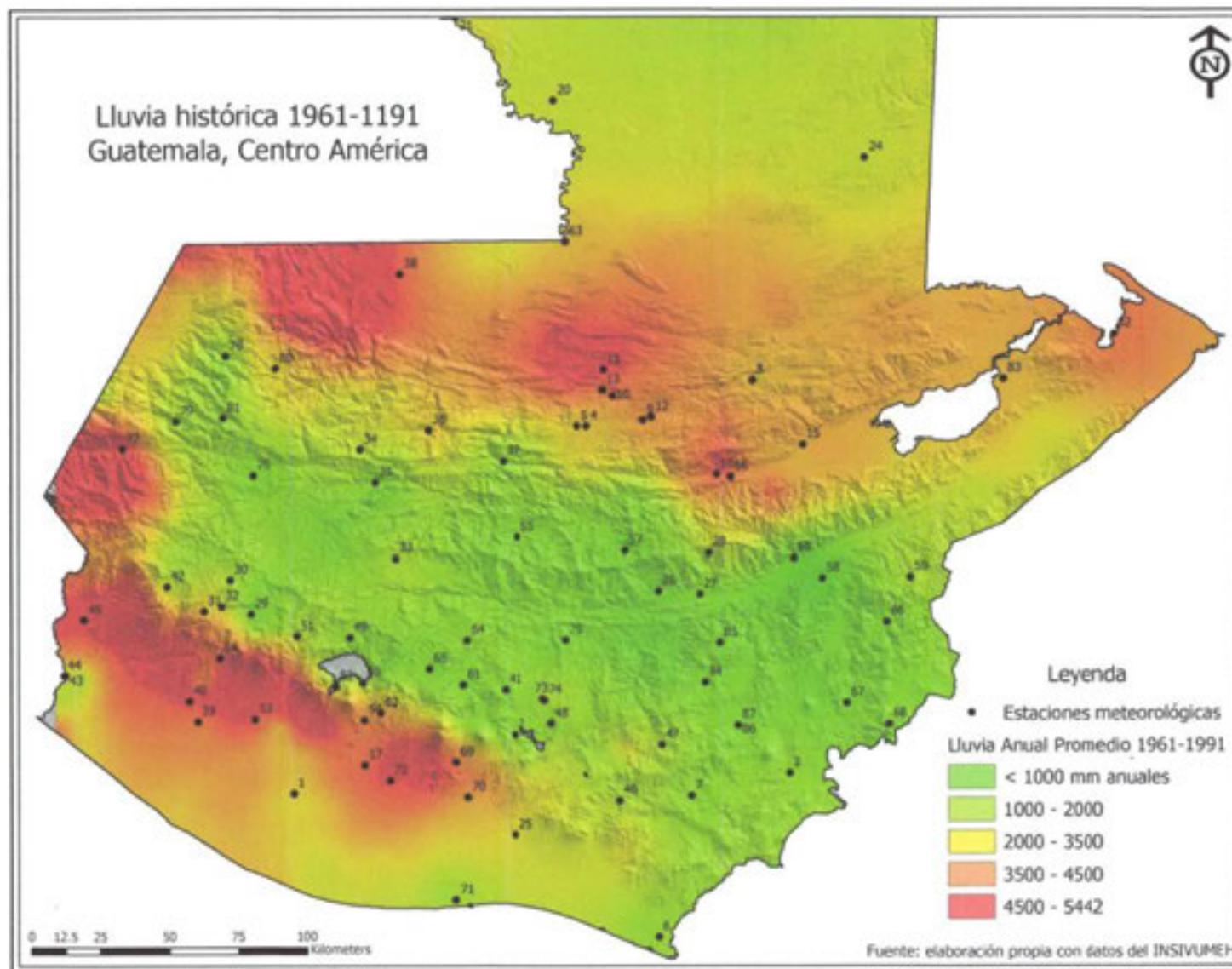


Figura 4. Distribución de lluvia histórica anual entre los años 1961-1991 en Guatemala.

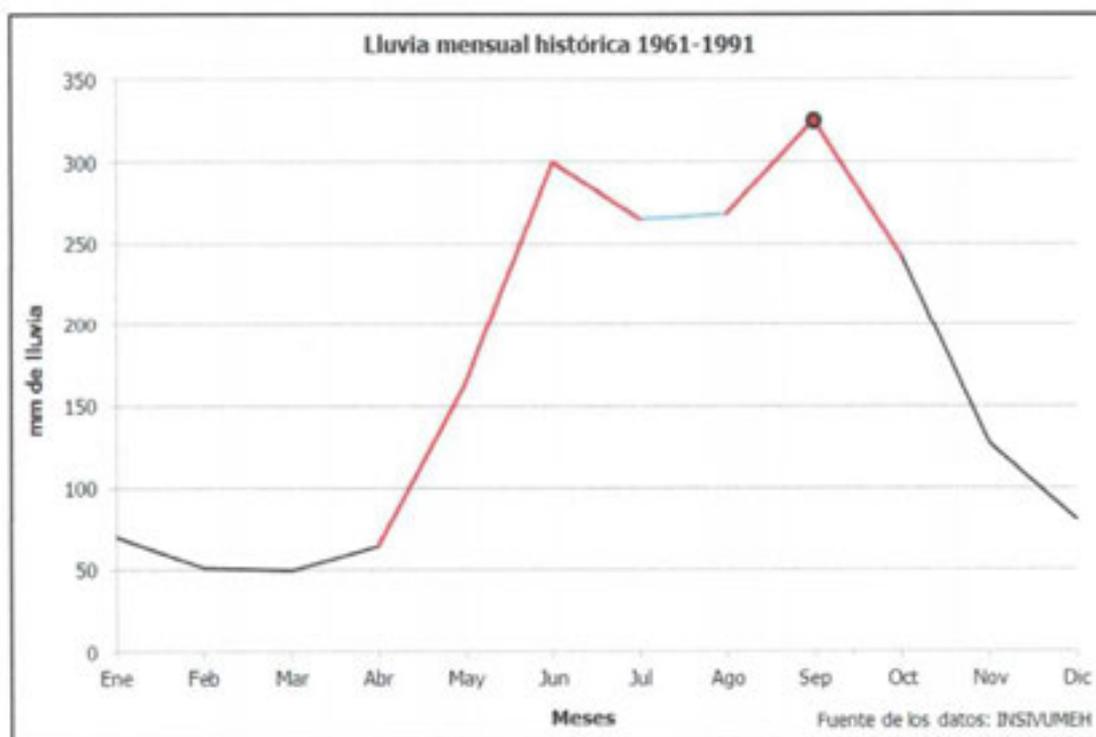


Figura 5. Gráfica de distribución de lluvia histórica (1961-1991) mensual: estación lluviosa entre mayo y octubre (línea roja); canícula entre julio y agosto (línea azul); mayores acumulados de lluvia entre septiembre y octubre (punto rojo).
Datos de lluvia en MARN-INSIVUMEH, 2001.

INFORMACIÓN HISTÓRICA SOBRE DESLIZAMIENTOS.

En Guatemala hay poca disponibilidad de inventarios o bases de datos históricas de ocurrencia de deslizamientos a escala nacional. El INSIVUMEH (1991) publicó un inventario que comprende aquellos eventos ocurridos entre los años 1900 y 1991 compilados de información periodística de la Hemeroteca Nacional. La CONRED compiló recientemente una base de datos de incidentes para los años 2008 y 2011 entre los cuales se incluyen los deslizamientos y derrumbes. Posiblemente, exista una valiosa información en los archivos de la Dirección General de Caminos y la Unidad Ejecutora de Conservación Vial (COVIAL) aunque, por razones obvias, más enfocada a deslizamientos y bloqueos de la red vial del país. Además, existe un detallado reporte sobre los deslizamientos generados por el terremoto del 4 de febrero de 1976 elaborado por Harp y colaboradores (1981) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), incluyendo un mapa con alrededor de 10,000 eventos interpretados a partir de fotografías aéreas (ver Anexo 2).

A nivel sub-nacional, existe un inventario de eventos generados por el huracán Mitch en 1998 en la región sur-oriental de la Sierra de las Minas elaborado por Bucknam y colaboradores (2001) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS); también han sido compilados algunos de los eventos generados en los alrededores de Santiago Atitlán por las intensas lluvias de la tormenta tropical Stan en 2005 (Connors et al., 2006; CORDILLERA, 2006); el estudio de amenaza por deslizamientos en Senahú, Alta Verapaz (Cortéz et al., 2002) y los trabajos sobre deslizamientos en la zona metropolitana central (Geopetrol, 2007).

Detalles del inventario de deslizamientos del INSIVUMEH.

Originalmente, la base de datos contiene 750 registros y abarca consistentemente el período desde el año 1914 hasta 1990. Los registros fueron recolectados de El Diario de Centro América (hasta 1921), El Imparcial (entre 1922 y 1985) y Prensa Libre (desde 1985). Para cada registro se incluye la ubicación del evento (lugar o municipio y departamento; y coordenadas de latitud y longitud), fecha, fuente de la información, daños provocados por el evento (humanos o materiales), causa de la ocurrencia (lluvia, sismos, cortes y otros) y descripción general. También está incluida la lluvia mensual y anual relacionada a la fecha de ocurrencia. Las coordenadas de cada punto se obtuvieron de un mapa base relacionando el lugar de ocurrencia o la ubicación descrita en la noticia con el punto en el terreno. La lluvia mensual y anual se ha tomado de la estación meteorológica más cercana del INSIVUMEH.

La información individual de cada deslizamiento fue digitalizada por personal de la Gerencia de Riesgo y Departamento SIG de la CONRED en el año 2006. Para su uso en la presente investigación, se revisó y "filtró" el inventario eliminando algunos registros bajo los siguientes criterios:

- Puntos con inconsistencia de ubicación (se describe un lugar pero resulta ubicado en un sitio diferente),
- Eventos que ocurrieron fuera de la época invernal por causas no relacionadas a la lluvia,
- Deslizamientos relacionados con movimientos sísmicos,
- Reportes de hundimientos o socavamientos en taludes de carreteras o escuelas causados por erosión fluvial,
- Incidentes de colapsos de muros o paredes, zanjas por trabajos de construcción y caída de material en canteras artesanales o cuevas de extracción de material.

Luego de la revisión y filtrado, quedaron 555 registros individuales.

Detalles de la base de datos de incidentes de la CONRED.

Originalmente, la base de datos contiene 1,456 registros cubriendo desde el año 2008 hasta 2011. Los registros fueron recolectados principalmente por funcionarios y delegados de la CONRED a través de su propio sistema de reporte de incidentes manejado con *Lotus Notes*. También se incluyen reportes de otras instituciones del sistema CONRED, principalmente COVIAL, Policía Nacional y Bomberos. Para cada registro se incluye la ubicación del evento (lugar o municipio y departamento; y coordenadas de latitud y longitud), fecha de ocurrencia del incidente, fuente de la información, descripción general de las posibles causas y, aunque incompleta, se incluye información sobre los daños causados por cada evento. Las coordenadas de cada punto se obtuvieron con GPS o ubicando los sitios en un mapa base en función de la descripción de su ubicación. Para su uso en la presente investigación, se revisó y "filtró" la base de datos eliminando algunos registros bajo los siguientes criterios:

- Eventos fuera de la temporada invernal y que no se atribuyen a lluvias,
- Incidentes ocurridos por obras de reparación o ampliación de carreteras,
- Eventos relacionados con erosión o socavamiento por correntadas o ríos, principalmente en taludes de carreteras,
- Eventos provocados por los sismos de Cuilapa en el 2011.

Luego del filtrado de la información quedaron 1,415 registros.

Distribución espacial de los deslizamientos históricos.

La base de datos de deslizamientos históricos del INSIVUMEH (1900-1991) ha sido elaborada a partir de reportes periodísticos. De ahí que es lógico asumir que solamente se incluyeron aquellos eventos que "generaron noticia" al haber afectado elementos relevantes para el país. El 67% de dichos deslizamientos ocurrieron a lo largo de la red de carreteras, caminos y líneas férreas, mientras que el restante 33% afectó poblaciones rurales y áreas urbanas de la zona metropolitana central.

Como puede verse en el mapa de la Figura 6, la gran mayoría de eventos se ubican a lo largo de la carretera al Atlántico y el ramal que enfila hacia la zona fronteriza con Honduras, en la carretera Interamericana hacia el occidente del país y el ramal que corre hacia Huehuetenango. También se observan algunos grupos de deslizamientos en los ramales que conectan la Planicie Costera del Pacífico con la zona montañosa central: de Cocalles hacia Sololá, de Retalhuleu hacia Quetzaltenango y de Coatepeque hacia San Marcos. A falta de datos históricos sobre la red carretera y línea férrea es imposible hacer una estimación sobre la densidad de deslizamientos afectando esta infraestructura a lo largo del siglo. La correlación entre la ubicación de los eventos y la red carretera actual indican, sin embargo, que los principales ramales carreteros han mantenido su trazo y ubicación.

La base de datos de incidentes por deslizamientos de la CONRED incluye no solamente aquellos relacionados con infraestructura sino también los que han afectado población y viviendas. De hecho, alrededor del 40% de los reportes en el período están relacionados con afectación a personas, infraestructura comunitaria o familiar.

El mapa en la Figura 6 incluye la distribución de los deslizamientos “recientes” reportados por CONRED. Estos se ubican principalmente a lo largo de la cadena volcánica y de las grandes serranías del altiplano occidental y central del país. También se observan “clusters” de deslizamientos en la zona montañosa fronteriza con Honduras y en áreas de fuertes pendientes en la zona de Las Verapaces y Quiché. El 20% de los incidentes reportados se ubican en la jurisdicción del departamento de Guatemala.

Aunque la base de datos de CONRED solo contiene información entre los años 2008 a 2011, incluye tres veces mayor cantidad de eventos que el registro del INSIVUMEH para el siglo XX. Esto podría sugerir que factores como la explosión demográfica, con un crecimiento sostenido promedio de 2.1% (o ± 0.3 dependiendo de la fuente); el déficit habitacional, de alrededor de 1.5 millones de viviendas; y las preocupantes condiciones de deterioro ambiental (se han perdido alrededor de 4,300 km² de bosque en la última década)¹, entre otros, han incrementado la ocurrencia de los deslizamientos y, por lo tanto, el número de personas expuestas al fenómeno. Posiblemente, la mayor cantidad de datos en la actualidad se deben a la disponibilidad de tecnología, mayores capacidades de comunicación y la existencia de más número de instituciones u organizaciones interesadas en el tema de los desastres.

Casos de deslizamientos excepcionales.

A manera de estudios de caso, se describen algunos deslizamientos, colectivos o individuales, que han causado fuertes impactos en la sociedad y la infraestructura del país. En donde corresponda se indicará el evento meteorológico (tormenta tropical o huracán) que originó las lluvias que dispararon los eventos. En función de la disponibilidad de la información se indican también los principales daños causados por cada evento o grupo de eventos.

Deslizamientos provocados por el huracán Mitch (1998).

Más de 9,000 deslizamientos fueron identificados por Bucknam y colaboradores (2001) luego del impacto del huracán Mitch en la zona nororiental del país (Alta y Baja Verapaz, Zacapa, Chiquimula e Izabal) – Figura 7. Doce de estos deslizamientos alcanzaron volúmenes considerables, y en su conjunto, muestran una cobertura que incluye laderas y flancos montañosos de la Sierra de Chamá, Las Minas y Merendón.

¹ Datos: poblacionales del Instituto Nacional de Estadística (INE); de vivienda del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (MCIV); de cobertura forestal del Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA).

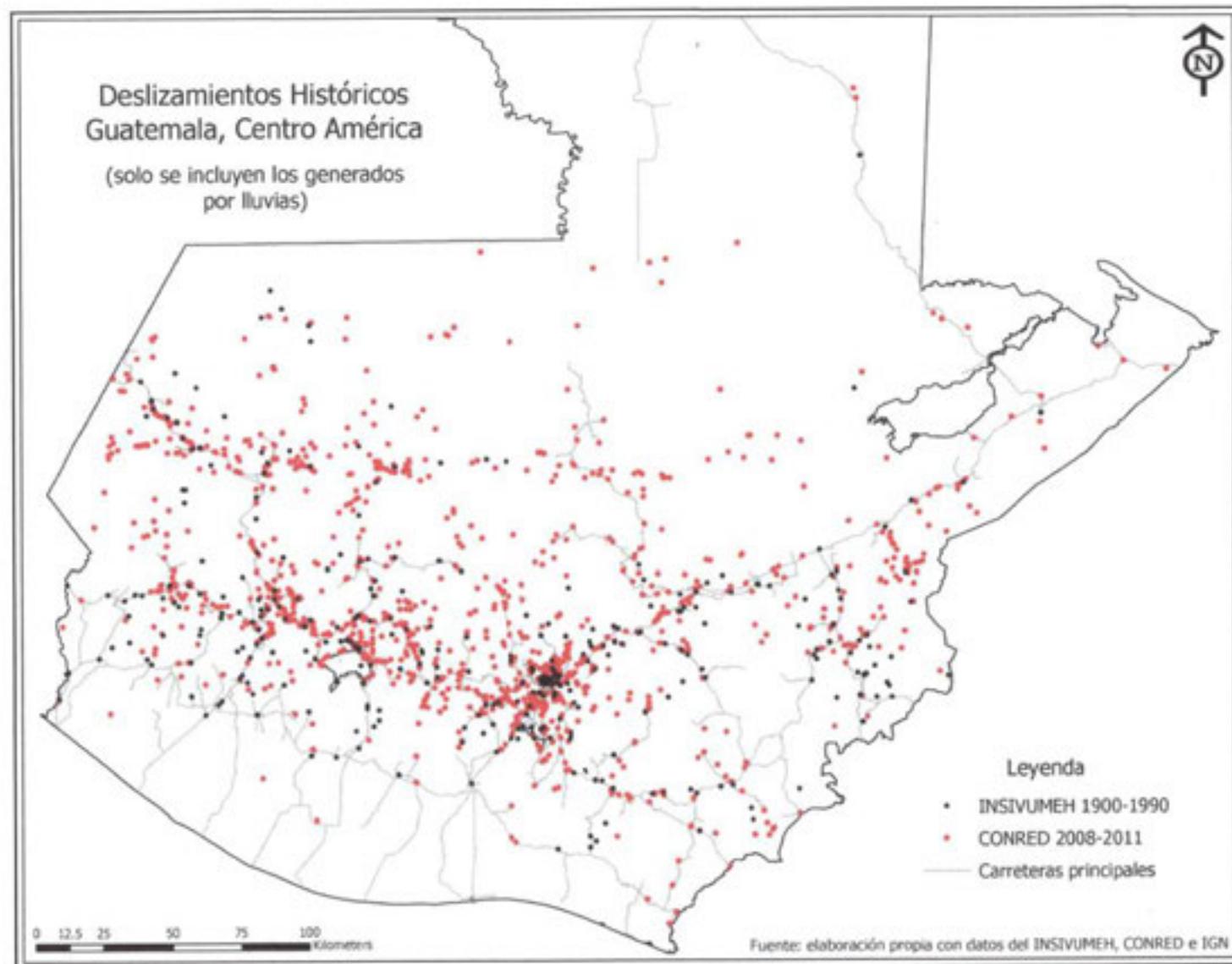


Figura 6. Ubicación de los deslizamientos históricos incluidos en las bases de datos de INSIVUMEH y CONRED.

