



DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA PROVOCADOS POR EL HURACÁN MITCH EN EL SALVADOR: INVENTARIO Y DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS SELECCIONADAS

Informe elaborado para la Agencia para el Desarrollo Internacional de los EE.UU.

Por: Anthony J. Crone, Rex L. Baum, David J. Lidke, Damon N.D. Sather, Lee-Ann Bradley y Arthur C. Tarr

Reporte de archivo abierto 01-444



**Departamento del Interior de los Estados Unidos
U.S. Geological Survey (Investigación geológica de los Estados)**



DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA PROVOCADOS POR EL HURACÁN MITCH EN EL SALVADOR: INVENTARIO Y DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS SELECCIONADAS

Por: Anthony J. Crone, Rex L. Baum, David J. Lidke, Damon N.D. Sather, Lee-Ann Bradley y Arthur C. Tarr

Reporte de archivo abierto 01-444

(Versión en español; también hay versión en inglés.)

2001

Este es un reporte preliminar y no se ha revisado su cumplimiento con los estándares editoriales de la U.S. Geological Survey (Investigación geológica de los Estados Unidos) o con el Código Estratigráfico Norteamericano. Cualquier uso de los nombres comerciales en este documento sólo tiene finalidades de descripción y no implica ningún aval por parte del gobierno de los Estados Unidos.

**Departamento del Interior de los Estados Unidos
U.S. Geological Survey (Investigación geológica de los Estados Unidos)**

Denver, Colorado

Contents

Page

INTRODUCCIÓN	2
ESTRATEGIA DEL PROYECTO	4
Definición de las áreas de estudio	4
Procedimiento cartográfico	6
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA OCASIONADOS POR LA TORMENTA	8
Observaciones e interpretaciones mediante fotografías aéreas	9
Observaciones de campo	10
DESCRIPCIÓN DE UNA SELECCIÓN DE ACCIDENTES POR CADA ÁREA DE ESTUDIO ...	10
Área de estudio de Santa Ana-Ahuachapan	10
Área de estudio de San Ignacio-Tejutla	12
Área de estudio de San Miguel-Berlín	16
RESUMEN DE LOS DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA DEL HURACÁN MITCH Y UN PANORAMA GENERAL DE LOS RIESGOS POR DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA EN EL SALVADOR	25
CONCLUSIONES	27
AGRADECIMIENTOS	27
OBRAS CITADAS	28

Ilustraciones

Lista de figuras:

- 1 Imagen satelital del huracán Mitch, el 26 de octubre de 1998, en la que se puede apreciar el bien definido centro de la tormenta.
- 2 Diagrama esquematizado en el que se muestra la trayectoria seguida por el huracán Mitch en Centroamérica y las estimaciones pluviométricas del 25 de octubre al 17 de noviembre de 1998.
- 3 Mapa general de El Salvador y de las áreas de estudio de los desprendimientos de tierra.
- 4 Vista de uno de los desprendimientos de tierra ocurridos recientemente en el área que se encuentra al sur y el oeste del Lago de Coatepeque.
- 5 Vista nordeste de la parte superior del desprendimiento de tierra El Zompopera.
- 6 Vista del desprendimiento de tierra El Pinar y de la escuela abandonada.
- 7 Vista del canal del flujo de escombros occidental y área fuente, en Cerro El Coyote.
- 8 Vista del pueblo de Guadalupe, que resultó afectado por un flujo de escombros el 15 de septiembre de 2001.
- 9 Vista aérea oblicua del área de la fuente principal del flujo de escombros, producido el 15 de septiembre de 2001 en el Volcán de San Vicente.
- 10 Vista aérea oblicua del flujo de escombros de la parte nordeste del pueblo de Guadalupe, ocurrido el 15 de septiembre de 2001.
- 11 Grieta de un desprendimiento de tierra superficial cubierta parcialmente con vegetación, en el área ubicada al oeste de San Lorenzo.
- 12 Grietas de los desprendimientos de tierra provocados por el sismo del 13 de febrero de 2001, al oeste de San Lorenzo.
- 13 Parte de la fotografía aérea vertical en la que se pueden apreciar flujos de escombros recientes en el Volcán de Usulután.

- 14 Grietas de los desprendimientos de tierra del Volcán de Usulután ocasionados por el sismo del 13 de febrero de 2001
- 15 Desprendimientos de tierra al interior del cráter del Cerro el Taburete, posiblemente causados por el sismo del 13 de febrero de 2001.
- 16 Gran desprendimiento de tierra inactivo previo al huracán, en la ribera del Embalse 15 de septiembre.
- 17 Desprendimiento de tierra superficial en la ribera del Embalse 15 de septiembre.
- 18 Falla en la ribera del Río Gualcho, unos 4 km corriente arriba del Embalse 15 de Septiembre.

Lista de ilustraciones

Mapa de los desprendimientos de tierra ocasionados por el huracán Mitch

- 1 Cuadrángulo de Ahuachapan (2257 IV)
- 2 Mitad sureste de los cuadrángulos de Santa Ana (2257 I) y mitad norte del cuadrángulo de Sonsonate (2257 II)
- 3 Cuadrángulos de Masahuat (2358 IV) y parte del cuadrángulo de Metapan (2359 III)
- 4 Cuadrángulo de la mitad norte del Tejutla (2358 I) y partes adyacentes de Honduras (2359 II)
- 5 Mitad sureste de los cuadrángulos de Tejutla (2358 I) y mitad norte de El Paraíso (2358 II)
- 6 Cuadrángulo de Chalatenango (2458-III)
- 7 Cuadrángulo de Ilobasco (2457-IV)
- 8 Parte de los cuadrángulos de Cojutepeque (2457 III), Rio Tithuapa (2457 II), San Vicente (2456 IV) y El Puente Cuscatlan (2456 I)
- 9 Parte de los cuadrángulos de Rio Tithuapa (2457 II), Sensori (2557 III), El Puente Cuscatlan (2456 I) y Jucuapa (2556 IV)
- 10 Parte oeste de los cuadrángulos de Berlín (2456 II) y de Usulután (2556 II)
- 11 Parte de los cuadrángulos de San Francisco Gotera (2557 II), Jocoro (2556 I), San Miguel (2556 II) y La Union (2656 III)

Carátula: Huracán Mitch acercándose a Honduras el 26 de octubre, 1998, 13:15 TCU (26 de octubre, 07:15 hora local). La imagen se deriva de datos satelitales de color mejorado y procesados para producir una perspectiva del huracán. Modificado de la imagen producida por Hal Pierce, Laboratory for Atmospheres (Laboratorio para Atmósferas), NASA Goddard Space Flight Center.

Vista del desprendimiento de tierra El Pinar y de la escuela abandonada. Fotografía por Anthony J. Crone, 21 de septiembre de 1999.

DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA PROVOCADOS POR EL HURACÁN MITCH EN EL SALVADOR: INVENTARIO Y DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS SELECCIONADAS

Por: Anthony J. Crone, Rex L. Baum, David J. Lidke, Damon N.D. Sather, Lee-Ann Bradley y Arthur C. Tarr

RESUMEN El huracán Mitch provocó inundaciones y desprendimientos de tierra generalizados en cuatro países centroamericanos, entre octubre y noviembre de 1998. En el caso del El Salvador, si bien el problema más grave fue el de las inundaciones, los desprendimientos de tierra locales provocaron daños y amenazaron la vida de seres humanos. Como parte de una operación de recuperación financiada por USAID, hemos elaborado un inventario de los desprendimientos de tierra provocados por la tormenta, cubriendo un área de más de la mitad del país. Para cartografiar los desprendimientos de tierra ocasionados por la tormenta se recurrió a fotografías aéreas que fueron tomadas poco después del paso de la tormenta y creamos una base de datos digitales del inventario de los desprendimientos de tierra y los mapas topográficos. Una vez realizados los mapas a partir de las fotografías aéreas, observamos directamente en campo determinados accidentes con objeto de afinar aún más las características de éstos. Además del presente informe, este estudio se puede consultar en Internet, en el centro centroamericano de distribución de información: (<http://mitchnts1.cr.usgs.gov>)

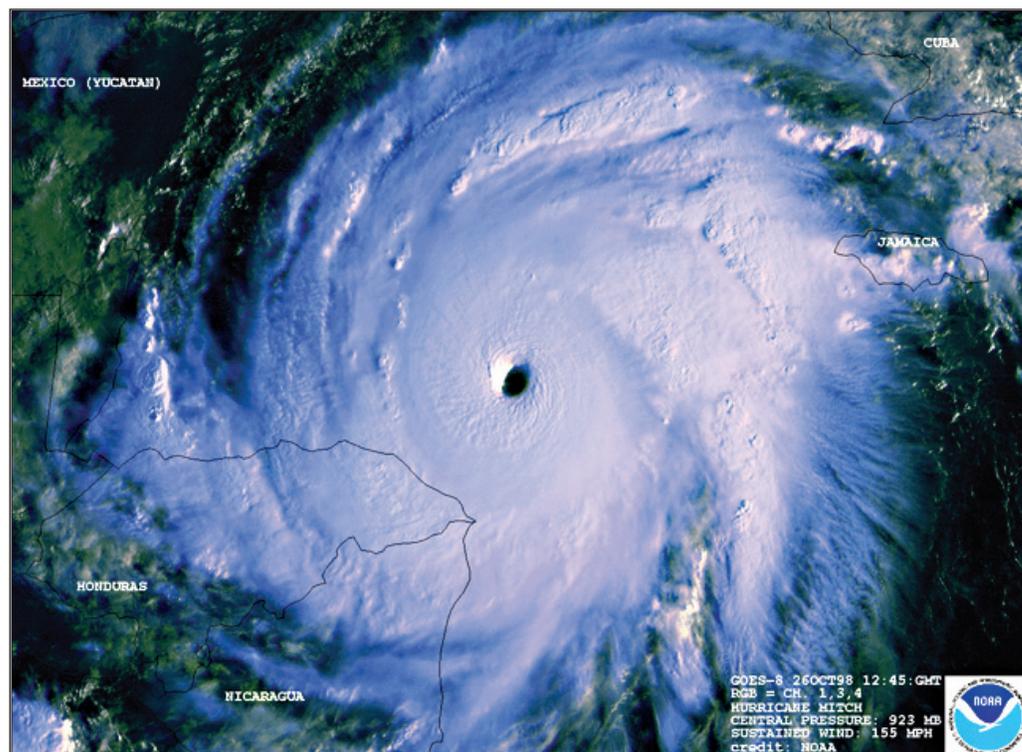
Prácticamente la totalidad de los desprendimientos de tierra ocasionados por la tormenta son fallas poco profundas producidas principalmente en materiales de la superficie sin consolidar. En algunos casos estas fallas adquirieron una gran fluidez y se convirtieron en flujos de escombros que se desplazaron desde cientos de metros hasta varios kilómetros desde su origen. Los desprendimientos de tierra producidos por la tormenta están diseminados por todo el país. Sin embargo, su mayor concentración se localiza en el área montañosa próxima a San Ignacio, cerca de la frontera con Honduras. Existen también desprendimientos de tierra dispersos en la región de Ahuachapán-Santa

Ana, en la parte occidental de El Salvador, así como en las áreas de San Vicente-Berlín y San Miguel, en la parte oriental y centro-oriente de El Salvador. Si bien sólo algunos de los accidentes representan una amenaza constante para ciudades y poblados, cualquier movimiento adicional de algunos de éstos podría poner en riesgo viviendas y carreteras.

