

## **IMPORTANCIA DE LA APLICACIÓN DE LOS SIG A LA DETERMINACIÓN DE LOS DESASTRES ASOCIADOS A LOS FLUJOS DE DERRUBIOS EN MÉXICO**

*Guillermo Cardoso Landa*

*Profesor Investigador, Instituto Tecnológico de Chilpancingo*

*E-mail: gclanda@prodigy.net.mx*

### **RESUMEN**

En este artículo se describen brevemente algunos de los desastres asociados a la presencia de los flujos de derrubios ocurridos en algunos países del mundo en años recientes, los cuales han sido observados y, en algunas ocasiones, medidas sus características fundamentales, por ejemplo: Estados Unidos, China, Japón, Italia, Taiwán, Asia Central, Alemania, Suiza, Rusia, Filipinas, Ucrania, Canadá, Brasil, Ecuador y Venezuela. En el país de México se han presentado gran cantidad de flujos de derrubios en los años recientes, muchos de ellos en el eje trans-volcánico mexicano y en las cordilleras costeras, tales como los ocurridos en el volcán Popocatepetl, en el volcán Pico de Orizaba, en el volcán Nevado de Toluca, en las montañas de Puebla, en Acapulco, Gro., en la ciudad de Tijuana, B.C. y en la cordillera costera de Chiapas y Oaxaca, por mencionar solamente los que han producido desastres importantes en tiempos recientes. En el artículo se describen también las características de los desastres producidos en diferentes regiones de México.

Con el propósito de identificar los mecanismos que involucran al material sólido dentro de un flujo líquido, es necesario analizar los papeles jugados por las varias fuerzas actuantes en la génesis del movimiento en un flujo de derrubios. Las aproximaciones desarrolladas hasta la fecha son las siguientes, (Lorenzini et al., 2004): modelo de estabilidad de talud infinito, aproximación de Shields, aproximación de Takahashi y desarrollos recientes.

Para poder aplicar los modelos anteriores es necesario tener información muy grande de diversos puntos sobre el terreno, con los cuales se forma una malla de cálculo, por lo tanto es esencial desarrollar un Sistema de Información Geográfica en el sitio de análisis. Se presenta en el artículo completo un modelo para determinar las características en la zona de inicio de un flujo de derrubios, que incluye el desarrollo de un SIG.

### **INTRODUCCIÓN**

La década de los años 1990-1999 fue denominada por la ONU como el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (IDNDR, por sus siglas en inglés, Internacional Decade for Natural Disaster Reduction), en claro reconocimiento a la necesidad de efectuar rápidos progresos en el uso de la ciencia y la tecnología para reducir las muertes y la destrucción debido a los peligros naturales. En las décadas anteriores a 1990, los desastres se incrementaron tanto en pérdidas de vidas humanas como en daños a propiedades e infraestructura en todo el mundo.

Durante la 54ª sesión de la Asamblea General de Naciones Unidas, los estados miembros decidieron continuar con los esfuerzos desarrollados durante la Década Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, adoptando la resolución UNGA A/54/RES/219, mediante la cual se crea la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres (ISDR, por las siglas en inglés de International Strategy for Disaster Reduction), como los ordenamientos sucesores a la IDNDR, con el propósito de proseguir los diez años de experiencias y logros, en particular en términos de conocimiento y pericia científica y tecnológica.

Las Naciones Unidas han establecido la ISDR como marco global de trabajo para la acción, con una visión tal que permita a todas las sociedades ser más resistentes ante los efectos de los peligros naturales y los desastres tecnológicos y ambientales relacionados con los mismos, con el fin de reducir las pérdidas humanas, económicas y sociales. La implementación de la ISDR sienta como premisa la formación de sociedades entre gobiernos, organizaciones no gubernamentales, agencias de la ONU, la comunidad científica, los medios de comunicación y otros grupos multisectoriales pertenecientes a la comunidad que se dedica a la reducción de los desastres.