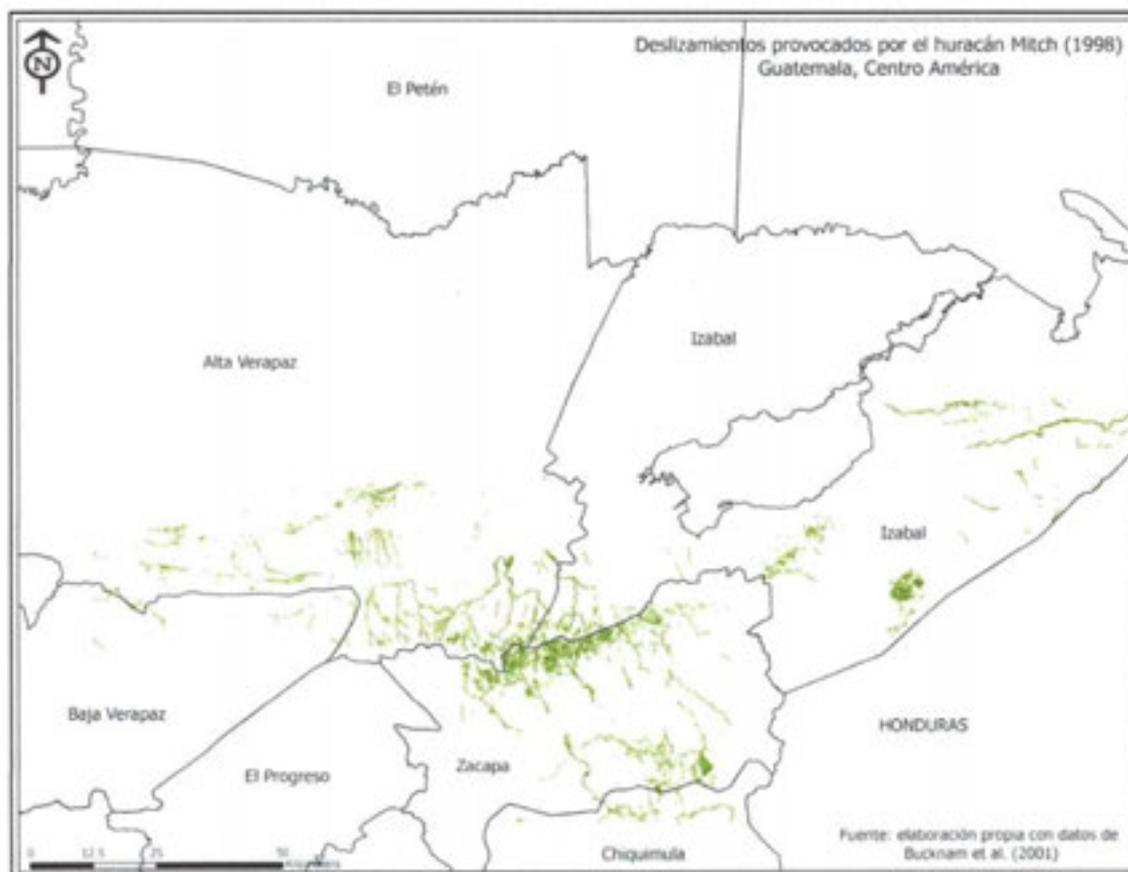


Figura 7. Mapa de distribución de los deslizamientos generados por el huracán Mitch (1998) en la zona nor-oriental de Guatemala.

La mayoría de estos deslizamientos se originaron en pendientes entre los 20 a 30 grados. Las unidades geológicas con la mayor densidad de ocurrencia fueron la Pzm (rocas metamórficas del Paleozoico: filitas, esquistos, gneises, mármol y migmatitas), Pc (carbonatos de la Formación Chochal del Pérmico) y CPsr (rocas del Grupo Santa Rosa del Carbonífero-Pérmico, incluyendo lutitas, areniscas, conglomerados y filitas). Algunos de estos deslizamientos fueron movilizados como flujos de detritos debido al alto contenido de humedad del material. Estos flujos provocaron la destrucción de infraestructura, principalmente caminos, carreteras y puentes.

Caso aparte, lo constituye la gran cantidad de deslizamientos, flujos de escombros y lodo, erosión fluvial y azolvamiento de deltas y bocabarras que el huracán Mitch provocó a su paso por la costa caribeña de Nicaragua y Honduras, y la afectación extensa sobre El Salvador. El evento más significativo de este meteoro fue el enorme flujo de escombros generado en el flanco sur del volcán Casita, en Nicaragua, que arrasó dos comunidades y provocó la muerte de al menos 2,000 personas (<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/lahar/casita.php>).

El catastrófico flujo de escombros de Panabaj, Sololá (2005).

Gran cantidad de deslizamientos fueron generados por las intensas lluvias asociadas con la tormenta tropical Stan en los primeros días de octubre de 2005. Los deslizamientos sucedieron principalmente en el altiplano occidental de Guatemala provocando pérdida de vidas humanas y un extenso daño a la infraestructura vial. Dentro de estos eventos sobresale el flujo de escombros que se originó en el flanco occidental del volcán Tolimán, al sur del lago de Atitlán en Sololá (5 de Octubre). Este gigantesco flujo de escombros sepultó parcialmente a los poblados de Panabaj y Tzanchaj, Santiago Atitlán, provocando la muerte de al menos 750 personas.



Según estimaciones de Connors y Sheridan (2006), este evento catastrófico movilizó alrededor de 360,000 metros cúbicos de una mezcla de arena, escombros de troncos, raíces de árboles y rocas de tamaño considerable. Este material fue depositado a lo ancho de la planicie aluvial en un área de aproximadamente 257,000 metros cuadrados (ver imagen abajo). A juzgar por las mediciones de campo realizadas por Connors y Sheridan (2006), el flujo de escombros pudo alcanzar velocidades promedio de 9.8 metros por segundo con lo cual, el recorrido desde su punto de iniciación en la parte alta del volcán hasta la zona poblada, habrá tomado alrededor de 6 minutos. Se estimó también una descarga de entre 1,200 a 1,500 metros cúbicos por segundo.

El manejo de la emergencia fue complejo y extenuante. Alrededor de 2,600 personas fueron desplazadas y evacuadas desde la planicie declarada como zona de riesgo por la CONRED. Diversas actividades de reubicación y reconstrucción fueron implementadas por actores de la cooperación y Gobierno en un tenso marco de negociaciones y toma de decisiones. El riesgo se mantiene latente ya que no es la primera vez que ocurren este tipo de fenómenos (Cordillera, 2006). El hecho que Panabaj signifique "corrientes de lodo" en el idioma Tz'utujil parece confirmarlo.



Vista aérea de la ubicación de los flujos de escombros y Panabaj

El deslizamiento en La Unión, Zacapa (2008).

El 20 de Julio del 2008 se generó un inmenso deslizamiento en la zona de entrada al casco urbano de La Unión, conocida como La Quebradona. La estación meteorológica La Unión reportó lluvia acumulada de 188.4 milímetros para el día del evento, cantidad muy por encima del promedio diario histórico del lugar. Según estimaciones de CP-Ingeniería de Materiales (2008) se movilizaron alrededor de 20 millones de metros cúbicos de escombros. Aparentemente, un grueso depósito coluvial en la parte alta de la quebrada inició el movimiento como producto de la sobre-saturación por infiltración del agua de lluvia. En corto tiempo, se originó un deslizamiento rotacional múltiple que movilizó la mayor parte de la ladera generando erosión y mayor inestabilidad en los flancos. El resultado fue un gigantesco flujo de escombros que, a lo largo de más de 800 metros, movilizó una gran cantidad de material rocoso, suelo, árboles y arbustos y provocó la destrucción parcial de la carretera de acceso desde Gualán.



Este deslizamiento fue el más relevante de todos los ocurridos en la zona urbana y alrededores de La Unión como producto de la lluvia ya mencionada. Aún así, los otros deslizamientos, aunque de menor extensión, también provocaron importantes daños a la infraestructura esencial entre ellas calles y avenidas, sistemas de agua y drenajes así como varias viviendas destruidas o con daños mayores.



Vista ladera abajo del deslizamiento en La Quebradona (izquierda). Nótese los arbustos y material vegetal desplazados a lo largo de la quebrada. Vista panorámica aérea del mismo deslizamiento (derecha) – ambas fotografías proporcionadas por CONRED.

El mega-deslizamiento de Los Chorros, San Cristóbal Verapaz (2009).

Según informes de la CONRED y la Sociedad Geológica de Guatemala, este deslizamiento se generó a partir de dos grandes movimientos de material el 14 de Diciembre 2008 y 4 de Enero 2009. El evento provocó la muerte de 37 personas, la desaparición de otras 23 y el bloqueo de la ruta nacional RN7W. Se generó un depósito de material de alrededor de 10 millones de metros cúbicos lo cual significa un riesgo para cierta infraestructura hidroeléctrica de la presa Chixoy y la ruta nacional.

El deslizamiento ocurre en una zona geológicamente compleja que incluye la tectónica de la zona de falla de Chixoy (fallas, plegamientos y fracturas) y la secuencia calcárea-evaporítica de la Formación Cobán (calizas, dolomías y yeso). Además, la región sur de las Verapaces se caracteriza por sus altos niveles históricos de lluvia (entre 3,000 y 3,500 milímetros anuales). Según información de la CONRED, en los meses anteriores a la ocurrencia del deslizamiento, se realizaron trabajos de ampliación de la ruta nacional, principalmente, movimiento de material y reconfiguración de laderas.

Estos eventos provocaron la pérdida de 37 vidas, la desaparición de 23 personas y el impacto negativo a la dinámica socio-económica de la región. El bloqueo de la ruta nacional paralizó el intenso comercio entre los departamentos de Quiché y Huehuetenango con la zona de las Verapaces ya que no existe otra ruta alterna para la circulación de vehículos, mercancías y personas. A pesar del esfuerzo entre instituciones de Gobierno nacional y local, hasta la fecha, no ha sido posible encontrar una solución integral y final al impacto generado. Las últimas informaciones (CONRED, comunicación personal) dan cuenta de la ejecución de estudios geotécnicos para decidir si es más conveniente el rediseño de la ruta o la construcción de obras de mitigación y estabilización. A su vez, el Instituto Nac. de Electrificación (INDE) hace lo propio para proteger la integridad de las obras de la presa Chixoy, ubicada ladera abajo de la zona de acumulación de escombros.



Mosaico fotográfico de M.Barillas

El "inquieto" Cerro Lec, San Andrés Semetabaj, Sololá (2009).

Según versiones de pobladores del lugar, los continuos movimientos de ladera del Cerro Lec podrían haberse iniciado durante el invierno del 2008 reportando grietas, deslizamientos y el escarpe del movimiento principal. Se determinó por parte de geólogos de la CONRED que la ladera inestable está en una zona de alta pendiente, con presencia de rocas volcánicas clásticas (tobas y bombas) y bajo la influencia de fallas y estructuras tectónicas locales (CONRED, 2009).



Aparentemente, el deslizamiento es del tipo rotacional con múltiples niveles de movimiento y escalonamiento. Se ha identificado el escarpe y cabecera principal del movimiento en la parte alta del cerro pero también se han reconocido otros movimientos laterales combinados con reptación y flujos de escombros. En algunos puntos, se han identificado grietas de hasta 25 m de largo y hasta 1 m de separación.



En algunos sectores del cuerpo deslizado se reconocen escarpes verticales de hasta 2.30 m de altura. Los diversos deslizamientos, principal y secundarios, depositan materiales sueltos (finos, gruesos y rocas de hasta 1.80 m de diámetro) en el cauce del río Patanatic, conocido localmente como La Quebrada, afluente del río Panajachel (ver fotografías). Estos materiales sueltos han sido arrastrados por consecutivas crecidas provocando erosión e impacto



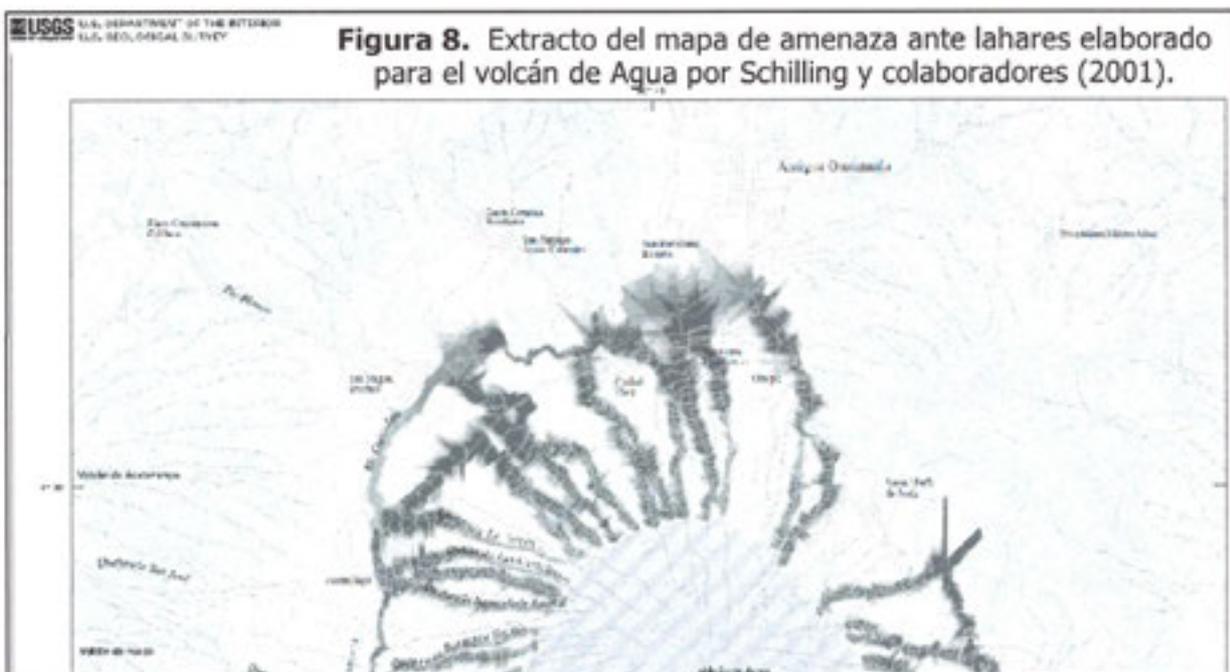
directo en las bases de dos puentes en la Ruta Nacional No. 3 que conecta Panajachel con San Andrés Semetabaj y la salida hacia la boca-costa del Pacífico. Cabe mencionar que esta ruta es altamente transitada y constituye un eje principal de comercio en la región. Hasta el momento, la zona inestable sigue representando un riesgo para el tráfico y las personas.

Deslizamientos en zonas volcánicas.

Existen varios antecedentes de deslizamientos y flujos de escombros generados en los flancos de los edificios y complejos volcánicos de Guatemala. Este tipo de eventos suelen ser muy comunes durante las intensas lluvias asociadas a tormentas tropicales o huracanes aunque también pueden desencadenarse en respuesta a lluvias convectivas locales, propias de la época invernal.

La más famosa de estas referencias, aunque quizás la menos documentada, es la que se refiere a la muerte de doña Beatriz de la Cueva, esposa del comendador Pedro de Alvarado, en la Antigua Guatemala de los tiempos coloniales debido a una correntada catastrófica que bajó de las laderas del volcán de Agua.

Científicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos elaboraron una serie de mapas de amenaza por lahares para los volcanes de Agua, Fuego, Acatenango y Atitlán (Schilling et al., 2001; Vallance et al., 2001; Haapala et al., 2005). En los alrededores del volcán de Agua se han delineado las zonas que serían potencialmente afectadas en los municipios de Ciudad Vieja, San Pedro Las Huertas, San Juan Obispo y Palín (ver Figura 8). También fueron identificadas las posibles zonas de peligro en el casco urbano de Alotenango y en comunidades rurales como Guadalupe en los alrededores del volcán de Fuego. El poblado de Alotenango y otras pequeñas comunidades en su alrededor también se verían afectados por lahares que pudieran originarse en el flanco noreste del volcán Acatenango.



En todos los casos, se enfatiza sobre el elevado riesgo que corren las poblaciones ubicadas a lo largo o cerca de los principales cauces de estos edificios volcánicos ya que las mortíferas correntadas podrían acarrear cientos o hasta miles de metros cúbicos de material. Los mismos autores alertan además sobre el hecho que las temporadas lluviosas más riesgosas son aquellas posteriores a un evento eruptivo importante ya que habrá mucho material volcánico suelto (tefra y fragmentos de lava) en el cauce de los ríos, principalmente en la parte superior de los conos volcánicos, normalmente por arriba de los 1,000 metros de altitud.

También son muy comunes los lahares a lo largo del río Samalá y sus tributarios como el Nimá y El Tambor en el área de Retalhuleu. Aparentemente, la constante actividad del volcán Santiaguito deposita abundante material en la cabecera de los cauces que luego es arrastrado aguas abajo a causa de las lluvias. Una de estas correntadas fue la responsable de la destrucción del poblado de El Palmar en 1988 y se constituyen también en un riesgo permanente para poblaciones como San Sebastián y para el puente sobre el río Samalá que conecta el tráfico proveniente desde México (Barillas-Cruz et al, 2003). El mapa en la Figura 9 muestra la ubicación de los lugares y accidentes geográficos mencionados en esta sección.

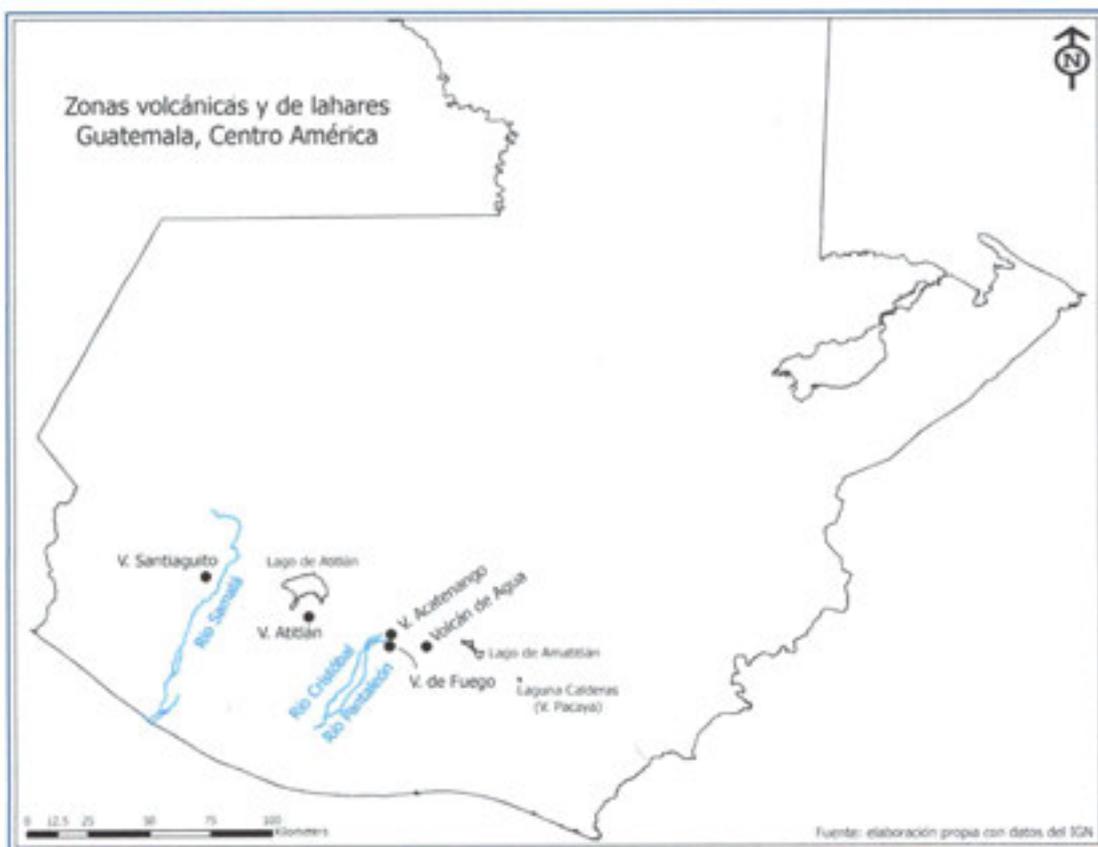


Figura 9. Zonas volcánicas en Guatemala con antecedentes de deslizamientos.