El mayor de los desprendimientos de tierra es el de El Zompopera, un importante desprendimiento de tierra de traslación que se convirtió en un flujo de escombros. Este desprendimiento de tierra ya existía antes del paso del huracán, pero la tormenta aceleró su movimiento. Los depósitos formados por el flujo de escombros de este desprendimiento de tierra avanzaron más de 6 km a partir de su fuente.

Las inclinadas pendientes de los volcanes y demás tierras montañosas de El Salvador son susceptibles a los desprendimientos de tierra, especialmente en aquellas áreas en las que las rocas subyacentes están muy erosionadas o extensamente fracturadas. La información reunida en este inventario de desprendimientos de tierra puede servir como punto de partida para llevar a cabo evaluaciones más completas de los riesgos de desprendimiento de tierra de este país. Este inventario, complementado con información sobre la geología de la roca firme y con análisis GIS de los ángulos y aspectos de las pendientes, puede servir para la elaboración de mapas de susceptibilidad a los desprendimientos de tierra. También es posible elaborar mapas de zonas de desprendimientos de tierra e inundaciones por flujo de escombros. Estos mapas representan valiosas herramientas para pronosticar acontecimientos futuros, así como para prepararse y enfrentar emergencias causadas por desprendimientos de tierra.

Figura 1. Imagen satelital del huracán Mitch, el 26 de octubre de 1998, en la que se puede apreciar el bien definido centro de la tormenta. La imagen procede de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA). Se puede obtener a través de Internet en: http://www.osei.noaa.gov/Events/Tropical/Atlantic/1988/Mitch_10/TRCmitc_h299B_G8



INTRODUCCIÓN

El huracán Mitch se inició como una depresión tropical el 21 de octubre de 1998, al sur del Mar Caribe. Conforme fue avanzando hacia el oeste, su intensidad aumentó hasta convertirse en una intensa tormenta (figura 1). Para el 26 de octubre sus vientos ya habían alcanzado los 290 km por hora, con ráfagas de más de 320 km por hora. Se había convertido así en el más devastador de los huracanes del Océano Atlántico de los últimos 200 años (Lott y otros, 1999). La tormenta se mantuvo prácticamente estacionada en la costa nordeste de Honduras durante más de 24 horas y después empezó a entrar poco a poco a Honduras y la parte occidental de Nicaragua (figura 2). El lento avance de la tormenta produjo lluvias torrenciales en la totalidad de Honduras y en la parte occidental de Nicaragua. El total de precipitación pluvial en El Salvador y en la parte oriental de Guatemala fue menor. A su paso por estas tierras, el huracán fue absorbiendo más humedad del Océano Pacífico, lo cual aumentó su contenido inicial de humedad. No se conocen con exactitud las cifras de la

precipitación pluvial causada por la tormenta, en parte debido a los escasos datos disponibles de la precipitación medida en tierra (Hellin y Haigh, 1999). Con base en datos obtenidos por satélites se sabe que la precipitación pluvial máxima fue del orden de 800-1400 mm en la parte occidental de Nicaragua (Ferraro y otros, 1999), aunque en algunas partes dicha precipitación alcanzó hasta 1900 mm (Lott y otros, 1999). La precipitación pluvial en El Salvador fue considerablemente menor. Con base en el mapa de Hellin y Haigh (1999), las cifras características son del orden de 300 a 500 mm para la mayor parte del país (figura 2). El huracán Mitch fue la tormenta más intensa que se haya registrado en el Mar Caribe en más de una década. Las abundantes y torrenciales lluvias ocasionaron inundaciones generalizadas y miles de desprendimientos de tierra en Honduras (Harp y otros, 2001), Nicaragua (Cannon y otros, 2001), Guatemala (Bucknam y otros, 2001) y El Salvador.

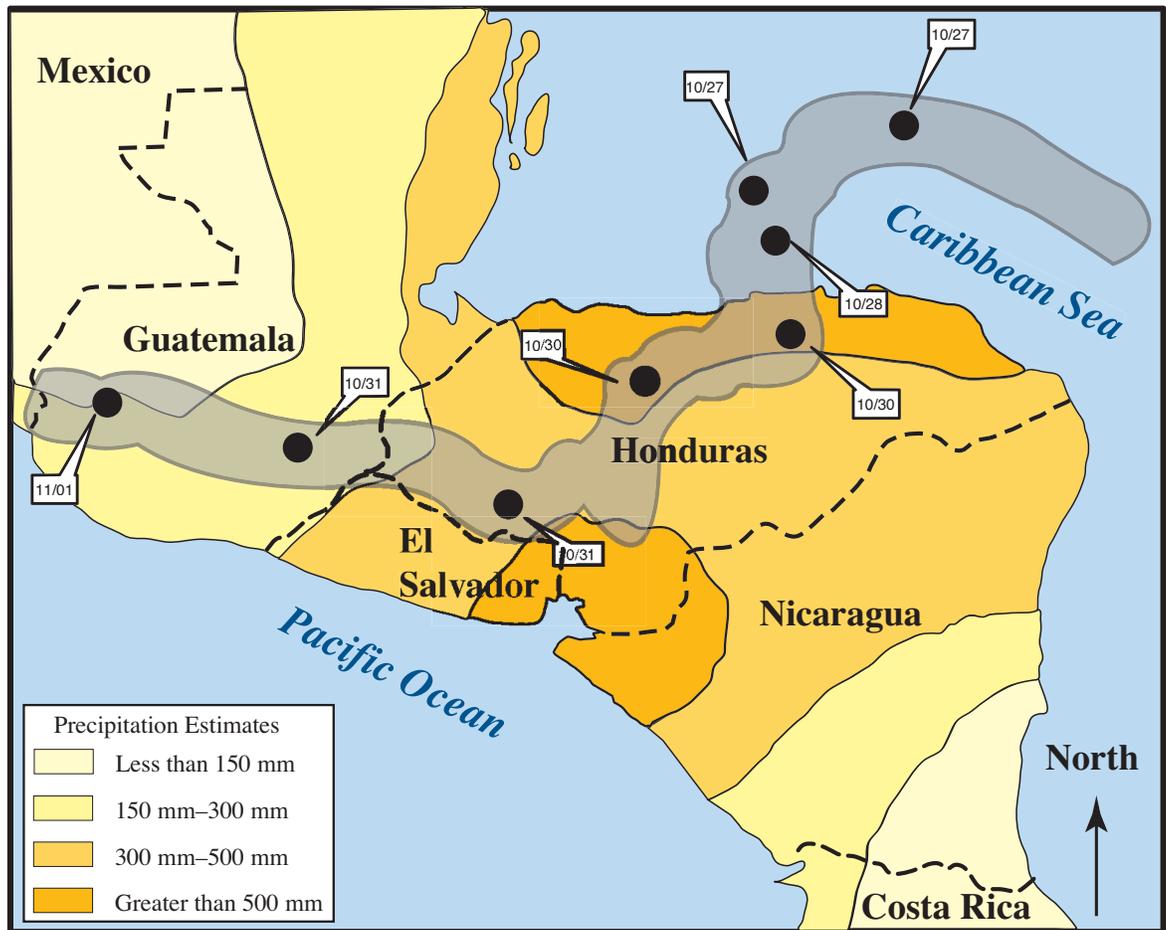


Figura 2. Diagrama esquematizado en el que se muestra la trayectoria seguida por el huracán Mitch en Centroamérica y las estimaciones pluviométricas del 25 de octubre al 17 de noviembre de 1998. Adaptado de Hellin y Haigh (1999).

Debido a la trayectoria de la tormenta, las consecuencias más graves se registraron en Honduras y en la parte occidental de Nicaragua, si bien en ciertas partes de El Salvador y de la parte oriental de Guatemala se registraron inundaciones y desprendimientos de tierra generalizados. Ríos y arroyos provocaron inundaciones en toda la región, cobrando miles de víctimas y ocasionando la destrucción de viviendas, caminos, puentes y demás infraestructura. Miles de desprendimientos de tierra contribuyeron al desastre generalizado, sepultando seres humanos, destruyendo propiedades y obstruyendo drenajes con enormes volúmenes de sedimento fresco. En las costas, los fuertes vientos y la intensa afluencia del sedi-

mento de los ríos desbordados causó estragos en los delicados ecosistemas de manglares y arrecifes de coral. El huracán Mitch ocasionó daños graves y permanentes a personas, infraestructura, economía y al paisaje de estos cuatro países.

En el caso de El Salvador, las lluvias provocadas por el huracán se precipitaron en tierras que de por sí ya estaban saturadas con la humedad de precipitaciones anteriores. Las lluvias del huracán aumentaron el caudal de los ríos a niveles sin precedente y provocaron inundaciones generalizadas, especialmente en los tramos bajos del Río Lempa y en la cuenca del Río Grande de San Miguel, al sureste de El Salvador (figura 3). El

Gobierno de El Salvador (GOES) notificó que el huracán había causado 374 muertes y obligó a desplazarse de su lugar de residencia a 55,800 personas. Además de la pérdida de vidas humanas, las pérdidas económicas ocasionadas ascendieron a \$600 millones (de dólares de EE.UU.), resultó dañado un 60 por ciento de los caminos pavimentados del país, y dio lugar a una campaña multinacional de socorro.

Dentro de las actividades de auxilio a El Salvador, la Agencia para el Desarrollo Internacional de los EE.UU. (USAID) llevó a cabo una prominente actividad para saber en qué auxiliar y llevar a cabo el auxilio, así como en la implantación de los planes de reconstrucción. Uno de los elementos clave dentro de las actividades de reconstrucción desplegadas por USAID fue impedir reasentamientos en áreas de riesgo. Al tiempo que llevaban a cabo los reasentamientos y la reconstrucción, la misión de USAID en El Salvador (USAID/ES) patrocinó la realización estudios para identificar sitios cuya reocupación no fuese peligrosa para personas y estructuras al poner a éstas en contacto con riesgos naturales permanentes como inundaciones, desprendimientos de tierra y erupciones volcánicas. Científicos de U.S. Geological Survey (Investigación geológica de los Estados Unidos) evalu-

aron las zonas potenciales de riesgo en determinadas partes de El Salvador. El presente informe, así como los mapas adjuntos, forman parte de las extensas actividades realizadas para evitar a los sitios de riesgo. Por lo tanto, el propósito de este inventario fue identificar los sitios en donde se localizan los desprendimientos de tierra provocados por el huracán para de esta manera evitar en el futuro la reubicación de asentamientos humanos en estos sitios.