Los cuatro objetivos de la ISDR son:

1. Incrementar la conciencia pública con respecto a la reducción de los desastres.
2. Lograr el compromiso por parte de las autoridades públicas.
3. Estimular la formación de sociedades tanto interdisciplinarias como intersectoriales.
4. Lograr el mejoramiento del conocimiento científico sobre las causas de los desastres de la naturaleza y las consecuencias de los peligros naturales.

Además existen dos tareas bajo mandato: la continuación de la cooperación internacional para reducir los impactos de El Niño y La Niña y el fortalecimiento de la capacidad para reducir los desastres a través de medidas de alerta temprana.

## **DESASTRES ASOCIADOS A LOS FENÓMENOS NATURALES**

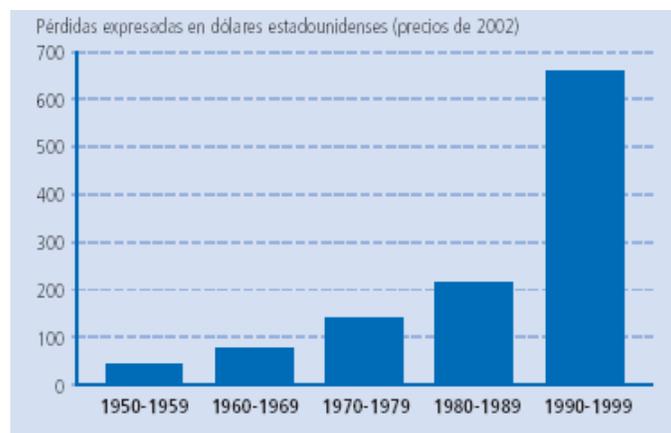
Un desastre asociado a un fenómeno natural se define como un grave trastorno desencadenado por un fenómeno de la naturaleza que provoca pérdidas humanas, materiales, económicas y ambientales, que exceden la capacidad de los afectados de lidiar con ellas.

Los riesgos representan la probabilidad de que se produzcan consecuencias perjudiciales, o eventuales pérdidas (muertos, heridos, destrucción de propiedades y medios de vida, trastornos de la actividad económica o daños al medio ambiente), como resultado de la interacción entre las amenazas naturales o provocadas por las actividades humanas y las condiciones de vulnerabilidad. El riesgo se expresa convencionalmente mediante la ecuación:

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} + \text{Vulnerabilidad}$$

La vulnerabilidad humana es una situación o proceso, en el que intervienen factores físicos, sociales, económicos y ambientales, que determina cuáles y cuántos daños podría acarrear determinada amenaza natural (Burton et al, 1993).

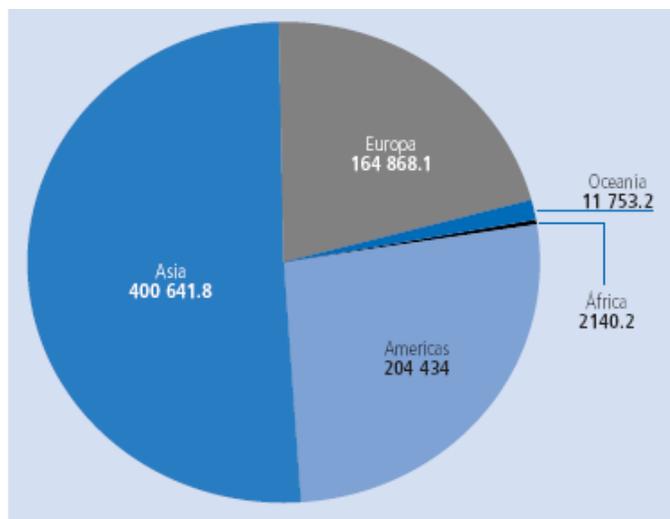
Los desastres asociados a fenómenos naturales constituyen un serio obstáculo para el desarrollo humano y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio tan importantes como la reducción de la pobreza extrema a la mitad antes del año 2015. No en vano los desastres naturales provocaron pérdidas económicas anuales que van desde los 75,500 millones de dólares estadounidenses en los años 60, 138,400 millones en los años 70, 213,900 millones en los 80 y 659,900 millones en los 90, la mayoría de ellos en el mundo desarrollado. Ahora bien, las estimaciones económicas no captan adecuadamente el impacto de los desastres en los países más pobres, donde los costos en términos de vidas humanas, de medios de subsistencia y de reconstrucción de infraestructuras destrozadas son más elevados. Actualmente, el 85 por ciento de quienes se encuentran expuestos a los terremotos, ciclones tropicales, inundaciones y sequías, viven en países cuyo desarrollo humano es medio o bajo. En términos absolutos, se ha evidenciado que el costo económico de los desastres ha ido en aumento en el transcurso de las últimas décadas (ver Figura 1).