Alcances y limitaciones de la investigación.

Indudablemente, la limitación más importante es que los inventarios disponibles no incluyen una secuencia cronológica desde el pasado reciente hasta nuestros días y tampoco responden a un formato o estructura estándar. El inventario del INSIVUMEH solamente cubre hasta el año 1990 y el de CONRED inicia en el año 2008, quedando 17 años sin cobertura. Las descripciones o detalles de ambas colecciones no incluyen características geotécnicas de los eventos, por lo que es imposible discernir sobre el tipo de movimiento, dimensiones y volúmenes de material deslizado.

Considerando que las fuentes de la información del inventario del INSIVUMEH son noticias periodísticas, la precisión de datos de alta importancia como la fecha de ocurrencia y ubicación geográfica de cada evento podría ser cuestionable. Igualmente, aunque la información de la base de datos de la CONRED fue directamente recopilada por personal de la institución, es necesario tomar con cautela las fechas y ubicaciones de los eventos. En ambos casos, los deslizamientos se representan a través de puntos, pero no indican si se refieren a la zona de la corona, del cuerpo o la base de cada deslizamiento. Esta incertidumbre en la ubicación de los puntos no permite realizar análisis de precisión, como por ejemplo, los rangos de pendientes en los que ocurren los deslizamientos.

Asimismo, el mapa geológico utilizado para el análisis de factores condicionantes² está a una escala de 1:250,000 lo cual limita la caracterización de aquellas unidades que puedan ser más susceptibles a inestabilidad. Las descripciones de las unidades geológicas son generales, agrupando familias de rocas (por ejemplo las volcánicas, que puede incluir lavas, tefra y volcano-clastos), cada una de ellas con características geotécnicas y susceptibilidad a deslizamientos muy diferentes. Igualmente, la información topográfica, de la cual se deriva el mapa de pendientes, está a una escala de 1:50,000 con una precisión de altitud de 20 metros.

El alcance de la investigación es a escala nacional sin entrar en especificidades territoriales o de división política. A partir de algunos de los resultados se desprende el delineamiento de zonas que han sido recurrentemente afectadas por eventos meteorológicos particulares y se hacen algunas estimaciones de posible población vulnerable. Debido a las limitaciones previamente descritas es necesario recalcar que la utilidad de los resultados es a la escala nacional y no para interpretaciones específicas de estabilidad de laderas o caracterizaciones locales. Estos resultados son más bien la base para una investigación a futuro a escalas más detalladas con la recopilación de datos adicionales en el terreno y ojalá, complementada con información geotécnica.

² A lo largo del documento se mantiene la terminología de "factores condicionantes" y "factores de disparo" según Crude y Varnes (1996).

ANÁLISIS DE INFORMACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

Susceptibilidad ante deslizamientos generados por lluvia.

La ubicación de los deslizamientos históricos ha permitido estimar su densidad de ocurrencia por cada unidad del mapa geológico 1:250,000 (del Instituto Geográfico Nacional, IGN). Para la estimación se excluyeron aquellos deslizamientos generados por eventos meteorológicos extremos (tormentas tropicales y huracanes). La dimensional utilizada es la de "densidad de ocurrencia" la cual representa el número de deslizamientos por kilómetro cuadrado de unidad geológica (Tabla 1). Es necesario recalcar que estos cálculos no constituyen, ni pretenden ser, una metodología elaborada de estimación de susceptibilidad a deslizamientos sino solamente indican las unidades que han tenido mayor "densidad de ocurrencia" de eventos.

Aún así, la densidad de ocurrencia constituye un indicador confiable de la posible susceptibilidad de las diferentes unidades geológicas a la ocurrencia de deslizamientos generados por lluvias. Combinando esta susceptibilidad aparente con valores de pendiente considerados críticos para la estabilidad de las laderas (a partir de los 15°) ha sido posible delinear aquellas zonas del país con mayores posibilidades de sufrir un deslizamiento (ver mapa en Figura 10).

Tabla 1. Densidad de ocurrencia de deslizamientos por unidad geológica.

Unidad	Densidad de ocurrencia	Litología
Qp	0.05-0.11	Rellenos y cubiertas gruesas de cenizas y pómez del Cuaternario
KTsb	0.04	Formación Subinal, capas rojas clásticas, areniscas, predominantemente Terciarias
Tv	0.01-0.03	Rocas volcánicas, predominantemente Mioceno y Plioceno, incluyen tobas, lavas, material lahárico y sedimentos volcánicos
I		Rocas plutónicas, incluyendo granitos y dioritas del pre-Pérmico, Cretácico y Terciario
CPsr		Rocas del Grupo Santa Rosa (Carbonífero-Pérmico) incluyendo lutitas, areniscas, conglomerados y filitas
Pc	0.01-0.02	Carbonatos de la Formación Chochal del Pérmico
JKts		Capas rojas de la Formación Todos Santos del Jurásico Superior-Cretácico Inferior
Pzm		Rocas metamórficas Paleozoicas: filitas, esquistos, gneises, mármol y migmatitas
Qv	0.01	Rocas volcánicas del Cuaternario, incluyendo coladas de lava, material lahárico, tobas y edificios volcánicos
Pi	<<0.01	Rocas ultra-básicas, predominantemente serpentinitas
Tsp		Rocas sedimentarias continentales del Terciario superior
Ksd		Carbonatos del Cretácico principalmente las Formaciones Cobán, Ixcoy, Campur

Fuente: elaboración propia.

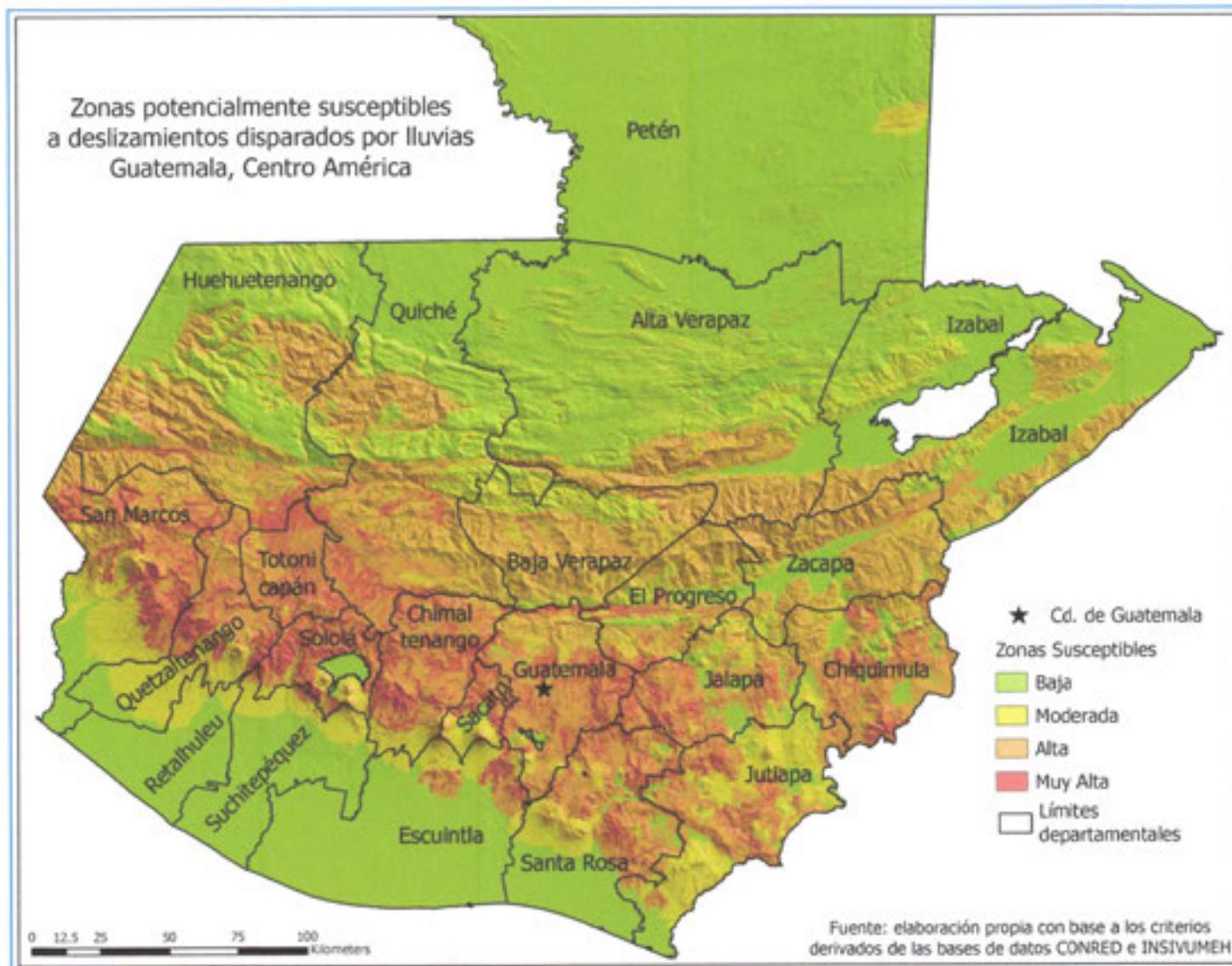


Figura 10. Zonas susceptibles a deslizamientos provocados por lluvias en la República de Guatemala.

Esta zonificación a la escala nacional puede servir de referencia para futuros análisis a escalas más detalladas y con datos geológicos y geotécnicos adicionales. La Tabla 2 muestra la proporción de territorio susceptible a deslizamientos en cada departamento del país remarcando (en rojo) aquellos con más del 50% del territorio con susceptibilidad alta y muy alta.

Tabla 2

Susceptibilidad a deslizamientos generados por lluvia en departamentos de Guatemala

Departamento	Extensión territorial (km ²)	Susceptibilidad a deslizamientos (% del territorio)				
		Baja	Moderada	Alta	Muy Alta	
Alta Verapaz	10,769	16.17	50.50	32.44	0.89	
Baja Verapaz	2,868	34.53	20.39	35.32	9.76	
Chimaltenango	1,865	2.90	51.28	31.15	14.67	
Chiquimula	2,410	30.90	27.96	14.41	26.73	
El Progreso	1,838	50.96	8.97	18.89	21.18	
Escuintla	4,507	32.21	29.14	29.22	9.43	
Guatemala	2,193	11.10	46.77	31.66	10.47	
Huehuetenango	7,360	30.80	16.00	28.64	24.56	53.20
Izabal	7,519	15.54	42.03	42.17	0.26	
Jalapa	2,034	26.70	30.89	11.76	30.65	
Jutiapa	3,314	7.38	22.04	22.48	48.10	70.58
Petén	35,980	86.23	12.92	0.85	----	
Quetzaltenango	2,132	35.26	9.09	9.75	45.90	55.65
Quiché	7,284	25.68	12.46	26.58	35.28	61.86
Retalhuleu	1,700	37.22	58.61	3.85	0.32	
Sacatepéquez	537	8.52	24.90	44.13	22.45	66.58
San Marcos	3,552	13.67	20.40	48.10	17.83	65.48
Santa Rosa	3,164	18.27	6.70	20.40	54.63	75.03
Sololá	1,040	1.92	24.39	8.38	65.31	73.69
Suchitepéquez	2,393	55.78	12.21	25.73	6.28	
Totonicapán	1,076	----	5.37	17.80	76.83	94.63
Zacapa	2,706	16.73	18.72	58.84	5.71	64.55

Fuente: elaboración propia.

Un análisis similar, aunque con criterios definidos a una escala local, fue realizado para la zona metropolitana central por Geopetrol (2007). En este caso, los resultados están basados no solo en el análisis de características geológicas y pendiente del terreno, sino también considerando la información de lluvia histórica y humedad propia del suelo en la zona. El mapa resultante se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos provocados por lluvia para la zona metropolitana de Guatemala (Geopetrol, 2007).

Los deslizamientos a lo largo de la historia reciente.

A juzgar por los reportes históricos, la ocurrencia de deslizamientos en la primera mitad del siglo XX podría haber estado fuertemente influenciada por dos factores: la ubicación y densidad de la red vial (incluyendo líneas férreas) y la densidad poblacional. Entre los años 1900 y 1922 solamente se reportan 4 deslizamientos en la base de datos del INSIVUMEH. Posiblemente la red carretera en los albores del siglo XX estaba

limitada a caminos de terracería y veredas. Por su parte, la población hasta 1921 era de solamente 2 millones de personas. Además, la posibilidad de reportar la ocurrencia de los eventos era posiblemente limitada por la carencia de tecnología de comunicación eficiente entre la zona rural y los medios periodísticos en la capital.

Los deslizamientos empiezan a ser consistentemente reportados a partir del año 1923 y empiezan a crecer en número y en recurrencia a partir de 1955 (ver Figura 12). Varios de los años con mayor ocurrencia se asocian con algún evento meteorológico extremo, como en 1949 (huracán categoría 4, sin nombre, 30 eventos), 1969 (huracán categoría 3, Francelia, 33 eventos) y 1978 (huracán categoría 4, Greta, 15 eventos). Sorprendentemente, en los dos años con mayor número de reportes de deslizamientos (1929 con 39 y 1936 con 48), no sucedieron eventos meteorológicos extremos. Por otro lado, muchos meteoros que impactaron al país no provocaron deslizamientos extensivos o catastróficos (ver eventos no-disparadores en Figura 12)³.

Entre los años 1960 y 1990 se incrementa considerablemente el número de reportes de deslizamientos. Durante dicho período se ubica el 60% del total de reportes (337 de 554). En dicho período parece marcarse una tendencia cíclica de ocurrencia de eventos máximos cada 9 años (1970, 1979 y 1988). Hay que hacer notar que a partir de 1960 la población total del país se incrementa en una proporción promedio de 1.6 millones por década.

Aunque el inventario histórico de deslizamientos se encuentra incompleto a partir de 1991 es posible observar que el número de eventos se ha incrementado en la última década (ver gráfica a partir del año 2000 en Figura 12). En este período se han contabilizado los daños provocados por el huracán Mitch (1998), las tormentas tropicales Stan (2005) y Agatha (2010) y la depresión tropical 12E (2011).

Durante el período 1900-1991 se reportaron alrededor de 310 personas fallecidas como consecuencia de deslizamientos, flujos de escombros (aludes) y caída de rocas. Este número podría ser significativamente más alto, ya que algunos reportes dan cuenta de casas destruidas o arrasadas por los movimientos de ladera, pero no especifican claramente si hubo personas fallecidas. El número de personas fallecidas se incrementa a partir del año 1949 con un máximo en 1969 debido al impacto del huracán Francelia. La mayor cantidad de fallecidos se reportan de la región occidental (151), seguido de la zona central, incluyendo el área metropolitana, con (145) y en menor cantidad la zona oriental (14). Un resumen de personas fallecidas a lo largo del siglo pasado se muestra en la Tabla 3.

³ La referencia de eventos meteorológicos extremos se tomó de las Rutas Históricas de Huracanes de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés) en <http://www.csc.noaa.gov/hurricanes/#>

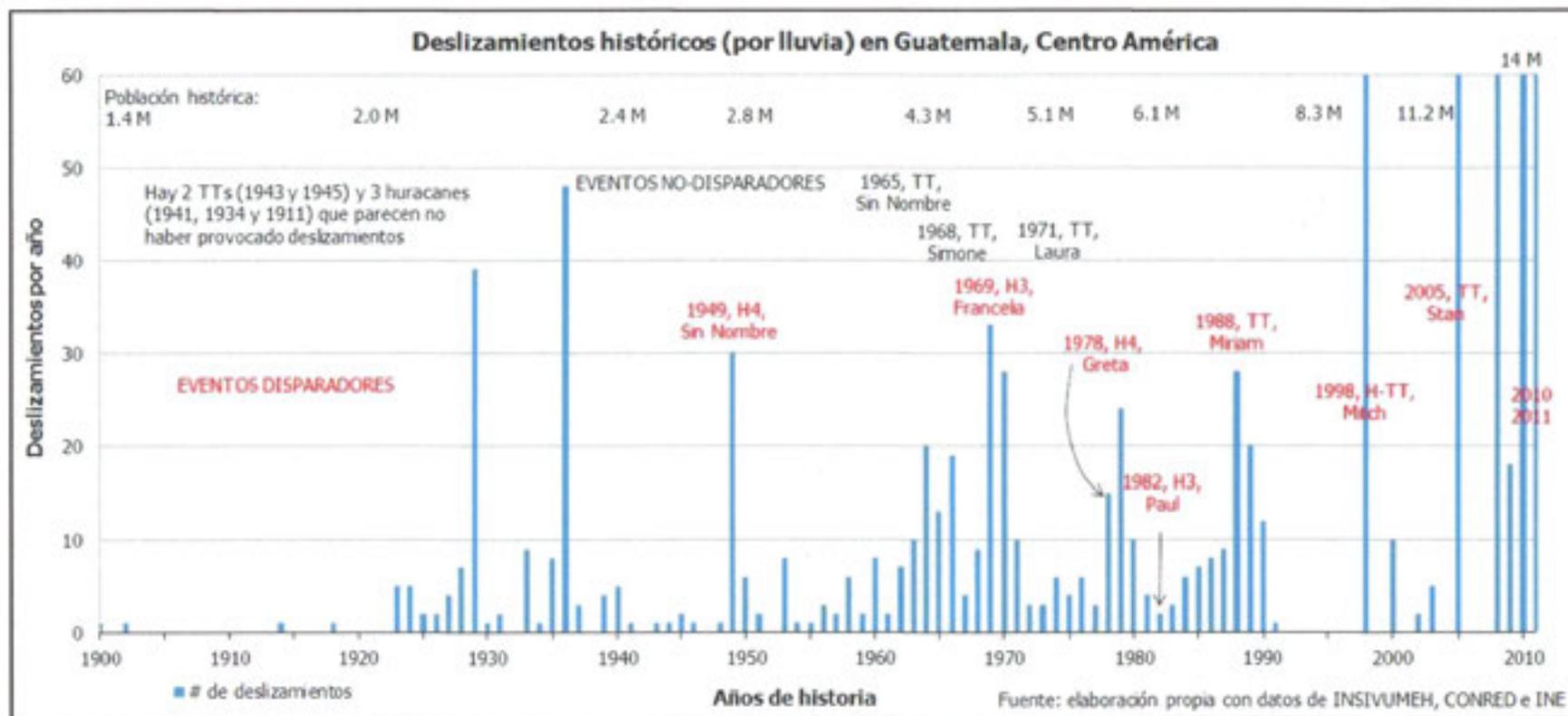


Figura 12. Distribución anual de los deslizamientos históricos en Guatemala (sin clasificar por tipo de movimiento o volumen desplazado). Las barras verticales indican número total de deslizamientos por año. Se incluye la información poblacional a lo largo del período (parte superior), eventos meteorológicos extremos que provocaron deslizamientos (eventos disparadores) y los que no provocaron (eventos no-disparadores). La información a partir de 1991 se muestra incompleta aunque evidenciando los eventos provocados por Mitch (1998), Stan (2005), Agatha (2010) y 12E (2011).