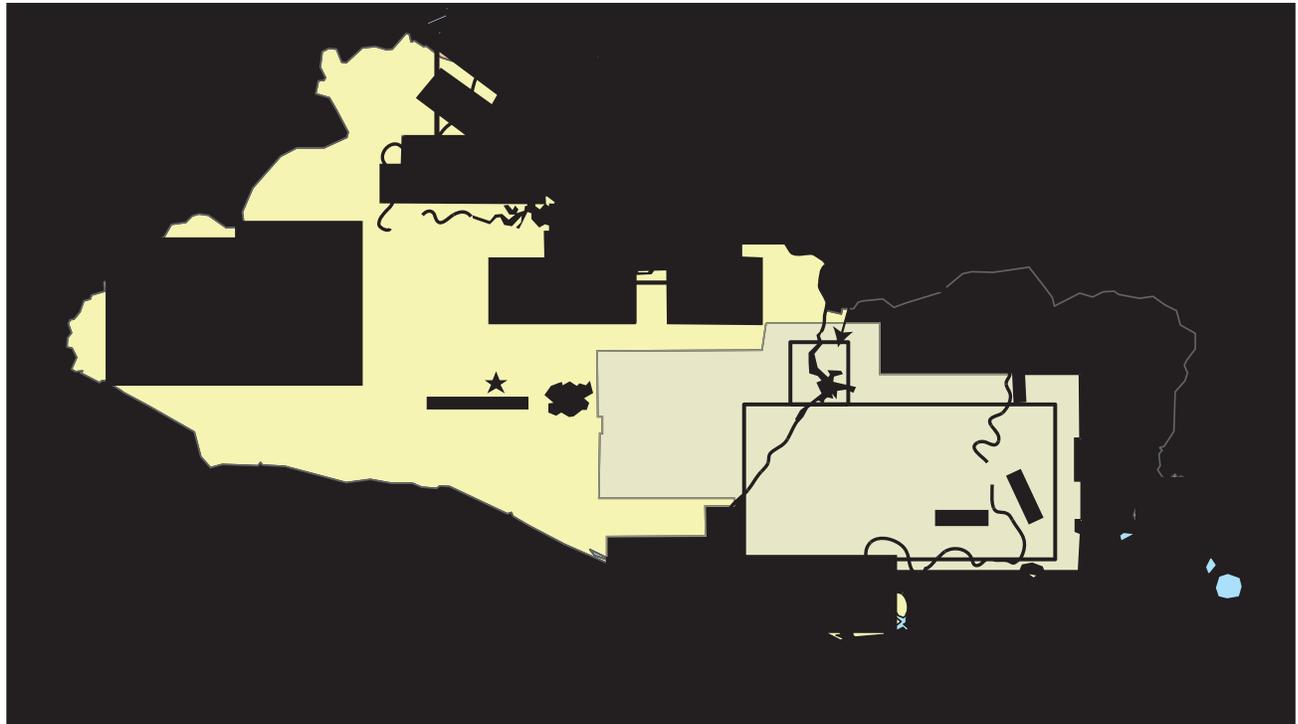
Es importante resaltar que son muchos los factores que intervienen para que se produzcan desprendimientos de tierra durante la caída de lluvias torrenciales: la duración e intensidad de la precipitación, la humedad presente en el suelo previo a la tormenta, la inclinación y orientación de ciertas pendientes, el tipo de vegetación y las características y composición del suelo y de las rocas de las pendientes. El hecho de que el huracán provocara escasos desprendimientos de tierra en una determinada área no significa que en ésta no haya riesgo de posibles desprendimientos. Tormentas excepcionales y tan intensas como el huracán Mitch sirven para identificar aquellas áreas en las que en el futuro, a causa de intensas tormentas, se ocasionen peligrosos desprendimientos de tierra.

ESTRATEGIA DEL PROYECTO

Definición de las áreas de estudio

Los efectos y consecuencias del huracán en diversas partes de El Salvador fueron variables. Después de consultar a funcionarios de USAID de El Salvador, así como a varios colegas y funcionarios de diversas entidades salvadoreñas, se decidió la definición de tres áreas generales de interés debido a la posibilidad de que se produjesen

desprendimientos de tierra cuando hubiese huracanes, así como por el efecto continuo de dichos desprendimientos. No obstante que la información con la que se contaba en ese momento sobre los desprendimientos de tierra de importancia de El Salvador estaba incompleta, con base en ésta se delinearon tres grandes áreas de estudio (figura 3):



Area of aerial photograph coverage

Landslide Study Areas

1. San Ignacio-Tejutla area
2. Santa Ana-Ahuachapan area
3. Berlin/San Miguel area
4. Embalse Cerron Grande
5. Embalse 15 de Septiembre area

Figura 3. Mapa general de El Salvador y de las áreas de estudio de los desprendimientos de tierra. Las áreas 1, 2 y 3 fueron las que primero se definieron; las áreas 4 y 5 se incluyeron posteriormente a raíz del interés por conocer los posibles efectos de los desprendimientos de tierra en dos grandes presas. Las áreas sombreadas indican la cobertura de las fotografías aéreas que se analizaron en este estudio. Los mapas índice de las ilustraciones muestran las áreas en donde se llevaron a cabo los levantamientos cartográficos de los desprendimientos de tierra de este estudio.

El área de estudio de *Santa Ana-Ahuachapan*, la cual abarca un área aproximadamente de 2,600 km²: entre el Lago Coatepeque al este, y entre Ahuachapan y el Río Paz, a lo largo de la frontera con Guatemala en el oeste (ilustraciones 1 y 2).

El área de Estudio de *San Ignacio Tejutla*, la cual abarca aproximadamente 2,650 km²: entre Nueva Concepción y El Paraíso al sur, hasta San Ignacio, y hacia el norte, atravesando la frontera con Honduras (ilustraciones 3, 4, 5 y 6).

El área de estudio *Berlín-San Miguel* que abarca aproximadamente 5000 km² y se extiende: desde el este, a partir de las pendientes orientales del Volcán San Miguel y los volcanes cercanos, hasta el oeste, en el flanco occidental del Volcán San Vicente (ilustraciones 8, 9, 10 y 11).

Las anteriores áreas de estudio iniciales abarcan en total un área de unos 10,250 km², aproximadamente el 45 por ciento del área total del país.

Después de haber definido las tres primeras áreas anteriores, a petición de

funcionarios salvadoreños se crearon dos áreas de estudio más (figura 3). Se trata de las áreas de estudio Embalse Cerrón Grande (ilustración 7) y el Embalse 15 de Septiembre (ilustración 9), las cuales se examinaron para evaluar la posibilidad de que se llegaran a producir desprendimientos de tierra en dos de las más importantes represas de El Salvador y cuya acumulación de agua es una importante fuente de energía hidroeléctrica en este país. El levantamiento cartográfico que se hizo de estas áreas reveló la existencia de unos cuantos desprendimientos de tierra en las proximidades de las represas; no se descubrieron fallas significativas que pusieran en riesgo las instalaciones hidroeléctricas, ni la infraestructura de éstas. Además, los escasos desprendimientos de tierra que fue posible advertir cerca de las represas no depositaron en las mismas una cantidad de sedimento suficiente como para afectar su capacidad. Estas dos áreas de estudio representaron un área adicional

Procedimiento cartográfico

Una vez definidas las áreas de estudio, recurrimos a fotografías aéreas de alta calidad para examinar sistemáticamente el terreno, para identificar y cartografiar recientes fallas en las pendientes y para determinar el grado de riesgo que representaban éstas para viviendas, caminos e infraestructura. La mayoría de las áreas de estudio se cartografiaron utilizando fotografías en blanco y negro con una escala de 1:40,000, lo que nos permitió contar con una cobertura estereográfica; en el caso de una pequeña parte del área de estudio de Santa Ana-Ahuachapan se utilizaron fotografías con escala de 1:15,000 (figura 3). Todas las imágenes que obtuvimos fueron de alta calidad y en su mayoría sin nubosidades; las pocas y reducidas áreas que fueron cubiertas por las nubes se muestran en las ilustraciones anexas.

de 1,240 km², con lo cual la superficie total de las áreas de estudio fue de 11,490 km²; es decir, más del 50 por ciento de la superficie total del país.

Durante nuestro levantamiento cartográfico rebasamos la cobertura de las áreas de estudio inicialmente definidas a fin de poder incluir otras áreas que habían sido cubiertas por fotografías aéreas (figura 3). Esta ampliación cubrió principalmente los extremos este y sureste del área de estudio de San Ignacio-Tejutla en la parte norte del centro de El Salvador y en el área de Berlín-San Miguel. Casi para cuando se estaba dando fin al proyecto, descubrimos que el huracán Mitch había ocasionado varios desprendimientos de tierra destructores y de consideración en la cordillera costera al sureste de San Miguel. Desgraciadamente no contábamos con fotografías aéreas de esta área, lo que nos impidió ampliar la cobertura cartográfica e incluir estos accidentes.

Inmediatamente después del paso del huracán Mitch a finales de 1998, el ejército de los EE.UU. envió varias misiones aéreas para reunir fotografías de las áreas afectadas tomadas a una gran altitud. El programa anterior se conoce como "Open Skies"(Cielos abiertos) y sirvió para fotografiar extensas áreas de Honduras y partes de Nicaragua, Guatemala y El Salvador (Molina y Hallam, 1999). Desafortunadamente, la mayoría de las imágenes de El Salvador que fueron tomadas por Open Skies aparecen oscurecidas por nubes, lo que las hace inútiles para nuestros propósitos.

Una importante fuente fotográfica para realizar nuestro trabajo fueron las imágenes proporcionadas por la Agencia Japonesa para la Cooperación Internacional (JICA). Estas fotografías abarcan la mayor parte de las áreas de

estudio de San Ignacio-Tejutla y de Cerrón Grande, así como una pequeña porción del área de Berlín-San Miguel. En estas fotografías se pueden apreciar claramente los desprendimientos de tierra ocasionados por el huracán; algunas de estas fotografías se tomaron pocos meses después de la tormenta y otras un año después del paso del huracán.

En la porción nordeste y este de la parte central del área de Ahuachapan-Santa Ana utilizamos fotografías en blanco y negro con escala de 1:15,000, las cuales fueron tomadas a principios de 1999 por el Instituto Geográfico Nacional. En estas imágenes de gran escala es posible distinguir claramente los desprendimientos de tierra producidos por la tormenta, ya que fueron tomadas tres meses después de la tormenta.