Tabla 3

Personas fallecidas debido a movimientos de ladera entre el período 1900-1991
Las casillas con suma de personas indican algún evento catastrófico relevante que se identifica con un exponente y se explica al pie de la tabla.

Región	Pre-1949	1949	Pre-1969	1969	Post-1969	Totales
		Huracán sin nombre		Huracán Francelia		
Occidente	7	31	13	23	40 ^b + 37 = 77	151
Central	10	22	13	45 ^a + 4 = 49	14 ^c + 37 = 51	145
Oriental	12	0	0	0	2	14
	29	53	26	72	130	310

Fuente: Deslizamientos Históricos, INSIVUMEH, 1991

Eventos catastróficos individuales.

a = Debido al huracán Francelia (1969) en Santa María de Jesús, Sacatepéquez

b = En 1987 en La Democracia, Huehuetenango

c = Debido a la tormenta tropical Miriam (1988) en la Zona Metropolitana

La lluvia como factor disparador de los deslizamientos.

Existe una correlación aceptable para Guatemala entre la ocurrencia de deslizamientos y la oscilación climática de El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés). La gráfica en la Figura 13 muestra el número de deslizamientos mensuales y la oscilación térmica en los océanos, años El Niño o La Niña, a partir de 1950 hasta finales del 2011.

Por un lado, se graficaron tormentas tropicales que no han provocado deslizamientos a gran escala (puntos negros). Estas sucedieron justo en el momento en que se registraba una transición desde la anomalía negativa en la temperatura del océano hacia la anomalía positiva (pendiente ascendente de la gráfica), es decir, de un océano frío hacia uno más tibio, El Niño.

Por el contrario, se observa que todos los eventos meteorológicos extremos que han ocasionado deslizamientos a gran escala (puntos rojos en la Figura 13) coinciden con la transición desde la anomalía positiva hacia la anomalía negativa, o justo en el punto más bajo de la anomalía negativa, La Niña (ver Francelia en 1969; Greta entre 1977-1978; Miriam entre 1987-1988; Mitch en 1998; Stan entre 2004-2006; Agatha y Mathew entre 2009-2010 y 12E en 2011).

Esta correlación se entiende como lógica, ya que en Guatemala, o Centro América en general, los años con predominancia de La Niña son los que han presentado mayores disturbios meteorológicos y por ende, mayor cantidad de lluvia (Banichevich and Lizano, 1998; Alfaro, 2000). Aunque la oscilación climática de El Niño es aparentemente exclusiva para el Océano Pacífico el aumento de tormentas disparadoras de deslizamientos parece darse tanto en el Pacífico como en el Mar Caribe.

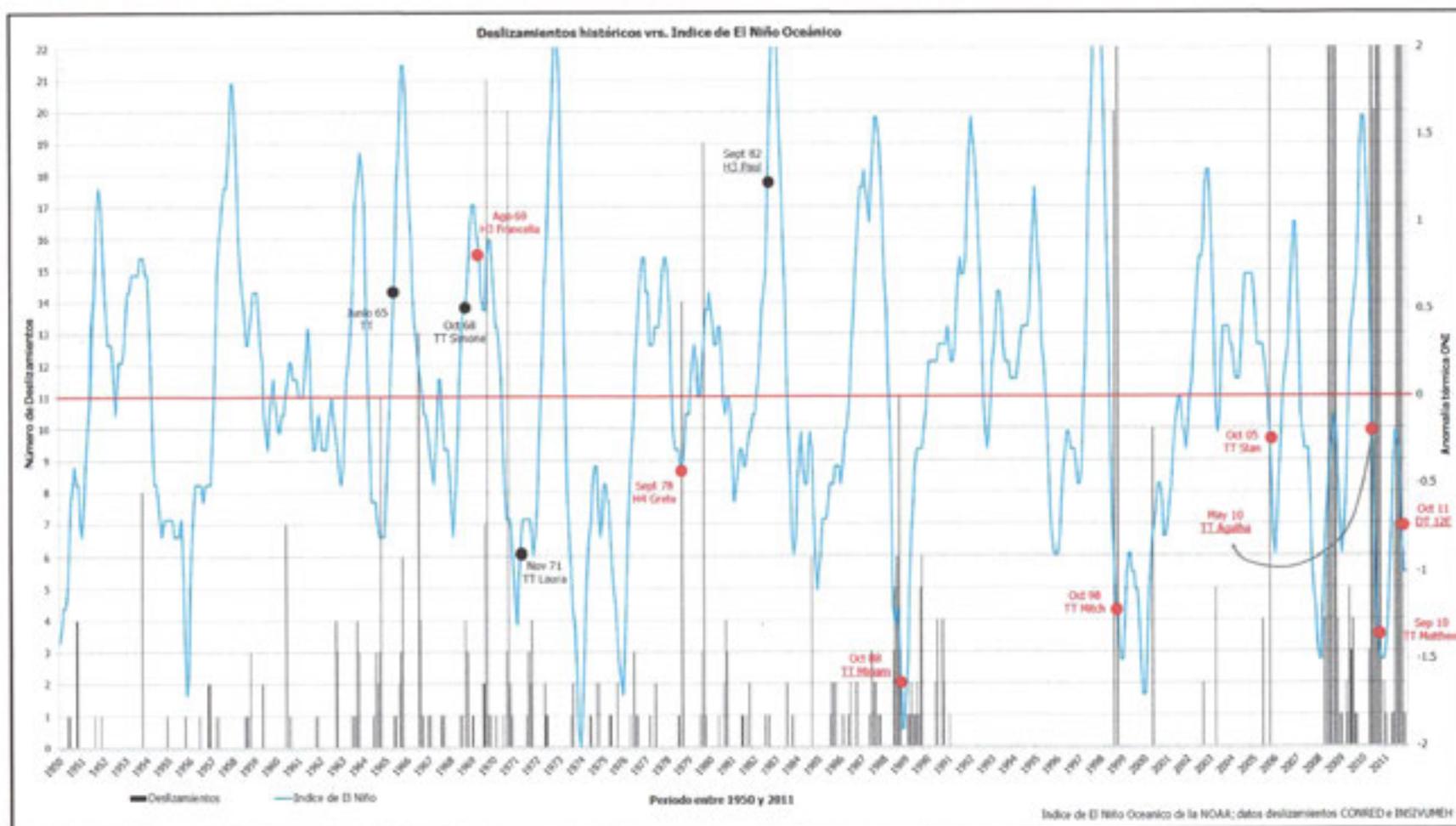


Figura 13. Ocurrencia de deslizamientos mensuales e Índice de El Niño Oceánico desde 1950 hasta 2011. Las barras verticales negras muestran el número de deslizamientos por mes en el período mencionado mientras que la gráfica azul indica las anomalías mensuales positivas (sobre la línea roja) o negativas (bajo la línea roja) en la temperatura promedio del mar. Puntos negros = eventos meteorológicos que generaron menos de 10 deslizamientos; Puntos rojos = eventos que generaron más de 10 deslizamientos. Los eventos meteorológicos subrayados ocurrieron en el Pacífico, el resto, en El Caribe.

A la escala anual, es posible derivar algunas consideraciones preliminares entre la ocurrencia de deslizamientos y el régimen de lluvias en Guatemala. En correspondencia con la distribución y acumulación de la lluvia a lo largo de la temporada invernal, la mayoría de deslizamientos suceden en los meses de septiembre y octubre (ver Figura 14). Durante la primera fase del invierno, suelen presentarse deslizamientos relevantes en los meses de junio y julio. Generalmente, con la ocurrencia de la canícula (últimas semanas de julio o primeras de agosto) disminuye la posibilidad de que se presenten los deslizamientos. La ocurrencia de tormentas tropicales o huracanes durante la primera fase del invierno es relativamente baja siendo más común su apareamiento a partir de agosto lo cual incrementa la ocurrencia de deslizamientos y flujos de escombros hacia la parte final del invierno.

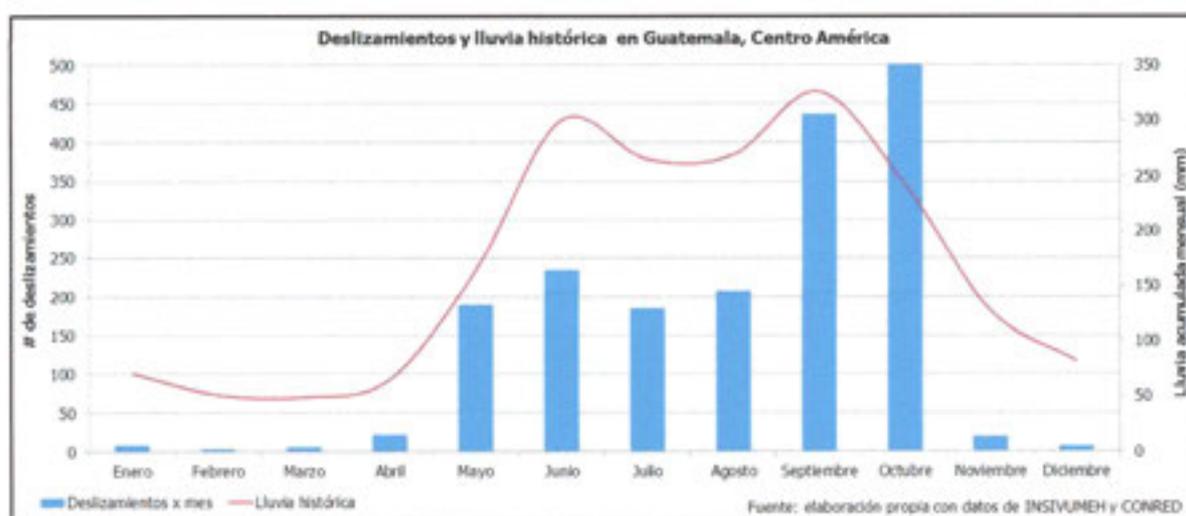


Figura 14. Frecuencia de deslizamientos históricos mensuales (barras verticales), y distribución de lluvia histórica mensual (línea roja).

Nótese la correspondencia entre los máximos de la curva de distribución de lluvia y el mayor número de deslizamientos, principalmente en la segunda fase del invierno.

Diversos autores han logrado establecer correlaciones directas entre la ocurrencia de deslizamientos con la intensidad y duración de la lluvia, la lluvia acumulada diaria y/o la lluvia antecedente al día del evento (Wieczorek, 1996; Chleborad et al., 2006; Guzzetti et al., 2008; Baum y Godt, 2009; Cepeda et al., 2012). Los resultados de estas correlaciones se conocen como "umbrales de lluvia" (acumulados y de disparo). Estos umbrales son criterios de gran valor cuando se diseñan programas de reducción de riesgos ante deslizamientos y, específicamente, para la implementación de mecanismos de monitoreo de lluvia y alerta temprana. Lamentablemente, la información disponible en Guatemala sobre lluvia y deslizamientos históricos no permite estimar dichas correlaciones y umbrales en forma confiable.

La distribución de lluvia diaria, mensual y anual es muy variada a lo ancho y largo del territorio guatemalteco. Como se discutió en secciones anteriores, la mayor acumulación de lluvia se da precisamente en los flancos de las grandes provincias montañosas y volcánicas, allí donde convergen abruptas pendientes con cambios de temperatura, y las grandes masas de humedad se convierten en abundantes nubarrones y copiosas tormentas. El acumulado de lluvia disminuye hacia la región central y oriental del país con algunos extremos en las Verapaces y sur del Petén (ver mapa en Figura 4). Esta dispar distribución de la lluvia dificulta aún más la estimación de umbrales de disparo para deslizamientos invernales en Guatemala.

Con la poca información disponible, sin embargo, fue posible reconocer algunos patrones o tendencias generales. En años "normales", es decir, sin la ocurrencia de huracanes o tormentas, los deslizamientos en el altiplano occidental del país parecen ocurrir a partir de los primeros días de septiembre, cuando se ha alcanzado una lluvia acumulada en el orden de los 1,100 milímetros en la zona de Quiché y los 1,400 milímetros en Huehuetenango (ver gráficas en Figuras 15 y 16). La lluvia reportada en los 3 días previos a la ocurrencia de los eventos analizados, conocida como lluvia antecedente, oscila entre los 30 a 90 milímetros mientras que "la lluvia de disparo", en el día de la ocurrencia, varía entre 25 a 90 milímetros.

Es de hacer notar que los gráficos de lluvia deben elaborarse con información de estaciones meteorológicas ubicadas en altitudes similares a las altitudes en donde ocurrieron los deslizamientos. En países tropicales como Guatemala, la cantidad de lluvia en una región en particular aumenta proporcionalmente a la altitud sobre el nivel del mar. Adicionalmente, las estaciones utilizadas en el presente estudio se ubican en un radio no mayor de 30 kilómetros alrededor de la zona de deslizamientos. En las gráficas se incluye la curva de estaciones cercanas, a diferente altitud, para mostrar la importancia de utilizar la estación a la altitud adecuada.

El caso de la zona central, incluyendo la región metropolitana, parece presentar un comportamiento un tanto diferente. Los deslizamientos pueden ocurrir a lo largo de toda la temporada invernal aunque son más marcados durante la segunda fase. La gráfica en la Figura 17 nos indica que en el año 1988 ocurrieron 5 deslizamientos en los primeros días de julio con una lluvia acumulada de alrededor de 600 milímetros y luego continuaron ocurriendo en los últimos días de agosto (4 eventos), de septiembre (6 eventos) e incluso octubre (2 eventos). La lluvia antecedente de 3 días en julio fue de 32 milímetros y la de disparo de 43 milímetros. Mientras que la lluvia antecedente de 3 días de los meses subsiguientes fue de 10, 39 y 79 milímetros, respectivamente con lluvias de disparo de 104, 59 y 48 milímetros, respectivamente.

Finalmente, los deslizamientos en la región oriental de Guatemala, aunque también entre agosto y septiembre, son disparados con lluvias acumuladas entre los 700 a 800 milímetros (ver gráfica en Figura 18).

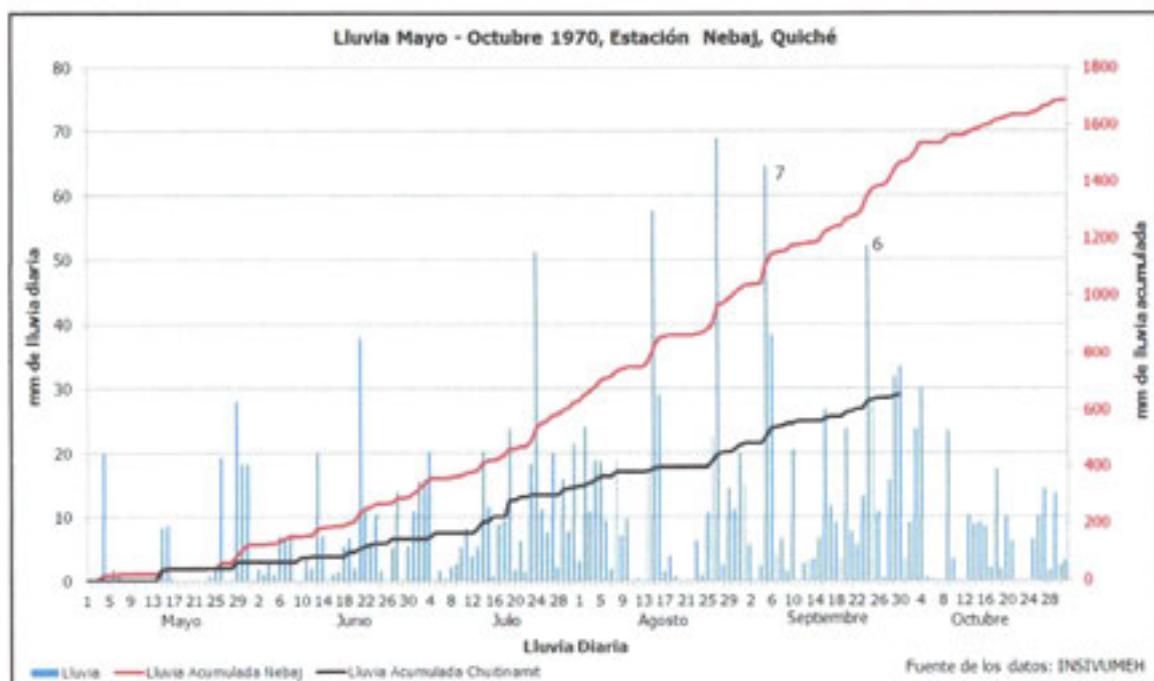


Figura 15. Gráfico de lluvia diaria (barras verticales) y lluvia acumulada (línea roja) durante el invierno de 1970 en la estación Nebaj, Quiché. El número de deslizamientos se muestra a un lado de la barra de lluvia diaria. La línea negra indica lluvia acumulada de la estación más cercana, aunque a diferente altitud.

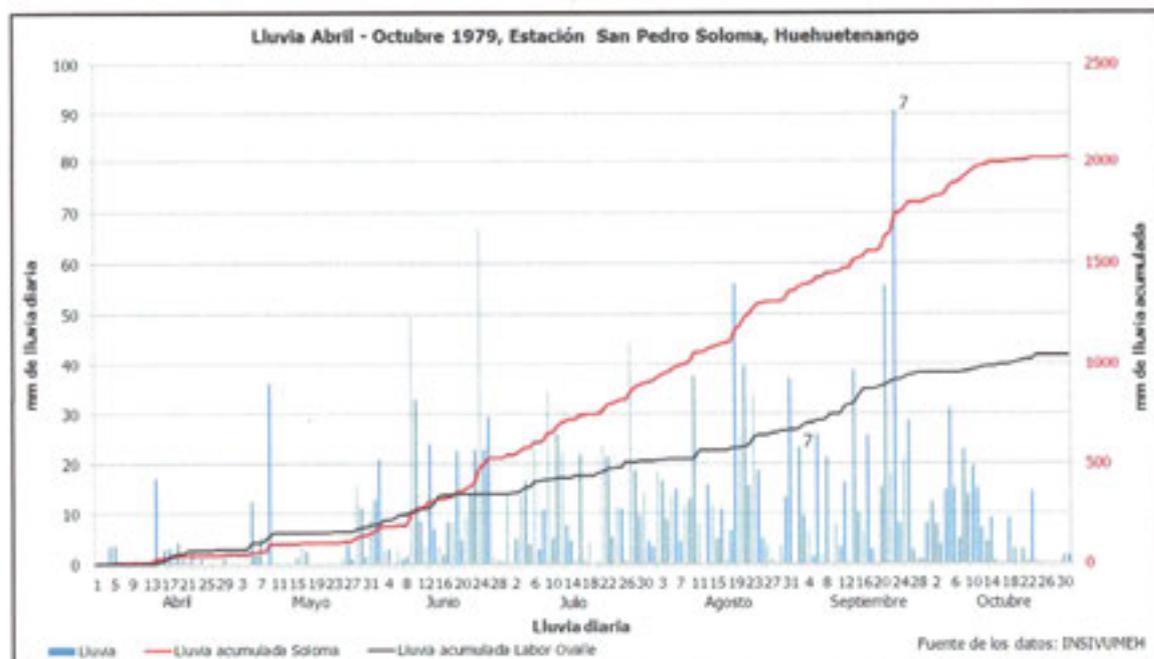


Figura 16. Gráfico de lluvia diaria (barras verticales) y lluvia acumulada (línea roja) durante el invierno de 1979 en la estación San Pedro Soloma, Huehuetenango. El número de deslizamientos se muestra a un lado de la barra de lluvia diaria. La línea negra indica lluvia acumulada de la estación más cercana (Labor Ovalle, Olinstepeque).

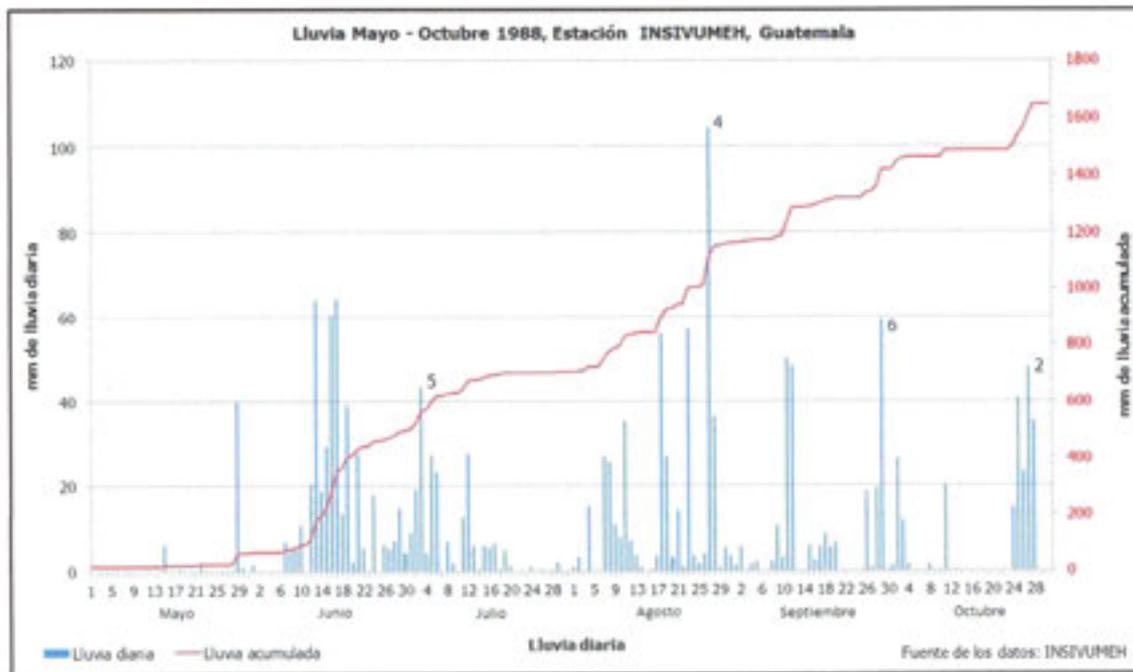


Figura 17. Gráfico de lluvia diaria (barras verticales) y lluvia acumulada (línea roja) durante el invierno de 1988 en la estación INSIVUMEH, Guatemala. El número de deslizamientos se muestra a un lado de la barra de lluvia diaria.

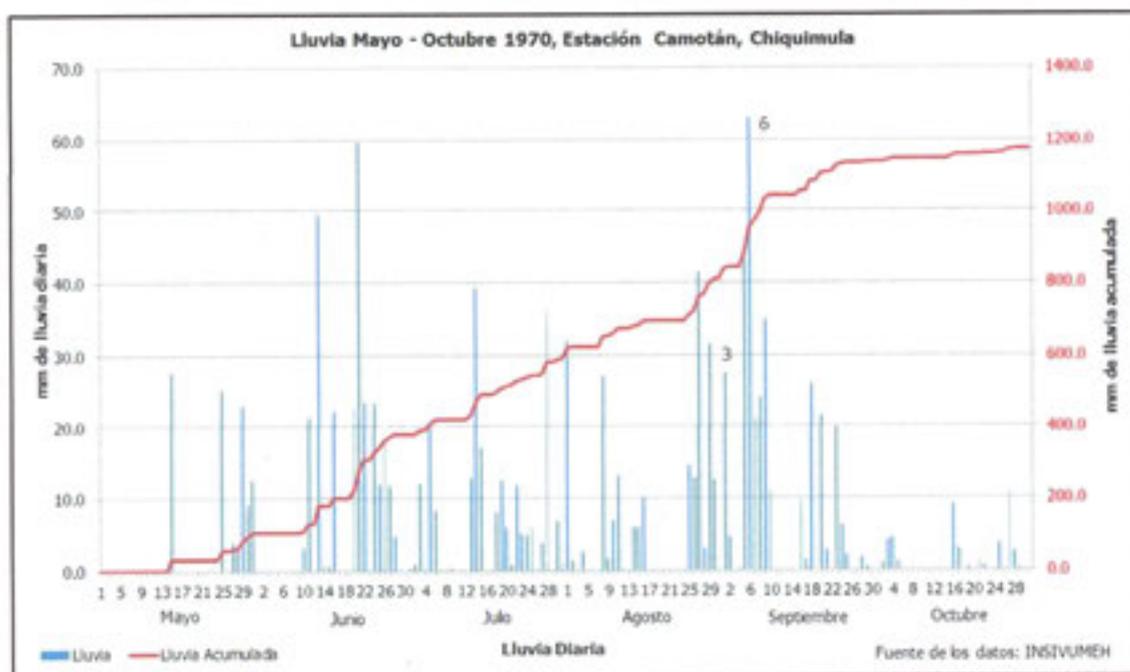


Figura 18. Gráfico de lluvia diaria (barras verticales) y lluvia acumulada (línea roja) durante el invierno de 1970 en la estación Camotán, Chiquimula. El número de deslizamientos se muestra a un lado de la barra de lluvia diaria.

Deslizamientos asociados a eventos meteorológicos extremos.

El 56% de los registros recientes en la base de datos de CONRED (791 deslizamientos) se relacionan con 7 eventos meteorológicos extremos. Sobresale el año 2010, particularmente activo, con 5 de estos eventos meteorológicos. Sorprendentemente, los dos únicos eventos catalogados como huracanes (Alex y Frank) fueron los que provocaron la menor cantidad de deslizamientos. En la Tabla 4 se incluye un resumen de los deslizamientos asociados con estos meteoros, mientras que en el mapa de la Figura 19 se muestra la distribución espacial de dichos deslizamientos.

Tabla 4

Deslizamientos asociados con eventos meteorológicos extremos en Guatemala entre los años 2008 y 2011

Evento	Fecha de ocurrencia	Número de deslizamientos	Afectación
DT-16	Octubre 2008**	24	Sur de Petén, 5 municipios de Quiché, Izabal y Alta Verapaz
TT Agatha	29 mayo – 16 junio 2010*	490	En 17 de 22 departamentos
H2 Alex	25 junio – 19 julio 2010*	6	Chimaltenango, Sololá y Quetzaltenango
H1 Frank	22 agosto – 15 Septiembre 2010*	6	En Baja Verapaz y Guatemala
TT Mathew	24 – 26 Septiembre 2010**	25	En Huehuetenango
DT-11E	Septiembre – Octubre 2010**	46	Principalmente en Sololá, San Marcos y Chimaltenango
DT 12-E	12 – 19 Octubre 2011**	194	En 13 departamentos del país

Fuente: Base de datos de incidentes, CONRED, 2012

* Fechas reportadas por el sitio de huracanes de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés) en <http://www.csc.noaa.gov/hurricanes/#>

** Fechas reportadas por la CONRED

DT = Depresión Tropical; TT = Tormenta Tropical; H = Huracán (categorías 1 y 2)

Las lluvias generadas por los disturbios meteorológicos del Caribe (DT-16 y Mathew) parecen ocasionar deslizamientos más hacia la parte centro-occidental y altiplano occidental del país, mientras que los deslizamientos provocados por las lluvias que entran desde las tormentas del Pacífico (Agatha, 11E y 12E) se distribuyen en una amplia banda desde el occidente hasta el oriente de Guatemala. Esta amplia distribución de los deslizamientos originados por tormentas pacíficas es particularmente más evidente con Agatha y 12E que tuvieron una trayectoria casi perpendicular a la línea costera, lo cual, en su interacción con la cadena volcánica en dirección este-oeste, podría provocar mayor amplitud de las bandas lluviosas.

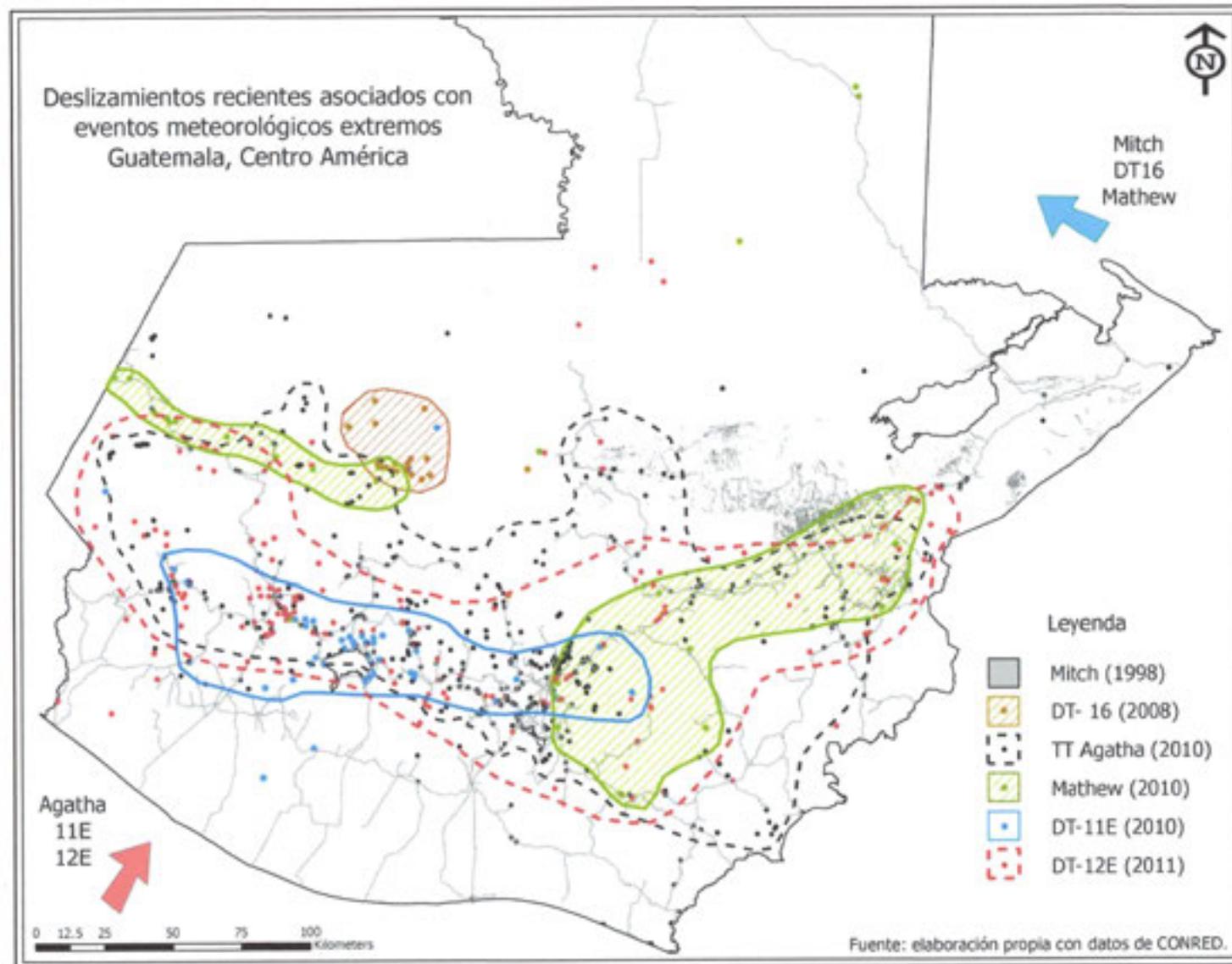


Figura 19. Distribución regional de deslizamientos 2008-2011 provocados por eventos meteorológicos extremos. Las flechas indican los eventos originados en el Océano Pacífico (flecha roja) o Mar Caribe (flecha azul).

En ambos casos, la amplia o reducida distribución de los deslizamientos en el territorio afectado también parece estar relacionada con la "magnitud" de cada evento meteorológico. Mientras las depresiones tropicales afectan a una extensión más reducida, las tormentas tropicales y huracanes parecieran tener más amplitud de cobertura debido posiblemente al tamaño de las bandas de lluvia. La velocidad de desplazamiento del meteoro también podría ser un factor crítico en la distribución espacial de los eventos.

Aparentemente, otro factor determinante en la ocurrencia de deslizamientos es la cantidad y distribución temporal de la lluvia acarreada por cada fenómeno meteorológico. En 3 días, Agatha registró lluvias acumuladas de 863 mm en la zona oriental; 1,087 en el Pacífico sur-occidental y entre 600 a 800 en el altiplano occidental, provocando alrededor de 490 deslizamientos. Mientras que la 12E registró, en un período de 7 días, 808 mm en el oriente, 650 mm en el Pacífico y entre 300 a 400 mm en el altiplano con solamente 194 eventos en total. Por otro lado, falta estudiar más a fondo el efecto de la litología o características geotécnicas de los materiales sobre la ocurrencia de deslizamientos de amplia distribución. La distribución espacial de la lluvia relacionada con la Tormenta Tropical Agatha se muestra en la Figura 20.

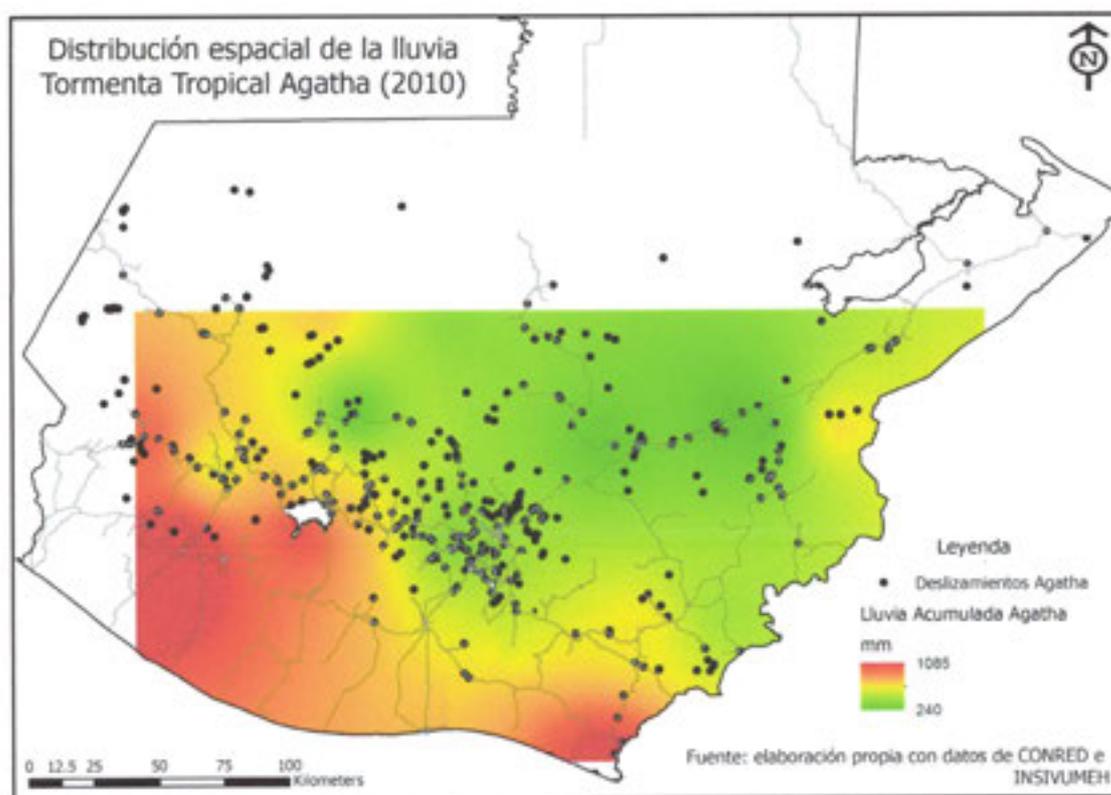


Figura 20. Distribución espacial de la lluvia acumulada de la tormenta tropical Agatha entre los días 29 de mayo y 3 de junio del 2010.

Como se mencionó anteriormente, el invierno del año 2010 fue particularmente copioso y abundante en deslizamientos. La gráfica en la Figura 21 muestra la distribución de la lluvia durante el invierno 2010 en la zona de Sololá donde se alcanzó una lluvia acumulada de 2,538 milímetros al 31 de octubre (un 48% más que en el año 2005 – el año del huracán Stan con 1,709 milímetros). En dicho período y región sucedieron 492 deslizamientos, sobresaliendo aquellos relacionados con la Tormenta Tropical Agatha (281) y con la Depresión Tropical 11-E (27).

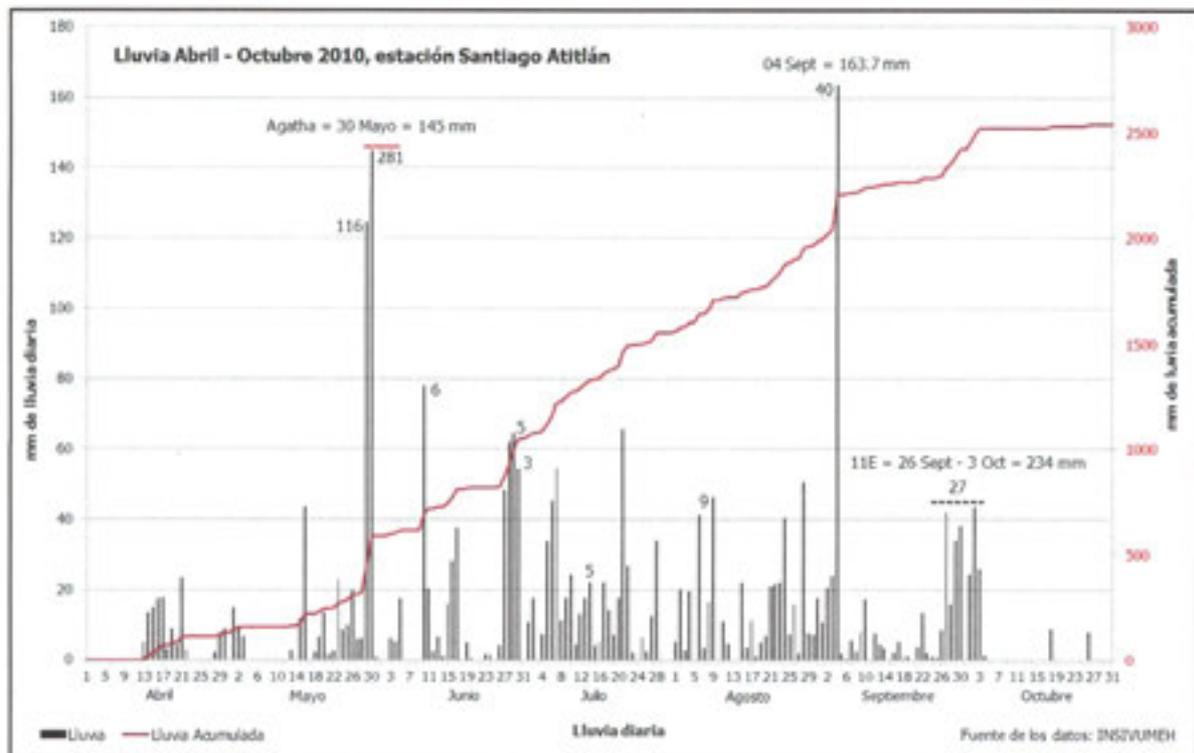


Figura 21. Gráfico de lluvia diaria (barras verticales) y lluvia acumulada (línea roja) durante el invierno del 2010 en la estación Santiago Atitlán, Sololá. Se indica la lluvia crítica de TT Agatha el 30 de mayo y la de 11E entre septiembre y octubre.