Nuestra tercera fuente fotográfica fueron las imágenes obtenidas mediante un contrato firmado entre USGS y Aerophoto Centroamericana S. A. Estas fotografías nos permitieron llenar los vacíos del acervo fotográfico antes mencionado. Debido a problemas de logística, demoras contractuales y a las malas condiciones climatológicas, no se pudo disponer de estas imágenes con escala de 1:40,000 sino hasta fines del año 2000. Durante el prolongado lapso transcurrido entre la tormenta y la entrega de las fotografías hubo dos estaciones de crecimiento de la vegetación; es muy probable que durante este periodo la maleza tropical haya ocultado algunos de los desprendimientos de tierra más pequeños. Ello nos impidió confirmar el que todos los desprendimientos de tierra que observamos en las fotografías aéreas hayan sido, en efecto, ocasionados directamente por el huracán Mitch. En algunas áreas cabe la posibilidad de que algunos de los desprendimientos de tierra cartografiados se hayan producido durante tormentas más recientes, en el lapso entre el paso del huracán Mitch y

la obtención de las fotografías. Sin embargo, consideramos que prácticamente la totalidad de los accidentes mostrados en las ilustraciones adjuntas guardan relación con el huracán.

Con base en las fotografías aéreas cartografiamos la ubicación y magnitud de los desprendimientos de tierra; para ello se revisaron directamente las fotografías con estereoscopios amplificadores de espejo. La resolución de estos estereoscopios permitió identificar en las fotografías con escala de 1:40,000 accidentes de entre 2 y 3 m. Visualmente se transfirieron los desprendimientos de tierra de las fotografías a mapas de base topográficos con escalas de 1:25,000 o 1:50,000. La mayoría de los accidentes cartografiados correspondieron inequívocamente a desprendimientos de tierra relacionados con el huracán Mitch. Sin embargo, también se descubrieron algunos accidentes de origen incierto; durante la fase de revisión de campo de nuestro estudio nos dedicamos a inspeccionar estos accidentes directamente en tierra.

Una vez concluido el trabajo de cartografía fotográfica, en septiembre de 2001 viajamos a El Salvador para examinar en campo una selección de los desprendimientos de tierra. El objeto de lo anterior era determinar sus características y evaluar accidentes de origen incierto con base en nuestra interpretación de las fotografías aéreas. En sobrevuelos realizados en helicóptero examinamos varios desprendimientos de tierra, especialmente los de ubicaciones remotas. En tierra visitamos también algunos desprendimientos de tierra seleccionados, cercanos a los caminos. Nuestra revisión de campo nos permitió constatar el grado con el que las plantas habían ocultado áreas fuente de los desprendimientos de tierra y depósitos en menos de tres años. Si bien sin temor a equivocarnos pudimos identificar los desprendimientos de tierra que habían sido cartografiados

mediante las fotografías aéreas, en la mayoría de los casos estos desprendimientos de tierra ya estaban cubiertos por pastos y arbustos con un crecimiento similar al de la vegetación de las pendientes adyacentes. Con base en nuestras observaciones, podemos afir-

mar que en un lapso de 3 a 5 años casi todos los desprendimientos de tierra superficiales ocasionados en El Salvador por el huracán Mitch deben estar cubiertos de vegetación, siendo imposible distinguirlos de las pendientes con vegetación cercanas

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA OCASIONADOS POR LA TORMENTA

En comparación con los otros tres países en los que se llevan a cabo estudios sobre los desprendimientos de tierra producidos después del paso del huracán, las repercusiones de los desprendimientos de tierra en El Salvador son modestas y limitadas en cuanto a su ámbito geográfico. Las abundantes lluvias producidas por la tormenta provocaron decenas de desprendimientos de tierra en diversas partes del país. Sin embargo, en general las repercusiones de estos desprendimientos de tierra fueron menos graves que las pérdidas humanas y daños causados por las inundaciones que tuvieron lugar en El Salvador. En algunas partes de Honduras, Nicaragua y Guatemala los desprendimientos de tierra desgastaron casi por completo pendientes de algunas cuencas de drenado (Harp y otros, 2001; Bucknam y otros, 2001, Cannon y otros, 2001). Por el contrario, en El Salvador los desprendimientos de tierra estaban ampliamente espaciados, y si bien provocaron serios problemas en determinados lugares, no causaron un desastre nacional de consideración.

Prácticamente todos los desprendimientos de tierra ocasionados por el huracán Mitch en El Salvador se originaron en fallas superficiales; en éstas se produjo un desplazamiento pendiente abajo, principalmente de materiales sin consolidar de la superficie, pro-

ducto de una intensa erosión tropical. La mayoría de los desprendimientos de tierra se desplazaron pendiente abajo en forma de masas generalmente consistentes y cuyo avance fue detenido por la base de una empinada pendiente; sin embargo, para cuando el movimiento cesó, muchas de estas masas ya estaban fragmentadas internamente. En algunos casos, el contenido de agua del sedimento de estos desprendimientos de tierra fue suficiente como para darle una consistencia más fluida, convirtiéndolos finalmente en flujos de escombros. Los flujos de escombros pueden ser muy destructores y hasta mortales, ya que pueden desplazarse rápidamente y descender aún por pendientes que tienen un gradiente relativamente bajo a través de ríos y arroyos de los valles.

Además de los desprendimientos de tierra provocados por el huracán, también cartografiamos algunos desprendimientos de tierra grandes que se generaron antes del paso del huracán. Éstos consisten tanto de desprendimientos de tierra complejos que por lo visto han estado inactivos durante mucho tiempo, como de complejos de desprendimientos de tierra activos. La mayor parte de los desprendimientos de tierra tienen una bien definida topografía de montículos con grietas frontales redondeadas, y al parecer la mayoría son desprendimientos de tierra y flujos de tierra. En algunos de ellos están pre-

sentes grandes cantidades de material y se trata de fallas profundas en las que se encuentra el suelo no consolidado de la superficie y la roca firme. Estos desprendimientos de tierra previos a la aparición del huracán Mitch son tanto de traslación como de rotación. El desprendimiento de tierra previo al huracán Mitch más notable por su actividad es el Zompopera, ubicado cerca de la frontera con Honduras. Se trata de un gran complejo integrado flujo de escombros regresivo (¿avalancha?) de un desprendimiento de tierra (ilustración 4).

Queremos hacer énfasis en el hecho de que nuestro cartografiado no es un inventario completo de todos los desprendimientos de tierra ocurridos en

las áreas de estudio. Nos enfocamos en la cartografía de los desprendimientos de tierra ocasionados por el huracán (representados mediante color rojo en las ilustraciones). Sin embargo, durante el levantamiento cartográfico también pudimos observar y cartografiar algunos prominentes desprendimientos de tierra y complejos formados por éstos originados antes del paso del huracán (representados en las ilustraciones mediante color verde). En la ilustración 6 se incluyen también algunos accidentes (en color anaranjado) que consideramos como posibles desprendimientos de tierra. Sin embargo, no sabemos a ciencia cierta cuál es su origen y no pudimos observarlos en campo.

Observaciones e interpretaciones mediante fotografías aéreas

En las fotografías aéreas tomadas después del paso del huracán, los accidentes que interpretamos como desprendimientos de tierra provocados por el huracán Mitch ofrecen un aspecto de ser recientes y estar desprovistos de vegetación. En muchos de los accidentes se observan una grieta frontal (que es donde se originó el desprendimiento de tierra), una trayectoria o canal por el cual se desplazó el desprendimiento y una zona de deposición en las partes bajas del desprendimiento, que es en donde se acumularon los escombros. Al examinar las fotografías también observamos algunos accidentes que no estaban tan bien definidos y cuyo origen era incierto. Durante la observación de campo nos enfocamos a este tipo de accidentes.

Habría sido fácil interpretar erróneamente diversos tipos de accidentes en las fotografías como desprendimientos de tierra recientes, por su falta de vegetación y por la brillantez con la que aparecían en las fotos. En algunos sitios, los brillantes reflejos producidos por pendientes recubiertas de hierba y orientadas directamente al sol semejabán las

pendientes desprovistas de vegetación que caracterizan a los desprendimientos de tierra provocados por el huracán Mitch. Si bien en un principio nos dejábamos engañar, pronto nos volvimos diestros en diferenciar entre los desprendimientos de tierra auténticos y estas pendientes recubiertas de maleza reflectoras. En otros sitios nos sucedió que el talud detrítico rocoso adyacente a los afloramientos de roca tenía un aspecto brillante que podría confundirse con los desprendimientos de tierra de Mitch. Fueron pocos los casos en los que hubo que examinar estos accidentes en campo para poder determinar si se trataba de pendientes de taludes detríticos o desprendimientos de tierra. Y por último, la intensa reflectancia de algunos accidentes producidos por el hombre, como es el caso de las pequeñas canteras y excavaciones realizadas en las pendientes de las colinas, se prestaban a confundirlas con desprendimientos de tierra recientes, por lo que fue necesario hacer visitas de campo a fin de poder determinar su verdadero origen.

Observaciones de campo

La verificación efectuada durante el reconocimiento de campo en septiembre de 2001 nos permitió confirmar nuestras interpretaciones fotográficas, así como revisar en tierra una selección de accidentes. Vimos muchos de los accidentes desde el aire, especialmente los que se encuentran en ubicaciones remotas a las que habría sido difícil llegar por tierra. Visitamos en tierra algunos accidentes seleccionados para poder determinar con certeza su origen, o para obtener información sobre dimensiones y características de los desprendimientos de tierra. Dado lo limitado del tiempo disponible para realizar estos estudios, lo remoto de la ubicación de algunos desprendimientos de tierra y la dificultad para avanzar a través de una tupida vegetación, sólo pudimos llegar por tierra a unos cuantos de los accidentes. Nuestra observación en tierra de la mayoría de los accidentes se limitó a observar éstos con binoculares, desde unos cientos de metros. Si bien habría sido mucho mejor observar de cerca todos estos accidentes, ello resultó inviable, por lo que nos vimos obligados a confiar en inspecciones realizadas desde una distancia mayor.

Muchos de los desprendimientos de tierra cartografiados en las ilustraciones anexas están formados por pequeños flujos de escombros ocasionados por las

lluvias torrenciales del huracán, las cuales cayeron en suelos que ya estaban saturados de humedad. Muchos de estos flujos de escombros se originaron en la parte superior de pequeños drenados que fluyen por pequeños barrancos. Llama la atención que muchos de los pequeños barrancos de las pendientes adyacentes no fueran afectados por el paso de la tormenta, a pesar de que la geomorfología de los barrancos adyacentes indica que en un pasado reciente los flujos de escombros habían corrido por ahí. Estas relaciones indican que la abundancia en lluvias no es el único requisito para la generación de flujos de escombros: para que se produzca el deslizamiento durante las lluvias torrenciales es necesaria la presencia de un volumen suficiente de material no consolidado en la cuenca de captación.

El 13 de enero de 2001 y el 13 de febrero de 2001 los sismos que ocurrieron en El Salvador provocaron miles de desprendimientos de tierra en todo el país. Los desprendimientos de tierra provocados por los sismos dejaron una huella notable en el paisaje. En Jibson y Crone (2001) y en Baum y otros (2001) se puede consultar un resumen de estos sismos. Por ello, en este informe no se hablará mucho acerca de ellos. En el resumen se hacen algunos comentarios más.