En adición a los eventos ya mencionados, en la última década han sucedido deslizamientos catastróficos individuales que han cobrado la vida de al menos 182 personas y han causado extensos daños materiales. Estos eventos han sido generados tanto por lluvias de eventos extremos o de tormentas locales. Sobresale la abundancia de flujos de escombros asociados con lluvias de alta intensidad. Como puede observarse en la Tabla 5, estos eventos catastróficos pueden ocurrir indistintamente en la primera o segunda fase del invierno. La fotografía en la Figura 22 muestra uno de los más recientes de estos deslizamientos catastróficos.

Tabla 5
Deslizamientos catastróficos en Guatemala (1998-2010)

Lugar	Fecha de ocurrencia	Descripción	Daños e impacto
Santa Cruz del Quiché	26 agosto 1998	Alrededor de 20 deslizamientos alrededor del poblado de Chujuyub	Personas fallecidas, pérdidas agrícolas y daños al sistema de agua comunitario
Senahú	30 mayo 2000	10 flujos de escombros en el Barrio El Calvario	13 personas fallecidas y varias casas destruidas
San Lucas Tolimán	12 septiembre 2002	Flujo de escombros originado en el volcán Tolimán con impacto en el poblado El Porvenir	31 personas fallecidas, 15 casas destruidas y 30 personas heridas
San Pedro Sacatepéquez	23 abril 2003	Deslizamientos, flujos de escombros y caída de rocas en el poblado de San Francisco Chichicaste	22 personas fallecidas, varias casas destruidas y daños en infraestructura comunitaria
Senahú	15 junio 2005	Flujos de lodo y escombros en la zona urbana	24 personas fallecidas y varias casas destruidas
La Unión	24 julio 2008	Detalles en sección anterior	
San Cristóbal Verapaz	04 enero 2009		
Tecpán & Nahualá	04 septiembre 2010	Dos deslizamientos catastróficos en los kilómetros 81 y 171 de la carretera Interamericana	Bus soterrado (12 personas fallecidas y 20 heridas) en Tecpán (km 71) y 27 fallecidos en Nahualá (km 171), incluyendo rescatistas de comunidades locales
Santa Cruz Barillas, Huehuetenango	20 septiembre 2011	Gran deslizamiento de rocas y lodo en Aldea El Manantial (±250 metros de largo)	11 personas fallecidas, 5 viviendas destruidas

Diversas fuentes periodísticas e informes de CONRED.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS: consideraciones e implicaciones.

La revisión y análisis de información histórica sobre deslizamientos en Guatemala exhibe diversas consideraciones y aspectos de interés. Ha sido una investigación que utiliza datos e información de diferentes disciplinas y temas, principalmente las bases de datos y colecciones del INSIVUMEH y CONRED, coberturas geográficas, topográficas y geológicas del IGN e información demográfica del INE. Aunque por diversas razones las series de datos no están completas, no tienen una estandarización específica o no se encuentran a la escala apropiada han sido el insumo más importante para el logro de los objetivos trazados.



Figura 22. Vista del deslizamiento en Sta. Cruz Barillas (20-Sep-2011). Este tipo de movimiento de ladera es muy común en las zonas montañosas del altiplano. Casi siempre se origina de un deslizamiento inicial de tamaño moderado que luego se convierte en una masa que fluye con rapidez por el alto contenido de humedad (Foto de Prensa Libre).

Los resultados de esta investigación pretenden crear las bases para promover una investigación más activa y constante en el tema de la ocurrencia de deslizamientos en Guatemala que se sustente en una recolección sistemática de información incluyendo los inventarios de eventos, la información de lluvia y la caracterización de daños e impactos a diferentes escalas.

Solamente con un compromiso integral entre instituciones, grupos académicos y expertos temáticos se logrará alcanzar la tan deseada reducción de riesgos a desastres que se enfoque en la protección de vida de las familias vulnerables y en la conservación de la escasa infraestructura para el desarrollo, que tanto esfuerzo y recursos cuestan al país. A continuación un resumen de los resultados más relevantes de la investigación.

¿Dónde suceden los deslizamientos en Guatemala?

El territorio propenso a la ocurrencia de deslizamientos en Guatemala es extenso y cubre una amplia porción del país. Ya sea por el efecto de eventos meteorológicos originados en el Océano Pacífico o en el Mar Caribe o por las lluvias convectivas "normales" de la temporada invernal, prácticamente todos los departamentos de Guatemala, con excepción de Petén, presentan mayor o menor grado de riesgo a deslizamientos. Evidentemente, la gran región cordillerana occidental-oriental, la cadena volcánica, los empinados taludes y barrancos de la zona metropolitana y los macizos montañosos de las Verapaces son las zonas con mayor susceptibilidad al movimiento de laderas.

Las posibilidades de reducir los impactos de alguna amenaza en particular dependen del conocimiento de la dinámica, ocurrencia y particularidades del mismo fenómeno. Así como una persona adulta con altos niveles de colesterol, sobrepeso y presión alta tomaría sus precauciones para evitar un accidente cardiovascular así también las regiones en alto riesgo ante deslizamientos en Guatemala deben contar con mecanismos y acciones que reduzcan los posibles daños en la época invernal.

Uno de los factores críticos en cuanto a la ocurrencia de deslizamientos es la pendiente. Luego de un análisis geo-estadístico realizado por Coe y colaboradores (2004) en el oriente de Guatemala se determinó que entre el 70 y 90% de los deslizamientos ocurren en zonas con pendientes entre 16 y 44 grados. Aunque en dicha investigación no se analizaron las propiedades de las unidades geológicas como factor de ocurrencia se determinó que la pendiente y la altitud, esta última como factor de control de la precipitación, predisponen al terreno a la inestabilidad. Basado en observaciones de deslizamientos en la región central y occidental del país es posible inferir que a partir de los 20° de pendiente la susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos aumenta proporcionalmente (datos personales del autor). Así pues, todas aquellas comunidades, viviendas, edificios públicos e infraestructura ubicada en un terreno con más de 16 a 20° de pendiente presentan riesgo a deslizamientos.

A escala nacional, las unidades geológicas más susceptibles a deslizarse ante condiciones de lluvia excesiva son los depósitos a lo largo de la cadena volcánica que incluyen los potentes paquetes de cenizas y pómez, lavas fracturadas, depósitos de antiguos lahares y brechas volcánicas, tobas no soldadas y otros depósitos como tefra, lapilli y suelos volcánicos residuales. Esta secuencia de rocas volcánicas aflora a todo lo ancho del país, en dirección este-oeste, más abundantemente, en la parte centro-occidental (ver mapa geológico en Figura 3). En la región oriental del país, los depósitos clásticos de la Formación Subinal y las rocas metamórficas del Paleozoico son las que presentan las más altas susceptibilidades a los movimientos de ladera. La ubicación de viviendas o infraestructura sobre este tipo de litología presupone entonces cierto riesgo a sufrir impactos ante deslizamientos invernales.

Aunque en la presente investigación no fue analizado y ponderado el efecto de la actividad humana sobre la susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos es bastante evidente, y lamentable, que los cortes y taludes en la red de carreteras y caminos vecinales los que más sufren los efectos de los mismos. De igual manera, aquellas zonas de laderas y barrancos en las áreas periféricas de ciudades intermedias y grandes resienten los efectos de los deslizamientos en un ambiente de hacinamiento, técnicas constructivas y planificación urbana inexistente, falta de sistemas de drenajes y manejo de aguas pluviales y, en general, desarrollo precario y falta de servicios básicos. En menor grado, las canteras y zonas de minado artesanal ilegal y sin un manejo técnico son otros de los sitios en donde suceden deslizamientos y colapsos de taludes en forma alarmante. En la siguiente página, en la Figura 23 se muestran una serie de fotografías que muestran algunos ejemplos mencionados en esta sección.



Deslizamientos en zonas residenciales en zona 18 (izquierda) y 12 (derecha). No se incluyen los ejemplos a manera de diagnóstico sino con fines meramente ilustrativos. Fotografías proporcionadas por la Ing. Wilma de León.



Caída de rocas (izquierda) y desprendimiento (derecha) en carreteras. Nótese el tamaño de la roca y del talud en relación con los vehículos. En los últimos inviernos, la carretera Interamericana ha sido de las más golpeadas por estos fenómenos, curiosamente, justo después de los trabajos de ampliación. Ambas fotos por M.Barillas



Deslizamientos someros en laderas abruptas en los alrededores del asentamiento Las Torres, zona 3, Ciudad de Guatemala. Foto M.Barillas

Figura 23. Ejemplos de deslizamientos en zonas de alta actividad e influencia humana.

La alerta a poblaciones en riesgo: ¿Que hacer y cuando hacerlo?

Con base a la escasa información disponible, ha sido posible estimar una primera propuesta de lluvia antecedente que sirva como referencia para posibles alertas a poblacionales en las áreas susceptibles a deslizamientos en Guatemala. Estas estimaciones no deben ser consideradas como "umbrales" de disparo, sino son una primera referencia sobre la posibilidad de ocurrencia de movimientos de laderas. Es necesario recalcar que estos valores están referidos a condiciones "normales" de invierno, sin la influencia de ningún evento meteorológico extremo (depresiones o tormentas tropicales o huracanes) ya que la ocurrencia de estos meteoros altera completamente el escenario de inestabilidad del terreno.

Los 600 milímetros de lluvia acumulada marcarían el inicio de "la temporada" de deslizamientos a lo largo de las zonas más susceptibles (ver mapa en Figura 21). Según los registros históricos, este valor puede alcanzarse a partir del mes de julio. Posteriormente, cuando se alcanzan los 1,000 milímetros de lluvia acumulada es cuando se empezarán a presentar los deslizamientos individuales o las familias de deslizamientos que afectan zonas o regiones relativamente amplias del territorio. Dependiendo de la zona, este valor puede alcanzarse a partir de la segunda semana de agosto. Desde el punto de vista de alertamiento temprano estos dos valores de lluvia podrían ser incorporados en los procedimientos de monitoreo ya existentes.

A partir de los 1,000 milímetros la ocurrencia de deslizamientos podría depender de condiciones más localizadas de duración e intensidad en la precipitación. La revisión de los datos históricos sugiere que a partir de este valor de precipitación inicia la fase de mayor ocurrencia de deslizamientos entre los meses de septiembre y octubre. Por ejemplo, en áreas como la zona metropolitana, una tormenta de 30 o 40 minutos de duración que descargue un aproximado de 40 a 50 milímetros de lluvia normalmente origina deslizamientos masivos, aunque someros, en los barrancos más pronunciados (Geopetrol, 2007). Idealmente, a este nivel de precipitación, la toma de decisiones para posible alertamiento de poblaciones debería también acompañarse de observaciones directas del comportamiento del terreno y la estabilidad de las laderas. La posibilidad de ocurrencia de deslizamientos será mayor en aquellas laderas que muestren altos niveles de saturación o escurrimiento de agua, donde ya se empiezan a observar pequeños desprendimientos de material o donde se observan agrietamientos prominentes.

En el caso de eventos meteorológicos extremos, la inestabilidad de las laderas puede alcanzarse en períodos relativamente cortos de tiempo. Se ha estimado que durante las intensas lluvias del huracán Stan en el altiplano occidental la mayor cantidad de deslizamientos sucedieron a lo largo del día 5 de octubre cuando la estación pluviográfica del INSIVUMEH en Santiago Atitlán registró alrededor de 155 milímetros de lluvia en un período de 17 horas (promedio de 9.12 mm/hora) – CORDILLERA, 2006. Lamentablemente no se cuenta con registros de otras tormentas para afinar un parámetro más preciso ante eventos de lluvia de alta intensidad.

Con el propósito de aportar elementos y criterios para el alertamiento de poblaciones vulnerables a deslizamientos durante la época invernal se propone el flujograma de alertamiento de la Figura 23. Se visualizan dos grandes escenarios de ocurrencia de deslizamientos: el generado por lluvias de invierno "normal" y el generado por lluvias de invierno con la influencia de eventos meteorológicos "extremos" (depresiones o tormentas tropicales y huracanes). Para cada escenario se proponen acciones generales de aplicación a nivel nacional. Las decisiones de alertamiento poblacional o evacuación preventiva deben tomarse al nivel municipal, entre los actores correspondientes, y con la base de observaciones en el terreno. Los datos de lluvia incluidos en el flujograma no son "umbrales de disparo" sino meramente valores de referencia.

Los terremotos como factor generador de deslizamientos.

Aunque menos recurrentes, los terremotos son factores de disparo de deslizamientos de mucha trascendencia en la región centroamericana, y particularmente en Guatemala. Sin ser el tópico central de la presente investigación, es necesario recordar algunos antecedentes sobre este tipo de movimientos. Tal como lo describe Bommer y Rodríguez (2002), los grandes deslizamientos en Santa Tecla y San Vicente provocaron la gran mayoría de las personas fallecidas durante los terremotos del 2001 en El Salvador. Alrededor de 10,000 deslizamientos fueron provocados por el terremoto de magnitud 7.5 Richter que afectó Guatemala el 4 de febrero de 1976. Tres de los deslizamientos más grandes asociados a dicho evento cobraron la vida de al menos 36 personas (Harp et al., 1981). Existen también registros de al menos 200 personas fallecidas debido a un deslizamiento de gran tamaño provocado por el terremoto del 10 de octubre de 1986 en la zona de Santa Marta, San Salvador (Bommer y Ledbetter, 1987; Rymer, 1987 en Bommer y Rodríguez, 2002). El terremoto del 7 de Noviembre del 2011 en Guatemala provocó daños considerables a construcciones antiguas en el departamento de San Marcos pero, sorprendentemente, no generó deslizamientos notables.

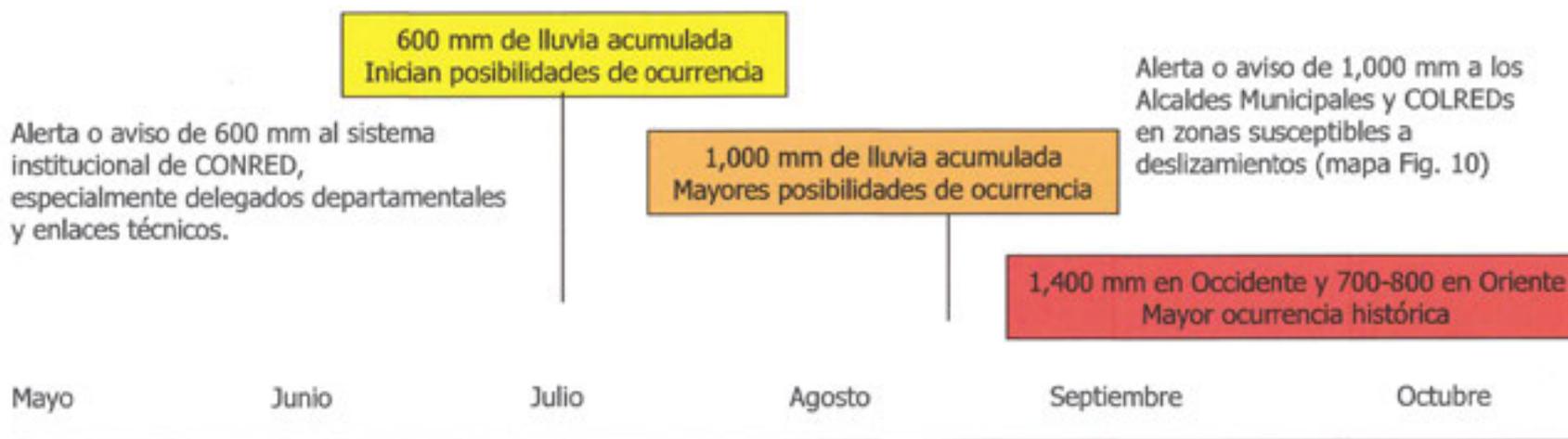
Caída de rocas en el tramo carretero de Los Chorros, El Salvador luego del terremoto de Enero 2001 – Foto M. Barillas.



Figura 24. FLUJOGRAMA DE POSIBLES ACCIONES DE ALERTA ANTE DESLIZAMIENTOS INVERNALES

DESLIZAMIENTOS CON LLUVIAS DE INVIERNO "NORMAL"

El monitoreo de lluvia se realiza a lo largo de la temporada invernal dando preferencia a las estaciones que transmiten en tiempo real vía internet o aquellas que reportan vía radio a través de un operador.



DESLIZAMIENTOS CON LLUVIAS DE EVENTOS METEOROLÓGICOS "EXTREMOS"

Los eventos meteorológicos extremos pueden generar deslizamientos **en cualquier momento del invierno**. Eventos tempraneros como Agatha a finales de Mayo del 2010 provocaron gran cantidad de deslizamientos catastróficos.

EVENTOS GENERADOS EN LA CUENCA DEL CARIBE: dependiendo de la magnitud (depresión, tormenta o huracán) afectarán con mayor severidad a municipios y comunidades del centro y occidente del país (Huehuetenango, San Marcos, Quetzaltenango, Sololá, Totonicapán, Quiché, Sacatepéquez y Chimaltenango).

EVENTOS GENERADOS EN EL OCÉANO PACÍFICO: además del centro y occidente, estos eventos parecen afectar zonas más extensas como los flancos volcánicos y laderas empinadas de Suchitepéquez, Escuintla, Guatemala, Santa Rosa, Chiquimula y Jutiapa.



Deslizamiento en secuencia pomácea-piroclástica (izquierda) en carretera de El Salvador luego del terremoto de Enero 2001 – Foto y Rafael Rodríguez, USGS. A la derecha, deslizamiento combinado con flujo de escombros en zona residencial de Santa Tecla generado por el mismo evento sísmico – Foto tomada de publicación en www.science.com

El camino por recorrer.

La precisión y extensión de los resultados de una investigación basada en registros históricos depende directamente de la existencia de dichos registros en suficiente cantidad y calidad. Lamentablemente, los inventarios de deslizamientos en Guatemala están incompletos, contienen información heterogénea y las fuentes de la información original no son confiables, principalmente las fuentes periodísticas. La confiabilidad aquí comentada no riñe con la veracidad del evento reportado, sino más bien se refiere a la falta de detalles técnicos, ubicación geográfica precisa y la fecha de ocurrencia de cada evento. La base de datos del INSIVUMEH abarca el período 1900 a 1991 mientras que la de CONRED cubre solamente del 2008 al 2011 dejando un largo vacío de 17 años sin información. De ahí la urgente necesidad de contar con un registro técnico sistemático de los movimientos de ladera en el país que incluya detalles sobre el tipo de movimiento, dimensiones y volúmenes de material, fecha y hora de ocurrencia y ubicación geográfica. Paralelamente, las bases de datos con información de lluvia deberán mantenerse actualizadas, idealmente incluyendo datos horarios de estaciones pluviográficas y la cobertura de la red de monitoreo meteorológico debería ser amplia, constante y robusta.

La reducción de riesgos a desastres por deslizamientos parece ser una tarea integral y de compromiso multi-institucional. La reforestación y conservación de suelos seguramente contribuirían a una mayor estabilidad de las laderas. La influencia de la actividad humana a través de las canteras ilegales de extracción de materiales de construcción, los cortes inapropiados en laderas para la ubicación de viviendas o el

avance de la frontera agrícola debe ser regulada y controlada. Las leyes nacionales y regulaciones municipales, principalmente los Planes de Ordenamiento Territorial, deben incluir criterios y recomendaciones para evitar el desarrollo de áreas habitacionales, infraestructura crítica o edificios públicos en áreas de ladera o cercanas a taludes inestables. La reciente construcción o ampliación de algunos de los ramales primarios de la red vial son un ejemplo de cómo la planificación y la ingeniería deben enfatizar en el diseño de taludes y medidas de mitigación contra deslizamientos en zonas específicas del territorio (el tramo Tecpán-Los Encuentros en la Ruta Interamericana, por ejemplo, genera una cuantiosa inversión de recursos por reparaciones y reconstrucciones debido a deslizamientos, socavamientos y hundimientos).

Una de las estrategias para minimizar la pérdida de más vidas humanas por el impacto de deslizamientos en Guatemala debería ser a través del diseño e implementación de un Sistema Nacional de Alerta Temprana ante Deslizamientos que conjunte todas las capacidades ya existentes en el país. Tanto los instrumentos meteorológicos del INSIVUMEH como la red de monitores comunitarios de CONRED pueden sumar esfuerzos en la búsqueda de la protección de la vida de las personas. Quizás un **Centro Nacional de Monitoreo de Amenazas** pueda ser el mecanismo que el tema SAT necesita en el país no solo para temas de deslizamientos, sino extendido a fenómenos de inundaciones, incendios forestales y sequías.

CONCLUSIONES.

Sobre los registros y tendencias históricas.

- La distribución de deslizamientos históricos contenidos en las bases de datos del INSIVUMEH y la CONRED siguen patrones más o menos definidos a lo largo de carreteras principales y centros poblados. Una buena parte de eventos se ubican a lo largo de la carretera al Atlántico y el ramal que enfila hacia la zona fronteriza con Honduras, en la carretera Interamericana hacia el occidente del país y el ramal que corre hacia Huehuetenango. También se observan algunos grupos de deslizamientos en las carreteras que conectan la Planicie Costera del Pacífico con la zona montañosa central, de Cocales hacia Sololá, de Retalhuleu hacia Quetzaltenango y de Coatepeque hacia San Marcos. Algunos otros deslizamientos se ubican a lo largo de la cadena volcánica y las grandes serranías del altiplano occidental y central del país. También se observan "*clusters*" de deslizamientos en la zona montañosa fronteriza con Honduras y en áreas de fuertes pendientes en Las Verapaces y Quiché (Figura 6). El 20% de los incidentes reportados en la base de datos de la CONRED se ubican en la jurisdicción del departamento de Guatemala.

- Aparentemente, los deslizamientos han ido creciendo en número, frecuencia y magnitud en paralelo con el crecimiento poblacional y el desarrollo socio-económico del país. Indudablemente, los deslizamientos más relevantes y catastróficos de los últimos tiempos han estado ligados a eventos meteorológicos extremos: Mitch, Stan, Agatha y 12-E (ver Figura 12). En total, al compilar los diferentes registros históricos disponibles, se estima que han muerto al menos 1,300 personas a causa de los grandes deslizamientos que han afectado al país.
- Las bases de datos, colecciones y catálogos de deslizamientos y lluvia histórica en Guatemala no están sistemáticamente disponibles y no incluyen la información necesaria para una exhaustiva investigación sobre el fenómeno bajo diferentes escenarios geológicos.
- Diversos factores físicos, geológicos y socio-económicos han incrementado la ocurrencia y frecuencia de grandes deslizamientos en el territorio Guatemalteco. Eventos como el catastrófico flujo de escombros de Panabaj, Sololá (2005), el deslizamiento de La Unión, Zacapa (2008), el mega-deslizamiento de Los Chorros en San Cristóbal Verapaz (2009) y el incómodo complejo de deslizamientos del Cerro Lec en San Andrés Semetabaj, Sololá (2008-actual), muestran la relevancia e impactos que la amenaza por deslizamientos significa para el país.

Distribución espacial y ocurrencia de deslizamientos generados por lluvia.

- Uno de los más recurrentes factores de disparo de deslizamientos en Guatemala son las lluvias invernales que se precipitan a lo largo y ancho del país entre los meses de Mayo a Octubre. La información histórica de 30 años, entre 1961 a 1991, indica un rango de precipitación entre los 680 y 5,442 milímetros anuales (milímetros = litros por metro cuadrado). Las mayores precipitaciones ocurren en el flanco sur de la cadena volcánica, en su sección centro-occidental, la zona fronteriza con México (San Marcos, Huehuetenango y Quiché) y en áreas al norte del cinturón montañoso central (ver mapa en la Figura 4). El invierno Guatemalteco se caracteriza por una "primera fase", regularmente la menos lluviosa, entre los meses de Mayo a Julio; seguido por un corto período sin lluvia entre la última semana de Julio y primera de Agosto conocido como "canícula"; y al final, la "segunda fase" del invierno, la más lluviosa, entre los meses de Agosto y Octubre (Figura 5). Los eventos meteorológicos extremos como tormentas tropicales y huracanes suelen originarse en la fase tardía del invierno aunque la temporada oficial va desde el 1 de Junio hasta el 30 de Noviembre de cada año.
- A la escala anual, es posible derivar algunas consideraciones preliminares entre la ocurrencia de deslizamientos y el régimen de lluvias en Guatemala. En congruencia con la distribución y acumulación de la lluvia a lo largo de la temporada invernal, la mayoría de deslizamientos suceden en los meses de septiembre y octubre (ver

Figura 14). Durante la primera fase del invierno, se han presentado deslizamientos relevantes en los meses de junio y julio. Generalmente, con la ocurrencia de la canícula (últimas semanas de julio o primeras de agosto) disminuye la posibilidad de que se presenten los deslizamientos. La ocurrencia de tormentas tropicales o huracanes durante la primera fase del invierno es relativamente baja siendo más común su apareamiento a partir de agosto lo cual incrementa la ocurrencia de deslizamientos y flujos de escombros hacia la parte final del invierno.

- Las unidades geológicas más susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos son aquellas relacionadas con los grandes y extensos depósitos volcánicos del Terciario tardío y Cuaternario: rellenos y cubiertas gruesas de cenizas y pómez, tobas, lavas, material lahárico y sedimentos volcánicos (ver Tabla 1). Estas unidades volcánicas se ubican a lo largo de una ancha provincia volcánica desde la zona metropolitana central y a lo largo del Altiplano occidental. A nivel sub-regional, algunas unidades geológicas son altamente susceptibles, entre ellas los carbonatos antiguos de la Fm. Chochal, los meta-sedimentos y clásticos del Grupo Santa Rosa y algunas unidades metamórficas ricas en filitas, esquistos y gneises. Estas últimas unidades son abundantes en la región occidental y oriental del país, respectivamente.
- Geográficamente hablando, son las regiones occidental y centro-occidental las que más deslizamientos históricos reportan y, por ende, mantienen una potencial susceptibilidad a seguir siendo afectadas por estos fenómenos. Principalmente los departamentos de Huehuetenango, San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Quiché y Sacatepéquez. En la zona oriental, los departamentos que más eventos reportan son Jutiapa, Santa Rosa y Zacapa (ver Tabla 2).
- La ocurrencia de deslizamientos catastróficos está directamente relacionada al régimen de lluvias anual aunque también se logró diferenciar cierta influencia de la anomalía climática de El Niño. Los eventos meteorológicos extremos que han ocasionado deslizamientos a gran escala coinciden con la transición desde la anomalía positiva hacia la anomalía negativa, o justo en el punto más bajo de la anomalía negativa, es decir, de un océano tibio hacia uno más frío, el fenómeno La Niña (ver Figura 13).

Susceptibilidad, alertamiento y protección de la vida.

- La generación de deslizamientos en el territorio nacional varía dependiendo de la región geográfica, las características tectónicas y geológicas y el régimen de lluvia. Sin la influencia de eventos meteorológicos extremos en la zona occidental del país los deslizamientos empiezan a generarse a gran escala a partir del mes de Septiembre cuando se ha alcanzando una lluvia acumulada entre los 1,100 y 1,400 milímetros. En la zona metropolitana el comportamiento parece ser un poco diferente. Los deslizamientos pueden ocurrir a lo largo de toda la temporada

invernal aunque son más marcados a partir del mes de Agosto. Estos parecen generarse a partir de los 600 milímetros de lluvia acumulada total. Por último, los deslizamientos en la región oriental parecen ser generados con lluvias acumuladas de entre 700 a 800 milímetros a partir del mes de Agosto o Septiembre.

- Dada la existencia de una red de monitoreo meteorológico en el país (operada por el INSIVUMEH) y las capacidades organizativas, institucionales y poblacionales (promovidas por la SE-CONRED), es imperativa y necesaria la implementación de un sistema organizado de monitoreo de lluvia con capacidad de procesamiento de información en tiempo real con el objetivo de alertar poblaciones vulnerables al impacto de los deslizamientos. Bajo ciertas condiciones, tal sistema sería una opción viable para la anticipación a posibles fenómenos catastróficos que cobran la vida de personas inocentes y que, por falta de un aviso oportuno, no tienen la capacidad de tomar las decisiones adecuadas para la protección de la vida.
- Otro de los factores generadores de deslizamientos en Guatemala son los terremotos. Durante el terremoto del 4 de Febrero de 1976, por ejemplo, alrededor de 10,000 deslizamientos fueron generados a lo largo de los valles y barrancos de la zona central y centro-occidental del país (ver Figura 24). Al menos 36 personas fallecieron como consecuencia de los cuatro deslizamientos de mayor tamaño (Tabla 7). Este es un factor que no debe ser ignorado al momento de diseñar y planificar obras de infraestructura y zonas pobladas.

AGRADECIMIENTOS.

El financiamiento para la visita a las instalaciones del *U.S. Geological Survey* en Golden, Colorado provino del Programa de Visitas Escolares de la Fundación Fullbright a través del Concejo para el Intercambio Internacional de Expertos (CIES) del Instituto de Educación Internacional (IIE). Gran parte de los arreglos y logística de la visita se realizaron desde la Oficina de Cultura de la Embajada de los Estados Unidos en Guatemala con la siempre apreciable ayuda de Carmen M. de Fonca y Luisa Viau y el apoyo de Jake Silva del CIES-IIE.

La asesoría científica durante la investigación corrió a cargo de Jeff Coe del *Central Geologic Hazards Team*, USGS.

El manuscrito ganó en calidad con la revisión y comentarios de Rudiger Escobar Wolf (Guatemalteco, candidato a Ph.D. en la Universidad Tecnológica de Michigan, USA) y Gerardo Soto (Costarricense, geólogo y vulcanólogo, Terra Cognita Consultores). Así también se incorporaron los valiosos comentarios de colegas geólogos y geotecnistas con mucha experiencia en el tema.

Gracias a todos por su invaluable apoyo, cordialidad y amistad.

El autor, Edy Manolo Barillas Cruz, es Ingeniero Geólogo de la Universidad Autónoma de Nuevo León (México, 1995) con Maestría en Ciencias (M.Sc.) de la *Colorado School of Mines* (USA, 2006); posee 15 años de experiencia en el tema de reducción de riesgo a desastres con instituciones nacionales e internacionales, gubernamentales y ONGs. Actualmente es Consultor y Gerente General de Geociencias, Riesgos y Recursos Naturales S.A. en Guatemala (www.geociencias.com.gt).

Para consultas a detalle sobre esa u otra publicación escribir a embarillas@gmail.com



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Alfaro, E.J., 2000, Some Characteristics of the Precipitation Annual Cycle in Central America and their Relationships with its Surrounding Tropical Oceans, *Top. Meteor. Oceanog.*, 7 (2), p. 99-115.
- Banicevich, A., and Lizano, O., 1998, Interconexión a nivel ciclónico-atmosférico entre el Caribe y el Pacífico Centroamericano, *Rev. Biol. Trop.*, 46, p. 9-22.
- Barillas-Cruz, M., van Westen, C., Orozco, E., Thonon, I., Lira, E., Peters Guarín, G., y Tax, P., 2003, Zonificación de Amenazas Naturales en la cuenca del río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián, Retalhuleu, Guatemala: *GEOS*, v. 23, No. 1, p. 17-24.
- Baum, R.L., and Godt, J.W., 2009, Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA, *Landslides* (2010) 7:259-272, on-line publication DOI 10.1007/s10346-009-0177-0, Springer-Verlag, 14 p.
- Bommer, J.J., and Rodríguez, C.E., 2002, Earthquake-induced landslides in Central America, *Engineering Geology* 63, Elsevier, p. 189-220.
- Bucknam, R.C., Coe, J.A., Chavarría, M.M., Godt, J.W., Tarr, A.C., Bradley, L., Rafferty, S.A., Hancock, D., Dart, R.L., and Johnson, M.L., 2001, Landslides triggered by Hurricane Mitch in Guatemala—Inventory and Discussion: U.S. Geological Survey Open File Report 01-443, 39 p, 23 plates at 1:50,000 scale. <http://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0443/> (al 13 octubre 2012).
- Burkart, B., 1983, Neogene North American-Caribbean plate boundary across northern Central America: offset along the Polochic Fault, *Tectonophysics*, 99, p. 251-270.
- Cepeda, J., Höeg, K., and Nadim, F., 2012, Landslide-triggering rainfall thresholds: a conceptual framework, *Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43, Geological Society of London, p. 69-84.
- Chleborad, A.F., Baum, R.L., and Godt, J.W., 2006, Rainfall Thresholds for Forecasting Landslides in the Seattle, Washington Area, U.S. Geological Survey, Open-File Report 2006-1064, U.S. Department of the Interior, 35 p.
- Comisión Económica para América Latina y El Caribe, CEPAL, 2010, Desastres y Desarrollo: el impacto en 2010, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos, Unidad de Desastres, 11p.

- Coe, J.A., Godt, J.W., Baum, R.L., Bucknam, R.C., and Michael, J.A., 2004, Landslide susceptibility from topography in Guatemala: *In*, Lacerda, W.A., Ehrlich, M., Fontoura, S.A., Sayão, A.S.F., eds., *Landslides: Evaluation and stabilization*, Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, Brazil, June 28-July 2, 2004, A.A. Balkema Publishers, Leiden, v. 1., p. 69-78.
- Connors, C., L. Connors, and Sheridan, M., 2006, Assessment of October 2005 debris flow at Panabaj, Guatemala, and recommendations for hazard mitigation, Technical Report for Oxfam GB, 19 p.
- CONRED, 2009, Dirección de Mitigación, Identificación, Análisis y Evaluación de Movimientos de Ladera en el Cerro Lec, San Andrés Semetabaj, departamento de Sololá, Informe Técnico Interno, 11 p.
- CONRED, sin fecha, Dirección de Mitigación, Primera Evaluación de Seguimiento en el marco de la tercera fase de estabilización del Cerro Los Chorros, Informe Técnico Interno, 22 p.
- CORDILLERA S.A., 2006, Evaluación de riesgos por deslizamientos y flujos de detritus en Santiago Atitlán, Sololá, Informe Técnico, 144 p.
- Cortéz, S., Laj, L., Machorro, R. y Requena, J., 2002, Evaluación de amenaza por deslizamientos, Senahú, Alta Verapaz, Guatemala, Informe Técnico, 15 p.
- CP-Ingeniería de Materiales, 2008, Estudio Geotécnico para la evaluación de la estabilidad por efecto de fenómenos de deslizamientos en el terreno del casco urbano del municipio de La Unión, Zacapa, Informe Técnico, 71 p.
- 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.
- Donnelly, T.W., Horne, G.J., Finch, R.C., and Lopez-Ramos, E., 1990, Northern Central America: the Maya and Chortis blocks, *Geological Society of America Special Paper*, p. 37-76.
- Finch, R.C., and Dengo, G., 1990, NOAM-CARIB Plate boundary Guatemala: a Cretaceous suture zone reactivated as a Neogene transform fault, *Geological Society of America Fieldtrip Guide No. 17*.
- Geopetrol S.A., 2007, Estudio hidro-geológico para la implementación de un sistema de monitoreo y alerta ante deslizamientos en asentamientos urbanos del departamento de Guatemala, Centro América, Informe Técnico, 83 p.

- GFDRR, 2011, Climate Risk and Adaptation Country Profile, Vulnerability, Risk Reduction and Adaptation to Climate Change, Guatemala, 17. p.
http://sdwebx.worldbank.org/climateportalb/doc/GFDRRCountryProfiles/wb_gfdr_r_climate_change_country_profile_for_GTM.pdf (al 13 octubre 2012).
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C.P., 2008, The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flows: an update, *Landslides* (2008) 5:3-17, on-line publication DOI 10.1007/s10346-007-0112-1, Springer-Verlag, 15 p.
- Haapala, J.M., Escobar Wolf, R., Vallance, J.W., Rose, W.I., Griswold, J.P., Schilling, S.P., Ewert, J.W., and Mota, M., 2005, Volcanic Hazards at Atitlán Volcano, Guatemala, U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1403, U.S. Department of the Interior, 13 p.
- Harp, E.L., Wilson, R.C., and Wieczorek, G.F., 1981, Landslides from the February 4, 1976 earthquake, US. Geological Survey Professional Paper, 1204 A, pp. 35.
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2010, World Disasters Report, Focus on Urban Risk, 220 p.
<http://www.ifrc.org/Global/Publications/disasters/WDR/wdr2010/WDR2010-full.pdf> (al 13 octubre 2012).
- Koch, A.J. and McLean, H., 1975, Pleistocene Tephra and Ash-Flows Deposits in the Volcanic Highlands of Guatemala, *Geological Society of America Bulletin*, v. 86, p. 529-541.
- Meschede, M., and Frisch, W., 1998, A plate-tectonic model for the Mesozoic and Early Cenozoic history of the Caribbean plate, *Tectonophysics*, 296 (3-4), p. 269-291.
- Miles, S., Green, R., and Svekla, W., 2012, Disaster risk reduction capacity assessment for precarious settlements in Guatemala City, *Disasters*, 36 (3), Blackwell Publishing, p. 365-381.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2001, Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, República de Guatemala, Centro América, 127 p.
- Ministerio de Comunicaciones, Transporte y Obras Públicas, 1991, Inventario de los principales deslizamientos ocurridos en la República de Guatemala, Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH, Sección de Hidrología Aplicada, Informe Técnico.
- Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C., and Jaedicke, C., 2006, Global landslide and avalanche hotspots: *Landslides*, v. 3, p. 159-173.