DESCRIPCIÓN DE UNA SELECCIÓN DE ACCIDENTES POR CADA ÁREA DE ESTUDIO

Área de estudio de Santa Ana-Ahuachapan

En el área de estudio de Santa Ana-Ahuachapan, situada en la parte occidental de El Salvador (figura 3) sólo hay unas cuantas concentraciones de desprendimientos de tierra relativamente pequeños, los cuales fueron ocasionados por la tormenta (ilustraciones 1 y 2). La

parte central de esta área se caracteriza por un empinado terreno volcánico, en tanto que en las regiones del norte y del sur la topografía es más bien deprimida y guarda relación con los flancos de pendiente suave a moderada de los volcanes que quedaron unidos en la escarpada

región volcánica del centro. La roca firme de esta parte de El Salvador es una mezcla de rocas volcánicas y volcanoclasticas pertenecientes a la formación terciaria de Bálsamo y a la formación cuaternaria de San Salvador (Weber y otros, 1978). En general, la Formación de Bálsamo, que es la más antigua, está expuesta en los flancos distales del terreno volcánico central, y aflora a través de la Formación de San Salvador que la recubre. La mayoría de los desprendimientos de tierra provocados por el huracán se encuentran en la parte este del empinado terreno volcánico. En la parte este del terreno volcánico se pueden apreciar pequeñas concentraciones de desprendimientos de tierra; en los valles cortados a gran profundidad a lo largo del Río Paz, el cual define la frontera entre El Salvador y Guatemala en el extremo noroeste del área.

Área al norte de Apaneca

A lo largo de los flancos de la parte norte de la cadena volcánica que se extiende al norte y nordeste de Apaneca se produjeron algunos desprendimientos de tierra pequeños y dispersos (ilustración 1). Estos desprendimientos de tierra son fallas pequeñas y superficiales de las pendientes que se producen a lo largo de los flancos de la cordillera. Ninguno de ellos se convirtió en un flujo de escombros. Se localizan en áreas remotas y con escasa población; no ocasionaron daños a los caminos ni amenazaron poblados.

El área cercana a Río Paz

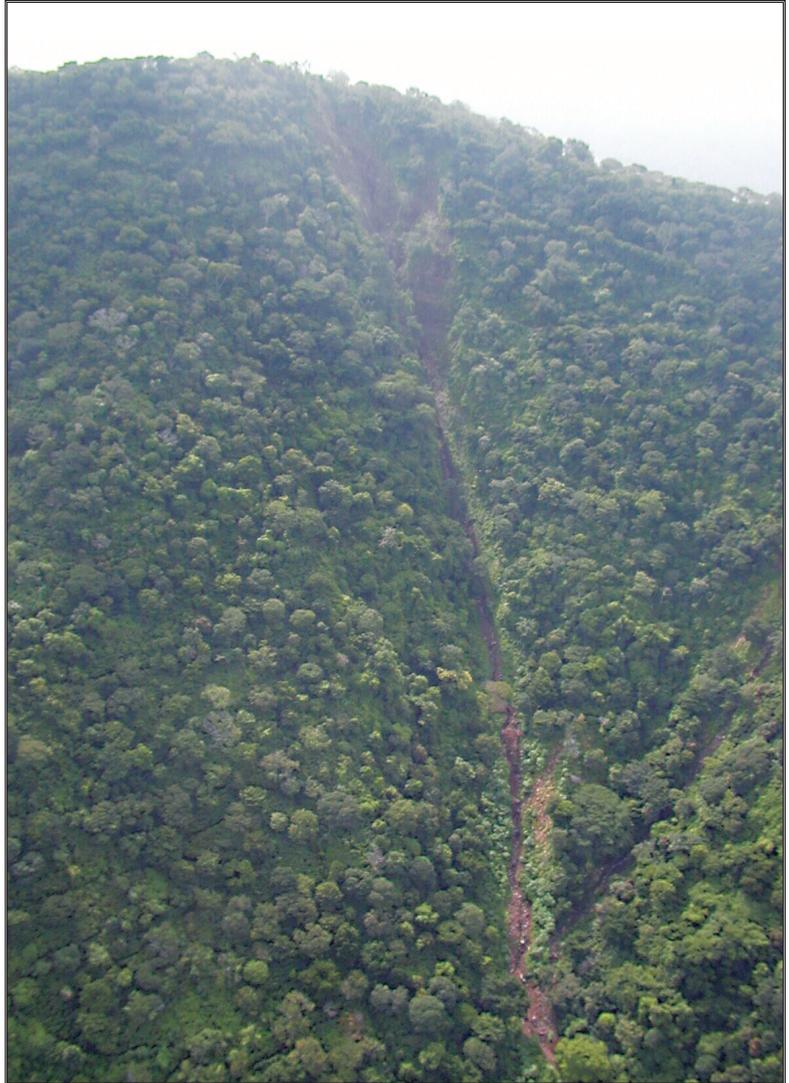
La mayoría de los desprendimientos de tierra producidos cerca del Río Paz se localizan al oeste de este río, en Guatemala (ilustración 1). En el Salvador sólo se cartografió un desprendimiento pequeño y superficial localizado al este del río. Este desprendimiento se extiende a lo largo de la pared norte del valle del Río Guayapa Tacuba y no representó una amenaza para caminos ni para asentamientos. Dos de los

desprendimientos de tierra guatemaltecos se extienden a lo largo del canal del Río Paz y posiblemente se hayan originado por el socavado de la ribera del río producido durante la tormenta. Los demás desprendimientos que se encuentran diseminados por Guatemala son pequeñas fallas superficiales de pendiente, sin el correspondiente flujo de escombros.

Área al oeste y suroeste del Lago de Coatepeque

La mayor concentración de desprendimientos de tierra en esta área se localiza precisamente al oeste y al suroeste del Lago de Coatepeque (ilustración 2). La mayoría de estas fallas de pendiente se encuentran al oeste del lago, a lo largo y cerca del flanco este del Volcán Santa Ana O Ilamatepec. Al parecer, todos estos desprendimientos de tierra son fallas superficiales, y sólo unos cuantos de ellos dieron origen a canales de flujo de escombros con depósitos visibles en sus bases. Aunque algunos de los desprendimientos de tierra dañaron caminos locales, ninguno de ellos produjo daños evidentes a viviendas ni a infraestructura. El desprendimiento de tierra más cercano a un centro de población es el que se puede observar en el flanco oeste de Cerro Pacho, justo al este del pueblo de San Juan Las Minas El Chorizo (no aparece en el mapa de escala 1:50,000). Tanto las fotografías aéreas, como el reconocimiento de campo de este desprendimiento de tierra indican que se trata de una falla de pendiente superficial que produce modestos depósitos en la base de la pendiente durante tormentas de importancia; al parecer, no representa una amenaza significativa para el poblado cercano. Mediante el reconocimiento aéreo de la región, al sur y oeste del Lago de Coatepeque se descubrieron numerosos desprendimientos de tierra que se originaron después del paso del huracán Mitch. Posiblemente fueron causados por los sismos del 13 de enero y 13 de febrero (ilustración 4).

Figura 4. Vista de uno de los desprendimientos de tierra ocurridos recientemente en el área que se encuentra al sur y el oeste del Lago de Coatepeque. Estos recientes desprendimientos son posteriores a la fotografía aérea de enero de 1999 y es posible que hayan sido provocados por el sismo del 13 de enero, o por el del 13 de febrero.



Flanco sur del Cerro El Ojo de Agua de la Virgen

Dos de los desprendimientos de tierra ocasionados por la tormenta que se localizan en el flanco sur del Cerro El Ojo de Agua de la Virgen (ilustración 2) son fallas superficiales de pendientes de los flancos de pequeños valles. El desprendimiento que está en la parte oeste dañó un camino de una plantación de café; el desprendimiento de la parte este dio origen a un flujo de escombros que descendió por el valle unos 300 m.

Área de estudio de San Ignacio-Tejutla

Esta área de estudio se localiza al norte de la parte central de El Salvador. Cubre la parte montañosa del país, cerca de la frontera con Honduras y contiene la mayor concentración de desprendimientos de tierra ocasionados por la tormenta que se cartografió. La región se caracteriza por su empinado y escarpado terreno, por sus profundos cañones y la diversidad de su roca firme. La roca firme de esta parte de El Salvador está compuesta de rocas bien consolidadas en lo general, de tipo intrusivo y extrusivo terciarias, de las Formaciones de Chalatenango y Morazán (Weber y otros, 1978).

El área de El Rosario

El huracán Mitch provocó una importante concentración de desprendimientos de tierra cerca de la frontera con Honduras, al este de los pueblos de El Rosario y San Ignacio (ilustración 4) y aproximadamente a 10 km hacia el este, en Honduras, en el lado norte del Río Sumpul. Cerca de El Rosario se produjeron numerosos desprendimientos de tierra en la parte superior de Quebrada de La Mojarra, así como en el flanco sur de la Loma La Albarda. La mayoría de estos desprendimientos de tierra tienen una longitud de varios cientos de metros y depositaron una cantidad sustancial de sedimento fresco en los canales de drenado adyacentes. Pero como en las proximidades no hay asentamientos humanos significativos, el riesgo que representa este accidente es mínimo. Un importante flujo de escombros que se originó en el flanco sureste del Cerro Cayaguanca descendió aproximadamente 1 km hasta llegar al canal de la Quebrada de La Mojarra. El flujo de escombros permaneció en el canal y se detuvo varios cientos de metros antes de llegar al pueblo de El Rosario. Los flujos de escombros de dimensiones similares, o un poco mayores, probablemente no representan un riesgo directo para el pueblo ya que el canal principal se hunde a varios metros de profundidad, en la cresta aluvial sobre la cual se erige el pueblo.

El desprendimiento de tierra El Zompopera

El desprendimiento de tierra El Zompopera es el más grande de los desprendimientos individuales que cartografiamos en nuestras áreas de estudio. La cabeza del desprendimiento de tierra se levanta unos 300 m por arriba del valle contiguo; las desgastadas pendientes se hunden con mucha pendiente en el valle (figura 5, ilustración 4). La roca de fondo que quedó al descubierto por el

desprendimiento de tierra se ha alterado tanto que se ha convertido en arcilla, lo que indica que esta alteración podría ser uno de los factores que contribuyó a la ubicación de dicho desprendimiento.

Aunque antes del paso del huracán el desprendimiento de tierra Zompopera ya estaba activo, la tormenta ocasionó una falla en los bloques de la parte superior del desprendimiento y depositó grandes volúmenes de sedimento en el valle contiguo de Río La Palma o Los Pozos. Este sedimento se desplazó inicialmente hacia el valle como un desprendimiento de tierra y flujo de escombros; sin embargo, más adelante corriente abajo los depósitos del desprendimiento se reconvirtieron en depósitos fluviales. Los depósitos frescos de esta mezcla de sedimentos fluviales y de desprendimiento se extendieron hasta 6 o 7 km valle abajo, más allá del pueblo de La Palma y del puente de la Carretera CA-4. En el puente de la carretera, el cual se encuentra a 6 km del desprendimiento, estos depósitos contienen cantos rodados de más de 2 m de diámetro.