- Newhall, C.G., 1987, Geology of the Lake Atitlan region, Western Guatemala, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 33, p. 23-55.
- Reynolds, J.H., 1980, Late Tertiary Volcanic Stratigraphy of Northern Central America, *Bull. Volcanol.*, Vol. 43-3, p. 601-607.
- Schilling, S.P., Wallance, J.W., Matías, O., and Howell, M.M., 2001, Volcano Hazards at Fuego and Acatenango, Guatemala, U.S. Geological Survey, Open-File Report 01-431, Vancouver, Washington, U.S.A., 23 p.
- Schilling, S.P., Wallance, J.W., Matías, O., and Howell, M.M., 2001, Lahar-Hazards at Agua Volcano, Guatemala, U.S. Geological Survey, Open-File Report 01-432, Vancouver, Washington, U.S.A., 15 p.
- Vallance, J.W., Schilling, S.P., Matías, O., Rose, W.I., and Howell, M.M., 2001, Volcano Hazards at Fuego and Acatenango, Guatemala, U.S. Geological Survey Open-File Report 01-431, U.S. Department of the Interior, 23 p.
- Wieczorek, G.F., Landslides triggering mechanisms 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.
- Wunderman, R., and Rose, W.I., 1984, Amatitlan, an actively resurging cauldron, 10 km south of Guatemala City, *Journal of Geophysical Research*, v. 89, p. 8525-8539.

ANEXOS.

Anexo 1. Estaciones meteorológicas con información de lluvia histórica utilizadas en la investigación.

ID	TIPO	NOMBRE	DEPTO	MUNIC	LAT	LONG	#
10107	C	STA.MARGARITA(COBAN)	ALTA VERAPAZ	COBAN	15.467	90.375	4
10108	A	COBAN	ALTA VERAPAZ	COBAN	15.467	90.408	5
10202	D	CAHABON	ALTA VERAPAZ	CAHABON	15.608	89.811	8
10302	C	CHAJCAR(SN.P.CARCHA)	ALTA VERAPAZ	SAN PEDRO CARCHA	15.483	90.186	9
10305	C	CHIQUIXII(SN. P.CARCHA)	ALTA VERAPAZ	SAN PEDRO CARCHA	15.564	90.286	10
10309	C	SECOL(SN.P.CARCHA)	ALTA VERAPAZ	SAN PEDRO CARCHA	15.649	90.317	11
10313	D	STA.CECILIA	ALTA VERAPAZ	SAN PEDRO CARCHA	15.493	90.158	12
10401	D	SETANA	ALTA VERAPAZ	CHAHAL	15.584	90.320	13
10710	A	PANZOS	ALTA VERAPAZ	PANZOS	15.397	89.644	15
10712	B	PAPALHA	ALTA VERAPAZ	PANZOS	15.306	89.937	16
2040201	D	MATUCUY	ALTA VERAPAZ	PANZOS	15.296	89.890	56
307101	A	SAN AGUSTIN CHIXOY	ALTA VERAPAZ	CHAAL	16.067	90.439	63
20202	D	CUBULCO	BAJA VERAPAZ	CUBULCO	15.109	90.614	55
20604	A	SAN JERONIMO	BAJA VERAPAZ	SAN JERONIMO	15.061	90.250	57
30102	B	ALAMEDA ICTA	CHIMALTENANGO	CHIMALTENANGO	14.634	90.803	61
30202	D	SICASA(POCHUTA CHIMAL)	CHIMALTENANGO	ACATENANGO	14.544	91.081	62
31101	B	SN.MARTIN JILOTE.	CHIMALTENANGO	SAN MARTIN JILOTEPEQUE	14.779	90.789	64
31401	B	STA.CRUZ BALANYA	CHIMALTENANGO	SANTA CRUZ BALANYA	14.687	90.915	65
40201	B	CAMOTAN	CHIQUIMULA	CAMOTAN	14.821	89.373	66
40402	A	ESQUIPULAS	CHIQUIMULA	ESQUIPULAS	14.559	89.509	67
40501	D	CAMOTAN	CHIQUIMULA	CAMOTAN	14.489	89.371	68
120301	B	MORAZAN	EL PROGRESO	MORAZAN	14.930	90.142	26
120603	D	PUENTE ORRELLANA	EL PROGRESO	SN.AGUST.ACASAGUASTLAN	14.919	90.000	27
120604	D	LOS ALBORES	EL PROGRESO	SN.AGSUTIN ACASAGUASTLAN	15.051	89.967	28
051208	B	TIQUISATE	ESCUINTLA	TIQUISATE	14.286	91.373	1
113010	D	GUACAMAYAS	ESCUINTLA	GUANAGAZAPA	14.146	90.633	25
50114	D	SABANA GRANDE	ESCUINTLA	ESCUINTLA	14.383	90.829	69
50117	B	ESCUINTLA	ESCUINTLA	ESCUINTLA	14.269	90.793	70
50805	A	SAN JOSE	ESCUINTLA	PUERTO SAN JOSE	13.936	90.834	71
51008	B	CAMANTULUL	ESCUINTLA	SANTA LUCIA COTZUMALGUAPA	14.325	91.051	72
060203	A	JARDIN MIL FLORES	GUATEMALA	AMATITLAN	14.470	90.629	2
60100	A	INSIVUMEH	GUATEMALA	GUATEMALA	14.586	90.533	73
60119	A	LA AURORA	GUATEMALA	GUATEMALA	14.582	90.528	74
61201	B	SN.PEDRO AYAMPUC	GUATEMALA	SAN PEDRO AYAMPUC	14.776	90.455	75
70103	A	HUEHUETENANGO	HUEHUETENANGO	HUEHUETENANGO	15.317	91.503	76
70602	B	CUILCO	HUEHUETENANGO	CUILCO	15.406	91.946	77
71802	B	SN.MIGUEL ACATAN	HUEHUETENANGO	SAN MIGUEL ACATAN	15.706	91.594	78
71902	D	SN.PEDRO NECTA	HUEHUETENANGO	SAN PEDRO NECTA	15.495	91.763	79
72002	B	SN.PEDRO SOLOMA	HUEHUETENANGO	SAN PEDRO SOLOMA	15.664	91.424	80
73102	B	TODOS SANTOS	HUEHUETENANGO	TODOS SANTOS	15.505	91.604	81
80104	A	PUERTO BARRIOS	IZABAL	PERTO BARRIOS	15.738	88.592	82

ID	TIPO	NOMBRE	DEPTO	MUNIC	LAT	LONG	#
80306	B	LAS VEGAS	IZABAL	LIVINGSTON	15.600	88.967	83
90101	C	JALAPA	JALAPA	JALAPA	14.633	89.987	84
90102	B	POTRERO CARRILLO	JALAPA	JALAPA	14.761	89.932	85
90303	A	LA CEIBITA	JALAPA	MONJAS	14.493	89.876	86
90303_2	D	LA CEIBITA	JALAPA	JALAPA	14.493	89.876	87
100301	B	ASUNCION MITA	JUTIAPA	ASUNCION MITA	14.334	89.706	3
101102	A	MONTUFAR	JUTIAPA	MOYUTA	13.809	90.155	6
101301	B	QUEZADA	JUTIAPA	QUEZADA	14.266	90.038	7
200101	A	MAZATENENANGO	MAZATE	MAZATE	14.528	91.503	53
110104	A	FLORES	PETEN	FLORES	16.915	89.866	18
110108		TIKAL	PETEN	FLORES	17.304	89.604	19
110202	A	EL PORVENIR	PETEN	SAYAXCHE	16.525	90.473	20
110305		BETHEL	PETEN	LA LIBERTAD (LAS CRUCES)	14.801	90.804	21
110505		SAN PEDRO MACTUN	PETEN	SAN ANDRES	17.260	90.749	22
110801		CHACHACLUN	PETEN		17.014	89.819	23
110901		POPTUN	PETEN	PETEN	16.325	89.419	24
131901	D	CONCEPCION LAS LAGUNAS	QUETZALTENANGO	SAN JUAN OSTUNCALCO	14.880	91.672	31
132201		SAN MIGUEL SIQUILA	QUETZALTENANGO	SAN MIGUEL SIGUILA	14.895	91.613	32
131401	A	LABOR OVALLE	QUEZALTENANGO	OLINTEPEQUE	14.870	91.514	29
131701	D	PACHUTE	QUEZALTENANGO	SAN CARLOS SIJA	14.981	91.583	30
140502	B	CHINIQUE	QUICHE	CHINIQUE	15.044	91.024	33
140801	B	NEBAJ	QUICHE	NEBAJ	15.398	91.142	34
141001	B	CHUITINAMIT	QUICHE	SACAPULAS	15.291	91.092	35
141401	C	FINCA SAN FRANCISCO	QUICHE	SAN JUAN COTZAL	15.459	90.911	36
141502	B	CHIXOY	QUICHE	CHICAMAN	15.356	90.661	37
142002	B	PUEBLO NUEVO IXCAN	QUICHE	PLAYA GRANDE	15.967	91.001	38
150108	A	RETALHULEU	RETALHULEU	RETALHULEU	14.522	91.696	39
150302		EL ASINTAL	RETALHULEU	EL ASINTAL	14.588	91.724	40
161101	B	SUIZA CONTENTA	SACATEPEQUEZ	SAN LUCAS SACATEPEQUEZ	14.617	90.661	41
170101	C	SAN MARCOS	SAN MARCOS	SAN MARCOS	14.961	91.796	42
170201	D	TECUN UMAN	SAN MARCOS	TECUN UMAN	14.674	92.139	43
170201_2	D	WEST TRADE	SAN MARCOS	TECUN UMAN	14.674	92.145	44
170301	B	CATARINA	SAN MARCOS	CATARINA	14.856	92.077	45
180103	B	LOS ESCLAVOS	SANTA ROSA	CUILAPA	14.253	90.278	46
190103	A	STA. MARIA EL TABLON	SOLOLA	SOLOLA	14.790	91.182	49
191005		EL CAPITAN	SOLOLA	SAN LUCAS TOLIMAN	14.643	91.141	50
191301	D	STA.CATARINA IXTAHUA.	SOLOLA	SANTA CATARINA IXTAHUACAN	14.796	91.359	51
191904	B	SANTIAGO ATITLAN	SOLOLA	SANTIAGO ATITLAN	14.632	91.231	52
181002	D	EL PORTEZUELO	STA.ROSA	SN RAFAEL LAS ROSAS	14.433	90.137	47
181101	D	LAGUNA EL PINO	STA.ROSA	BARBERERA	14.506	90.506	48
110102	D	PUENTE COYOLATE	SUCHITEPEQUEZ	PATULUL	14.376	91.137	17
200404	D	LOS TARRALES(SUCHI)	SUCHITEPEQUEZ	SUCHITEPEQUEZ	14.522	91.136	54
220301	A	LA FRAGUA	ZACAPA	ESTANZUELA	14.964	89.584	58
220602	D	LA UNION	ZACAPA	LA UNION	14.963	89.291	59
220701	B	PASABIEN	ZACAPA	RIO HONDO	15.030	89.680	60
105101		CANDELARIA			14.728	91.620	14

Anexo 2. Los deslizamientos provocados por el terremoto de 1976⁴.

El terremoto del 4 de febrero de 1976, de magnitud $M=7.5$ en la escala de Richter, provocó más de 10,000 deslizamientos en un área de aproximadamente 16,000 kilómetros cuadrados en la zona central y occidental de Guatemala (ver Figura 24). Los principales tipos de movimientos fueron los de caída de rocas y deslizamientos de escombros (*debris slides*). La gran mayoría de estos eventos se caracterizaron por volúmenes de material de menos de 15,000 metros cúbicos. Sin embargo, también ocurrieron 11 grandes deslizamientos de más de 100,000 metros cúbicos.

La distribución regional de estos deslizamientos parece haber sido controlada por 5 grandes factores: 1) la intensidad sísmica; 2) la litología; 3) fuertes pendientes; 4) amplificación sísmica debido a la topografía; y 5) fracturamiento regional. A una escala más local, la litología, la amplificación sísmica y el fracturamiento pudieron haber generado efectos de sitio muy favorables para el movimiento de laderas. El 90% de los deslizamientos ocurrieron en depósitos de pómez del Pleistoceno, un 10% en rocas volcánicas, predominantemente andesíticas, del Terciario y menos del 1% en calizas del Cretácico y metamorfitas del Paleozoico. Las caídas de roca fueron características de pendientes fuertes de más de 50 grados mientras que los deslizamientos de escombros ocurrieron en pendientes entre 25 a 30 grados.

Muchos de estos deslizamientos estuvieron concentrados en ciertas zonas urbanas, poblados rurales y red vial de ciertos municipios del país. En la Tabla 6 se presentan los municipios más afectados por deslizamientos en su jurisdicción territorial.

Tabla 6

Municipios más afectados por deslizamientos por el terremoto de 1976 en Guatemala

Municipio	Superficie (km ²)	Área deslizada (km ²)	% de territorio deslizado
San Martín Jilotepeque	410	37.8	9.2
San Juan Sacatepéquez	273	11.7	4.3
Tecpán Guatemala	248	9.9	4.0
Chinautla	67	8.3	12.4
Patzún	184	5.5	3.0
Churranchito	118	5.3	4.5
Guatemala	215	4.1	2.0
Palencia	218	3.8	1.7
Chimaltenango	49	3.5	7.1
San José del Golfo	76	2.8	3.7
Mixco	90	2.3	2.5

Fuente: elaboración propia.

⁴ Resumen de los principales resultados de la investigación de Harp y colaboradores (1981).

La mayor concentración regional de deslizamientos ocurrió a lo largo de los cañones de los ríos Pixcayá, Motagua, Las Vacas y Los Chocoyos (Figura 24). Sin embargo, donde se concentraron los mayores daños a la propiedad y la pérdida de vidas humanas fue en la zona metropolitana donde fueron afectados alrededor de 500 asentamientos precarios en laderas de barrancos con al menos 200 personas fallecidas.

De los deslizamientos más grandes que se registraron sobresalen 4 por sus importantes impactos a la población y a la infraestructura. Estos provocaron 37 personas fallecidas y un número indeterminado de personas desaparecidas. Los detalles y características de estos cuatro deslizamientos se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7

Características de los cuatro deslizamientos más grandes generados por el terremoto del 4 de febrero de 1976 en Guatemala. Para cada deslizamiento se indica la ubicación en mapa de la Figura 24 (número) y coordenadas en el centro del cuerpo deslizado.

Ubicación	Volumen (m ³)	Daños e impactos
Los Chocoyos; 15 km al SO de Tecpán, en la margen sur del río Los Chocoyos #1; 14.71°N/91.06°O	750,000	Dos viviendas soterradas y 6 personas fallecidas; formó un lago de al menos 300 m de largo aguas arriba del material deslizado
2 km al noreste de San José Poaquil #2; 14.83°N/90.89°O	350,000	No provocó daños a población; formó un lago de 1 km de largo y 15 m de profundidad al bloquear el río Teculcheyá
2 km al suroeste de San Martín Jilotepeque #3; 14.77°N/90.81°O	200,000	Destrucción de 14 viviendas y 17 personas fallecidas; formó un lago de 250 m de largo al bloquear el río Quemayá
Cercano al poblado de Estancia de la Virgen, Chimaltenango #4; 14.77°N/90.72°O	600,000	Destrucción de viviendas y 13 personas fallecidas; material deslizado al río Pixcayá formando un lago de 800 m de largo

Fuente: elaboración propia con datos de Harp y colaboradores (1981).

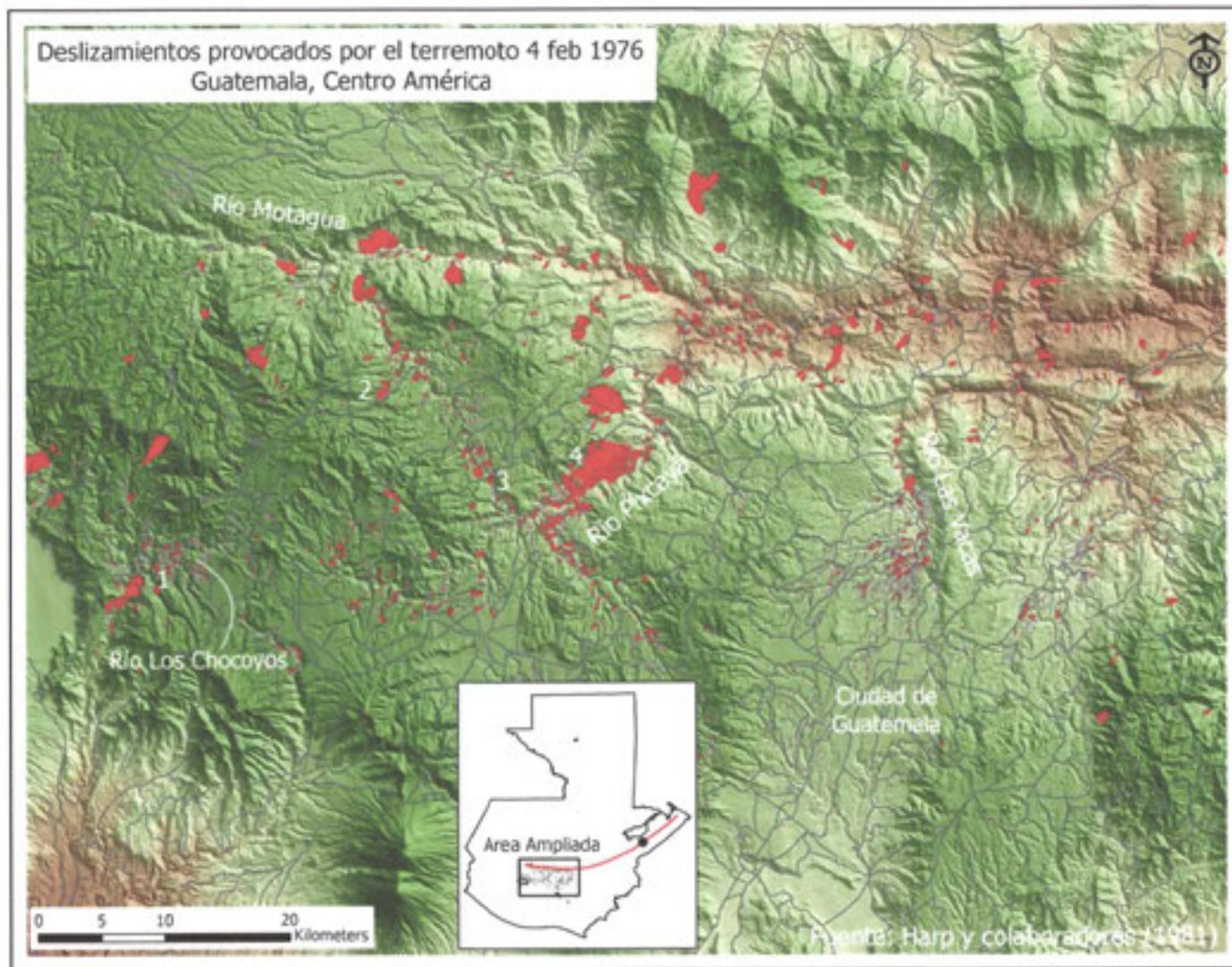


Figura 25. Mapa de distribución regional de los deslizamientos generados por el terremoto del 4 de febrero de 1976 en la región centro-occidental de Guatemala. En el mapa inserto, se muestra el lineamiento aproximado de la zona de falla generadora del evento (línea roja) y la ubicación aproximada del epicentro (punto negro). Números del 1-4 indican los grandes deslizamientos detallados en la Tabla 7.