La tormenta provocó también un significativo retroceso de la grieta, en la punta del desprendimiento de tierra, lo que ocasionó la destrucción de un camino por el que se llegaba a la campiña cercana. El camino se volvió a abrir temporalmente. Sin embargo, los inestables bloques de la parte superior del desprendimiento continuarán desplomándose y acabarán por destruir el camino temporal.

Estos continuos desplomes son motivo de preocupación. Muchos de los bloques inestables de la parte superior del desprendimiento de tierra tienen un volumen de miles de metros cúbicos. El desplome simultáneo de muchos de estos bloques podría dar lugar en el Río La Palma o Los Pozos a una presa por efecto de los desprendimientos. Si el tamaño de la presa es suficientemente grande, se formaría rápidamente un lago detrás de la

presa. Una catastrófica falla de ésta podría liberar un importante flujo en dirección al valle. Un flujo como éste podría llegar a la Palma en cuestión de minutos. Si su volumen es suficiente podría inundar parte del pueblo. Afortunadamente el pueblo está de 5 a 10 m por arriba del canal del río. Sin embargo, una inundación de dimensiones catastróficas pondría en riesgo a varias partes del pueblo.



Figura 5. Vista nordeste de la parte superior del desprendimiento de tierra El Zompopera. El desplome de bloques inestables de la parte superior del desprendimiento de tierra destruyó una carretera, en la cresta de la cordillera. En la parte superior del desprendimiento quedaron muchos bloques inestables. El catastrófico desplome de estos bloques podría embalsar el Río La Palma, al fondo del valle.

Desprendimiento El Pinar

Aproximadamente a 2.5 km valle abajo del desprendimiento de tierra Zompopera, un desprendimiento de tierra grande cercano al asentamiento El Pinar destruyó unos 50 m del camino, así como la única escuela del área (figura 6, ilustración 4). El Pinar se localiza unos 3 km en dirección este nordeste de La Palma, en la cresta con 15 a 25 metros de ancho de una cordillera de pronunciada pendiente. El desprendimiento de tierra se inició en la cresta de la cordillera y descendió de 150 a 200 m a la parte inferior del Río La Palma o el valle de Los Pozos. El desprendimiento de tierra socavó los cimientos de la escuela local, en la cual no había nadie cuando se produjo la falla. Se trazó un nuevo camino a través de la punta del desprendimiento de tierra. Sin embargo, la pendiente de éste sigue siendo inestable y es muy probable que futuros movimientos vuelvan a destruir el camino y a poner en riesgo las viviendas cercanas.

Flujos de escombros del Cerro El Coyote

El huracán Mitch produjo dos flujos de escombros en el lado sur del Cerro El Coyote, el cual se encuentra a unos 5.5 km en dirección norte-nordeste de El Paraíso y 3.5 km hacia el noroeste de San Rafael (ilustración 5). El volumen de estos flujos de escombros se estima en unos pocos miles de metros cúbicos. Se originaron en pendientes empinadas y cubiertas de pinos. Descendieron de 300 a 400 m por estrechos canales. Los diques que se encuentran a lo largo del flujo de escombros occidental indican que el flujo llenó el canal de 5 m de ancho, a una profundidad de 3 a 4 m y transportó bloques de 2 m de ancho durante más de la mitad del tramo del canal (figura 7). Las áreas fuente de los flujos de escombros en la actualidad están totalmente cubiertas de maleza;

incluso, buena parte de los voluminosos depósitos de cantos rodados está cubierta por una densa vegetación. Las cuencas de captación donde se originaron los flujos de escombros son muy pequeñas, comparadas con el volumen de roca y agua presentes en el flujo. Durante nuestra revisión de campo observamos varios

manantiales pequeños en las laderas de la parte inferior del Cerro El Coyote. Hemos especulado sobre la posibilidad de que el agua subterránea de los manantiales que rodean al Cerro El Coyote hayan contribuido al escurrimiento superficial del huracán y hayan sido uno de los factores que coadyuvaron al desarrollo de

Figura 6. Vista del desprendimiento de tierra El Pinar y de la escuela abandonada. Se regularizó la pendiente de un nuevo camino que pasa por la punta del desprendimiento de tierra, el cual se deslizó hacia el valle del Río La Palma o Las Pozos, a la derecha. Es muy probable que los futuros desplazamientos del desprendimiento de tierra destruyan este nuevo camino.



Figura 7. Vista del canal del flujo de escombros occidental y área fuente, en Cerro El Coyote. El área fuente del flujo se localiza en la cordillera, en la parte superior izquierda de la fotografía. La persona de la izquierda está sobre el dique del flujo de escombros, el cual se eleva de 3 a 4 m por arriba del fondo del canal. Nótese el canto rodado de 2 m de diámetro (abajo a la derecha) que fue transportado por este pequeño pero potente flujo de escombros.



Área de estudio de San Miguel-Berlín

Volcán de San Vicente

Desconocemos la existencia de algún desprendimiento de tierra en el Volcán de San Vicente ocasionado específicamente por el paso del huracán Mitch. Sin embargo, otros fenómenos geológicos produjeron desprendimientos de tierra en este volcán. En la fotografía de JICA de noviembre de 1999, es posible apreciar en el lado sur del Volcán de San Vicente un grupo de flujos de escombros previos a la aparición de Mitch (ilustración 8). Estos flujos fueron provocados por una intensa tormenta que se produjo anteriormente (Jon Major, USGS, comunicación oral, 2001). La mayoría de estos flujos tienen una longitud de por lo menos 1 km; el más largo tiene 3 km. El sismo de 6.5 M ocurrido el 13 de febrero de 2001 en

El Salvador provocó varios desprendimientos de tierra en el volcán (Baum y otros, 2001); una tormenta que se produjo el 15 de septiembre de 2001 provocó desprendimientos de tierra y flujos de escombros adicionales. Un flujo de escombros provocado por la tormenta del 15 de septiembre barrió con el extremo nordeste del pueblo de Guadalupe, destruyó varios refugios temporales y arrastró a una mujer y a un niño pequeño (figuras 8, 9, 10). Otros flujos de escombros atravesaron la carretera que une a Guadalupe y Verapaz y se desplazaron varios kilómetros a partir de sus áreas de origen ubicadas en el lado este del volcán.



Figura 8. Vista del pueblo de Guadalupe, que resultó afectado por un flujo de escombros el 15 de septiembre de 2001. Los refugios temporales que aparecen al frente a la derecha fueron barridos por el flujo de escombros; éste se originó en las pendientes occidentales del Volcán de San Vicente, el cual se puede apreciar al fondo.

Figura 9. Vista aérea oblicua del área de la fuente principal del flujo de escombros, producido el 15 de septiembre de 2001 en el Volcán de San Vicente. Otros desprendimientos de tierra más pequeños que se produjeron en los bancos del canal y que se desplazaron pendiente abajo,



Figura 10. Vista aérea oblicua del flujo de escombros de la parte nordeste del pueblo de Guadalupe, ocurrido el 15 de septiembre de 2001. Muchos de los grandes cantos rodados del canal fueron transportados por el flujo de escombros.

Cañones al suroeste de San Lorenzo

Quizás la mayor concentración de desprendimientos de tierra ocasionados por el huracán en la parte oriental de El Salvador es la que se localiza en las paredes del cañón, al suroeste de San Lorenzo (ilustración 8). Estos desprendimientos son predominantemente fallas superficiales de lo que al parecer es tefra erosionada (figura 11). La magnitud de los desprendimientos va de varias decenas de metros, hasta 200 metros. La mayoría alcanzó a llegar hasta la parte inferior del cañón, en donde depositaron sedimento en los canales de

arroyos intermitentes. Se produjeron desprendimientos similares en el área a raíz del sismo del 13 de febrero de 2001 (figura 12). Estos desprendimientos siguen representando un riesgo menor para viviendas y caminos ubicados en la cima de las pendientes, dado que las grietas frontales de los desprendimientos continúan retirándose. Afortunadamente, son pocas las viviendas que están construidas en las laderas o en la base de los cañones, que es donde existe un riesgo considerable de que se produzcan desprendimientos.

Figura 11. Grieta de un desprendimiento de tierra superficial cubierta parcialmente con vegetación, en el área ubicada al oeste de San Lorenzo. Durante el paso del huracán Mitch en esta área se produjeron docenas de pequeños desprendimientos de tierra superficiales similares a éste; sin embargo, fueron pocos los que ocasionaron daños de consideración.



Figura 12. Grietas de los desprendimientos de tierra provocados por el sismo del 13 de febrero de 2001, al oeste de San Lorenzo. Al igual que los desprendimientos de tierra provocados por el huracán Mitch, fueron pocos los daños de gravedad provocados por estos desprendimientos; sin embargo los continuos desprendimientos que se han presentado indican que estas pendientes son muy susceptibles a los desprendimientos de tierra.



Área de Berlín y Santiago de María

Los desprendimientos de tierra cercanos a los pueblos de Berlín y Santiago de María se produjeron en los cuatro volcanes que existen en esta área (ilustración 10). La mayoría de éstos quedó lejos de asentamientos humanos. Unos pocos desprendimientos afectaron carreteras y uno de ellos avanzó hasta 100 m de un pequeño asentamiento.

Cerro El Tigre

En los lados sur y sureste del Cerro El Tigre se produjeron varios flujos de escombros (ilustración 10). La longitud de los flujos osciló entre 100 y 500 m. La mayoría se originó en las paredes de los cañones, o en las cabezas de canales tributarios; muchos de ellos lograron llegar al suelo de los cañones, en donde entraron por canales principales y se integraron a otros flujos. Lo que entraron por los canales principales descendieron cientos de metros y generaron flujos de escombros compuestos de hasta 900 m de longitud. No obstante que las pendientes de esta área están pobladas de manera diseminada, hogares y granjas cerca de la boca de los cañones más importantes pueden estar en riesgo debido a la posibilidad de que futuras tormentas llegaran a producir flujos de escombros. El sismo del 13 de febrero de 2001 también provocó desprendimientos de tierra en esta área.

Volcán de Usulután

Los flujos de escombros se originaron en el cuadrante nordeste del Volcán de Usulután, así como en los profundos y escarpados cañones de las laderas este y oeste del volcán (ilustración 10). Los flujos son del orden de 100 a 800 m de longitud y se formaron tanto en pendientes pronunciadas como moderadas. Además de los flujos que aparecen en los mapas, se produjeron otros más en el escarpado cañón, al este de la cima. Se pueden apreciar en una fotografía aérea vertical (figura 13). Sin embargo, no contamos con una cobertura estereográfica de esta área, lo que nos impidió cartografiar con precisión estos desprendimientos de tierra. Los sismos del 13 de febrero de 2001 provocaron también muchos desprendimientos de tierra en el volcán (figura 14). El elevado relieve del volcán (de unos 1,000 m) y las empinadas pendientes crean las condiciones para que se produzcan flujos de escombros con grandes distancias máximas, semejantes a los que se produjeron en el Volcán de San Vicente.

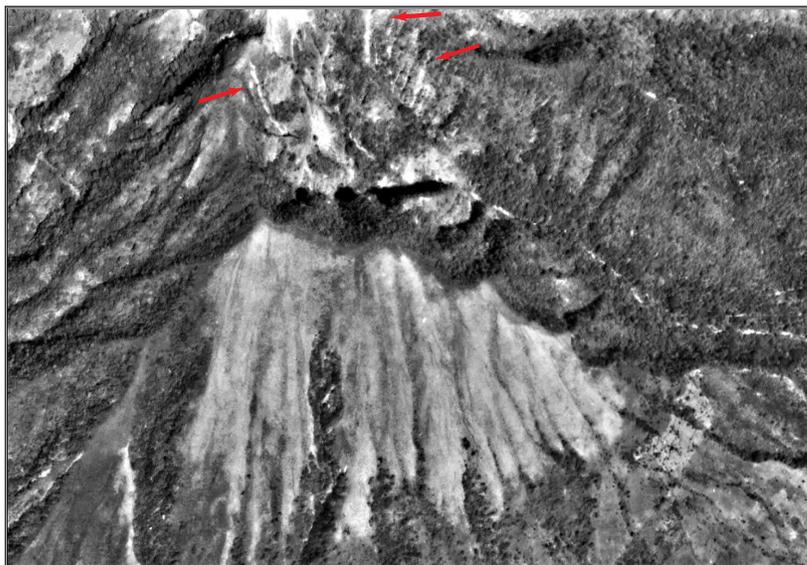


Figura 13. Parte de la fotografía aérea vertical (USGS R2 L2 F1) en la que se pueden apreciar flujos de escombros recientes (véanse las flechas) en el Volcán de Usulután. No fue posible cartografiar estos desprendimientos al no contar con toda la cobertura fotográfica de la cima del volcán.

Figura 14. Grietas de los desprendimientos de tierra del Volcán de Usulután ocasionados por el sismo del 13 de febrero de 2001. En el volcán se produjeron numerosos desprendimientos como éste como consecuencia de las intensas sacudidas. En los próximos años, la erosión del volcán producirá grandes cantidades de sedimento que se depositarán en las áreas circundantes.



Laguna de Alegría y Cerro Las Palmas

Al interior del borde del cráter de Laguna de Alegría y en las empinadas pendientes del suroeste, debajo del Cerro Pelón y del Cerro Las Palmas se produjeron varios desprendimientos y flujos de escombros (ilustración 10). La mayoría se originó principalmente como desprendimientos de tierra superficiales de coluvión y de un residuo erosionado generado a partir de roca volcánica. La longitud de los desprendimientos y de los flujos osciló entre 200 y 1500 m. El flujo más largo penetró a un arroyo intermitente sin nombre, el cual fluye a lo largo del extremo este del pueblo de Tecapan y se detuvo a unos 2 km al norte del poblado. La trayectoria seguida por el flujo quedaba a 100 m de las pocas viviendas que se encuentran en las pendientes, las cuales se ubican en la parte inferior de Loma El Pinal. El sismo del 13 de febrero de 2001 provocó desprendimientos de tierra en esta área general.

Cerro El Taburete

Dos desprendimientos de tierra que se produjeron al interior del borde del cráter del Cerro El Taburete son al parecer desprendimientos de tierra superficiales de coluvión y del residuo erosionado de roca volcánica (ilustración 10). El más largo de estos desprendimientos tiene unos 200 m de longitud y se originó en el borde del cráter; el segundo tiene unos 80 m de longitud y se inició en la parte media de las paredes del cráter. En el campo pudimos observar varios desprendimientos de tierra dentro del borde del cráter, así como en la parte externa del volcán. Estos desprendimientos se activaron por el sismo del 13 de febrero de 2001 (figura 15).

Figura 15.
Desprendimientos de tierra al interior del cráter del Cerro el Taburete, posiblemente causados por el sismo del 13 de febrero de 2001. A consecuencia del sismo se produjeron desprendimientos de tierra similares, tanto en este volcán como en volcanes cercanos. Es probable que los desprendimientos de tierra superficiales de esta área ocasionados por el huracán Mitch hayan sido muy similares.



Área de San Miguel

En áreas aisladas alrededor de la ciudad de San Miguel se produjeron pequeños grupos de flujos de escombros y otros desprendimientos de tierra superficiales (no aparecen en las ilustraciones); sin embargo, estos desprendimientos no representan un peligro para los asentamientos humano ni para las estructuras hechas por el hombre.

Laguna Seca El Pacayal

Al interior del borde oeste del cráter Laguna Seca El Pacayal se produjeron unos cuantos flujos de escombros, al oeste de San Miguel (ilustración 10). Los flujos se iniciaron justo debajo del borde y se desplazaron entre 400 y 500 m, al este del límite con el suelo del cráter. Las únicas estructuras hechas por el hombre que están al interior del cráter se encuentran en el lado opuesto (al este) y el flujo de escombros no las puso en peligro.

Colinas al este de San Francisco (Gotera)

En las dispersas colinas que están al este de San Francisco (Gotera), al norte de San Miguel, se produjeron unos cuantos flujos de escombros aislados (ilustración 11a). La longitud de los flujos osciló entre 50 m y 300 m; aunque algunos de ellos atravesaron caminos, están a cientos de metros de viviendas y caminos importantes.

Colinas al sur de Laguna de San Juan

Fueron relativamente pocos y pequeños los flujos de escombros producidos en las colinas al sur de la Laguna de San Juan. El terreno donde se ubican dichas colinas es escarpado y está escasamente poblado (ilustración 11b). El más largo de ellos tenía 200 m de longitud y se encontraba a un km del asentamiento más cercano; sin embargo, hubo otros que se encontraban de 300 a 400 m de distancia de un pequeño asentamiento, en la confluencia de la Quebrada El Nacimiento y la Quebrada La Cangrejera.



Figura 16. Gran desprendimiento de tierra inactivo previo al huracán, en la ribera del Embalse 15 de septiembre. En caso de reactivarse, un desprendimiento de tierra como éste podría bloquear parcialmente la presa; sin embargo está lo bastante corriente arriba de la presa como para no interferir con el funcionamiento de la presa o el de las instalaciones hidroeléctricas.

El Carmen

En las Colinas que están al norte y nordeste de El Carmen (ilustración 11c) se produjeron unos cuantos flujos de escombros. Entre éstos se encuentra un reducido y aislado flujo, cerca de la cima de la Loma Los Torres, así como pequeños flujos en la Loma La Ujushtera. La longitud de los flujos de escombros osciló entre unas cuantas decenas de metros, hasta casi 200 metros; estaban demasiado lejos de algún asentamiento como para representar un riesgo. Sin embargo, en caso de que una intensa tormenta llegara a producir un desprendimiento importante, algunas de las viviendas que se encuentran al fondo de la Quebrada El Agua Helada podrían estar en peligro.

Embalse 15 de Septiembre

La presa hidroeléctrica que embalsa al Río Lempa, y de esta manera forma el Embalse 15 de Septiembre, es una de las principales fuentes de electricidad de El Salvador. La preocupación por la seguridad de las presas hidroeléctricas de El Salvador y la infraestructura de éstas es uno de los principales motivos que ha llevado a determinar la estabilidad de las pendientes en torno a la represa. En las proximidades del Embalse 15 de Septiembre encontramos relativamente pocos desprendimientos, sin que ninguno de ellos representara una seria amenaza para la presa (ilustración 9). En la ribera se produjeron pocos desprendimientos; otros se produjeron en las riberas de los dos principales tributarios del Río Lempa.



Figura 17. Desprendimiento de tierra superficial en la ribera del Embalse 15 de septiembre. Cuando se tomó esta fotografía en septiembre de 2001, la grieta estaba casi totalmente cubierta de vegetación.

Ribera

Es poco probable que los pocos desprendimientos de tierra que se observaron en las riberas del Embalse 15 de septiembre representen una seria amenaza para la presa. Entre estos desprendimientos figura un flujo de escombros de la ribera suroeste (unos 400 m corriente arriba desde la presa); un gran desprendimiento de rotación previo al huracán, en la ribera noroeste (figura 16, 5 km corriente arriba desde la presa); y un desprendimiento de tierra superficial en el muro oeste del inundado valle del Río Malancolo (figura 17, 7 km corriente arriba desde la presa). De los anteriores, sólo el desprendimiento previo al huracán tenía un volumen suficiente como para tener efectos de consideración en la presa. Durante el sobrevuelo realizado en septiembre de 2001 no se advirtieron indicios de ninguna actividad reciente en el desprendimiento (figura 16). La reactivación del desprendimiento

bloquearía parcialmente la presa. Sin embargo, es poco probable que la magnitud del bloqueo llegue a afectar el funcionamiento de la presa.

Fallas en las riberas del Río Titihuapa

En las riberas del profundo Río Titihuapa se producen de manera activa fallas en algunos sitios corriente arriba, desde el sitio en el que el río entra a la presa (ilustración 9). La mayoría de las fallas de la ribera se localizan fuera de los meandros en donde el socavado ha ocasionado una falla, ya sea por volcadura o por depresión. Lo más probable es que las fallas de la ribera de estos sitios ya existiesen antes del paso del huracán Mitch. Sin embargo, muchas de las grietas y depósitos se ven frescos en las fotografías aéreas. Es posible que el aumento del caudal del Río Titihuapa ocasionado por el paso del huracán haya acelerado estas fallas de la ribera.



Figura 18. Falla en la ribera del Río Gualcho, unos 4 km corriente arriba del Embalse 15 de Septiembre. Es probable que esta falla y otras similares producidas a lo largo del Río Gualcho hayan sido producto de la acelerada erosión ocasionada por el gran caudal provocado por el huracán Mitch.

Fallas en las riberas del Río Gualcho

En las riberas del profundo Río Gualcho se producen de manera activa fallas en algunos sitios corriente abajo, desde la Comunidad Nuevo Gualcho, unos 4 km corriente arriba a partir del sitio en donde el río entra a la presa (ilustración 9). La mayoría de las fallas de la ribera se localizan fuera de los meandros, en donde el socavado ha provocado fal-

las, ya sea por volcadura o por depresión (figura 18). Es muy probable que la falla de la ribera en estos sitios ya estuviera presente antes del paso del huracán Mitch; sin embargo, muchas de las grietas y depósitos son bastante recientes. Es posible que el aumento del caudal del Río Gualcho durante el paso del huracán Mitch haya acelerado estas fallas.

RESUMEN DE LOS DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA DEL HURACÁN MITCH Y UN PANORAMA GENERAL DE LOS RIESGOS POR DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA EN EL SALVADOR

El huracán Mitch fue una tormenta inusualmente fuerte, aunque la precipitación pluvial más intensa y abundante no tuvo lugar en El Salvador. No obstante que la humedad que ya había en El Salvador antes del paso del huracán era considerable, la tormenta provocó relativamente pocos desprendimientos de tierra que ocasionaran daños. La gran intensidad y volumen de la lluvia que se precipitó en diversas áreas de Honduras, Nicaragua y Guatemala durante el paso del huracán provocó grandes y catastróficos desprendimientos de tierra en estos países. Si en el caso de El Salvador la intensidad y volumen de la precipitación hubiese sido la misma, es probable que el grado y magnitud de los desprendimientos de tierra hubiesen sido similares a los de sus países vecinos. En fechas más recientes, intensas tormentas localizadas han provocado desprendimientos de tierra en El Salvador, como los que se ha podido observar en los lados sur y este del Volcán de San Vicente.

De la cartografía y las observaciones de campo se desprende que las empinadas pendientes de los volcanes y demás áreas montañosas del país son susceptibles a los desprendimientos de tierra, especialmente en áreas donde la roca firme está muy fracturada o erosionada. Las masas de los desprendimientos de tierra que descenden por las pendientes por lo común se transforman en flujos de escombros de rápido desplazamiento capaces de avanzar cientos de o miles de metros antes que sean detenidas por suelos de pendiente leve. Las áreas en donde hay canales corriente abajo y pendientes

inclinadas son áreas con posibilidad de resultar inundadas por flujos de escombros, por lo que antes de asentar allí viviendas, negocios o infraestructura habrá que evaluarlas con todo cuidado. Durante el levantamiento cartográfico también pudimos observar algunos complejos de desprendimientos de tierra originados antes del paso del huracán. Algunos de éstos fueron reactivados por el huracán Mitch. Perturbaciones tales como la graduación, o excavaciones realizadas en estos desprendimientos de tierra, o alteraciones en el drenaje superficial, podrían reactivar estos accidentes.

Nuestros comentarios generales acerca de algunos de los controles de estos desprendimientos de tierra podrían ser corroborados mediante análisis complementarios. Este inventario de desprendimientos de tierra podría ser el primer paso para la realización de un análisis más completo de los riesgos que representan los desprendimientos de tierra. Por ejemplo, un análisis de GIS de la distribución de los desprendimientos de tierra de acuerdo con unidades geológicas serviría para saber si ciertos tipos de roca firme son más susceptibles al desprendimiento de tierra. Este tipo de información sobre susceptibilidad se podría complementar con un análisis GIS de los ángulos de pendiente determinados a partir de modelos de elevación digitales. La combinación de información relativa a los ángulos de las pendientes y a la susceptibilidad a las fallas de diversos tipos de rocas y materiales de las superficies constituyen el fundamento para la elaboración de los mapas de susceptibilidad a los desprendimientos de tierra. Mediante datos geotécnicos adicionales y el uso de modelos de fallas en

las pendientes sería posible estimar las distancias de desplazamiento de los desprendimientos de tierra y elaborar mapas de zonas que podrían resultar inundadas por flujos de escombros. Estos mapas serían herramientas muy valiosas para identificar áreas en las que se restringiría o prohibiría futuros asentamientos. Su elaboración es necesaria, ya que son un medio para reducir los riesgos que representan los desprendimientos de tierra en ciertas partes del país en vías de urbanización.

Si bien el huracán Mitch ocasionó daños y muertes en El Salvador, los sismos de 2001 pusieron de manifiesto que el pueblo salvadoreño está expuesto a diversos tipos de riesgos geológicos. El Salvador es un país geológicamente activo y contiene amplias áreas que se caracterizan por sus terrenos empinados y escarpados. Evidentemente, las lluvias torrenciales pueden ocasionar desprendimientos de tierra. Sin embargo, los devastadores sismos del 13 de enero y 13 de febrero de 2001 pusieron de manifiesto que una intensa sacudida del suelo puede ser un factor importante en la desestabilización de las pendientes. Empinadas pendientes y depósitos volcánicos mal consolidados, junto con intensas sacudidas del suelo son factores que pueden crear condiciones óptimas para que se produzcan extensos y masivos desprendimientos de tierra y fallas en los suelos (Jibson y Crone, 2001; Baum y otros, 2001). Llama la atención el hecho de que los desprendimientos de tierra ocasionados por los sismos se hayan producido en muchas áreas que son similares, aunque no necesariamente en los mismos sitios, a aquellas en donde se presentaron desprendimientos de tierra producidos por una tormenta. Entre las áreas proclives a los desprendimientos de

tierra provocados por sismos, así como por tormentas figuran varias áreas volcánicas, en especial las del Lago de Coatepeque, el Volcán de San Vicente y los volcanes cercanos a Berlín y Santiago de María. En el área localizada al suroeste de San Lorenzo se produjeron desprendimientos de tierra ocasionados tanto por sismo, como por tormenta.

Los sismos de enero y febrero provocaron cientos de desprendimientos de tierra en el área de la Cresta de Bálsamo, la cual se ubica al sur y suroeste de la ciudad de El Salvador (Jibson y Crone, 2001). A pesar de las pocas fotografías que tenemos de esta área que las retratan después del paso del huracán y antes de que ocurrieran los sismos, es posible apreciar que el huracán no ocasionó en la cordillera desprendimientos de tierra notables. La precipitación pluvial estimada entre 300 y 500 mm que cayó en la Cordillera Bálsamo durante el paso del huracán (figura 2) no provocó ningún desprendimiento de tierra significativo. En cambio, la breve pero intensa sacudida de los sismos de enero y febrero provocaron cientos de desprendimientos de tierra. Estas observaciones indican que las pendientes empinadas, incluso aquellas que se encuentran sobre depósitos volcánicos mal consolidados, pueden mantenerse estables durante una intensa precipitación, especialmente si están recubiertas con una abundante vegetación. Sin embargo, en estas mismas pendientes se pueden producir catastróficas fallas como consecuencia de las sacudidas de intensos sismos, aún cuando estén secas. La cizalla dinámica provocada por la sacudida de un sismo puede provocar fallas generalizadas en pendientes que en condiciones estáticas se mantendrían estables.

CONCLUSIONES

El pueblo de El Salvador vive en un medio extremadamente activo desde el punto de vista geológico y está expuesto a diversos tipos de riesgos geológicos. Los destructores desprendimientos de tierra, las inundaciones, los huracanes, los sismos y las erupciones volcánicas son fenómenos naturales que es imposible evitar. Se han producido en el pasado y es muy probable que en el futuro vuelvan a ocurrir. Mediante una adecuada planificación y una anticipada preparación es posible reducir los efectos nocivos de estos destructores fenómenos y limitar la escala de futuros desastres.

Considerando los miles de millones de dólares que han representado las pérdidas registradas en El Salvador desde 1998, las medidas adoptadas para reducir futuras pérdidas se podrían considerar como inversiones eficientes en cuanto a costo. La elaboración de mapas de sus-

ceptibilidad a los desprendimientos de tierra, de inundaciones por derrames y por flujos de escombros y de riesgos volcánicos permitirá a los funcionarios públicos contar con valiosas herramientas que les servirán para orientar el desarrollo a futuro y para identificar áreas en las que los asentamientos actuales podrían estar expuestos a riesgos naturales. El huracán Mitch y los dos devastadores sismos han creado conciencia en El Salvador sobre la necesidad de prever y de actuar antes de que se produzcan los desastres. Información científica como la ofrecida en el inventario de este informe puede ser útil en la prevención de futuros fenómenos de riesgo. Una planificación y preparación adecuadas permitirán salvar las vidas de los salvadoreños y mitigar las penurias ocasionadas por fenómenos naturales destructivos, como las ocasionadas por el huracán Mitch y por intensos sismos.

AGRADECIMIENTOS

La exitosa conclusión de este proyecto y los resultados obtenidos fueron posibles gracias a la cooperación y ayuda de muchas personas. Un especial agradecimiento para Ana Elizabeth Araniva de González, de la Oficina para el Agua y el Ambiente de la Agencia para el Desarrollo Internacional de los EE.UU., San Salvador, y para Carlos Pullinger, de la Dirección de Geología, Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), San Salvador, por su apoyo, ayuda y cooperación constantes durante todas las etapas de este trabajo. Su apoyo resultó invaluable. También

deseamos dar las gracias a Manuel Díaz (SNET) y a Luz Barrios (GESAL) por su ayuda inicial en la identificación de las regiones de El Salvador en las que el huracán provocó desprendimientos de tierra. De gran provecho resultó también la ayuda de R. Willie Rodríguez, Paul Hearn, Verne Schneider y Nancy Zeigler de USGS, quienes a lo largo del proyecto dieron su apoyo en la organización y la logística. Y por último, aunque no por ello menos importante, nuestro agradecimiento a Eleanor Omdahl, Margo Johnson y Pamela Detra por la pericia puesta al servicio para la elaboración de los productos finales de este proyecto.

Obras citadas

- Baum, R.L., Crone, A.J., Escobar, D., Harp, E.L., Major, J.J., Martinez, M., Pullinger, C. y Smith, M.E., 2001, Assessment of landslide hazards resulting from the February 13, 2001, El Salvador earthquake: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-119, 20 p.
- Bucknam, R.C., Coe, J.A., Mota, A., Godt, J.W., Tarr, A.C., Bradley, L.-A., Rafferty, S., Rafferty, Hancock, D. y Dart, R.L., Landslides triggered by Hurricane Mitch in Guatemala--Inventory and discussion: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-443, 30 p., 23 ilustraciones.
- Cannon, S.H., Haller, K.M, Ekstrom, I., Schweig, E.S. III, Devoli, G., Moore, D.W., Rafferty S.A. y Tarr, A.C., 2001, Landslide response to Hurricane Mitch rainfall in seven study areas in Nicaragua: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-412, 17 p., 7 ilustraciones.
- Ferraro, R., Vicente, G., Ba, M., Gruber, A., Scofield, R., Li, Q. y Weldon, R., 1999, Satellite techniques yield insight into devastating rainfall from Hurricane Mitch: Eos [Transactions, American Geophysical Union], v. 80, no. 43, p. 505, 512 y 514.
- Hellin, J. y Haigh, J., 1999, Rainfall in Honduras during Hurricane Mitch: WEATHER, v. 54, p. 350-359.
- Harp, E.L., Hagaman, K.W., Held, M. D. y McKenna, J.P., 2001, Digital inventory of landslides triggered by Hurricane Mitch in Honduras: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-61, 15 p., 20 ilustraciones.
- Jibson, R.W. y Crone, A.J., 2001, Observations and recommendations regarding landslide hazards related to the January 13, 2001 M-7.6 El Salvador earthquake: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-141, 19 p.
- Lott, N., McCown, S., Graumann, A. y Ross, T., 1999, Mitch—The deadliest Atlantic hurricane since 1780: <http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/reports/mitch/mitch.html>.
- Molnia, B.F. y Hallam, C.A., 1999, Open skies aerial photography of selected areas in Central America affected by Hurricane Mitch: U.S. Geological Survey Circular 1181, 82 p.
- Weber, H.S., Wiesemann, G., Lorenz, W. y Schmidt-Thome, M., 1978, Mapa geológico de República de El Salvador/ América Central: Publicado por la Bundesanstalt und Rohstoffe, Hannover, Germany, escala:100,000, 6 ilustraciones de formato grande.