Fuente: Munich Re

**Figura 1 Pérdidas económicas ocasionadas por desastres asociados a fenómenos naturales desde 1950 a 2000**

En la Figura 2 aparecen las pérdidas económicas ocasionadas entre 1991 y 2000 en las distintas regiones geográficas por desastres asociados con fenómenos naturales.



Fuente: EMDAT: La base de datos internacional sobre desastres de OFDA/CRED

**Figura 2 Total de pérdidas ocasionadas por desastres naturales entre 1991 y 2000. Cifras expresadas en millones de dólares estadounidenses (precios de 2000)**

Es evidente que la distribución es muy desigual. Se puede observar que en Europa y América, las pérdidas fueron más altas que en África, pero esto solo refleja el valor de la infraestructura y los bienes en riesgo y no las repercusiones en el potencial de desarrollo.

La base de datos EMDAT ofrece un panorama muy preciso de las pérdidas totales por desastres con un adecuado nivel de detalle nacional. El período de tiempo elegido es suficiente para representar las fluctuaciones con que se manifiestan la mayoría de las amenazas naturales y también coincide con el período de datos más fiable de la EMDAT. En la figura 3 se presenta la cifra total de desastres registrados por la EMDAT entre 1900 y 2000.



Fuente: EMDAT, la base de datos internacional sobre desastres de OFDA/CRED

**Figura 3 Los desastres registrados por la EMDAT.**

La tendencia en aumento sugiere, primero, un aumento exponencial de la frecuencia de los desastres, aunque el factor que más contribuye es la mejora en la elaboración de informes sobre desastres. Aunque no se puede descartar que haya aumentado el número de catástrofes hidrometeorológicas, el que los desastres denunciados tiendan a aumentar probablemente tenga más que ver con los avances en la tecnología de las telecomunicaciones y la cobertura de las diferentes redes de información que cada vez llegan a más rincones del mundo. Por consiguiente, hoy en día hay más posibilidades de denunciar y registrar las pérdidas ocasionadas por los desastres.

## **DESASTRES ASOCIADOS A LOS FLUJOS DE DERRUBIOS**

Los flujos de derrubios son los movimientos rápidos de derrumbes de tierras, ocasionados por flujos hiperconcentrados de agua y sedimentos, que ocurren en una gran variedad de medios ambientes a lo largo de todo el mundo. Son particularmente peligrosos para la vida y las propiedades debido a sus altas velocidades y gran fuerza destructiva, abatiendo casas, caminos, puentes, árboles y cultivos, corrientes naturales y ecosistemas a lo largo de su trayectoria.

Los flujos de escombros o derrubios están generalmente asociados con periodos de precipitación alta e intensidades de lluvias muy fuertes o con nevadas intensas que tienden a presentarse como avenidas de mezclas sedimentos-agua con resultados catastróficos para la zona en donde se presentan.

A continuación se describen brevemente algunos de los desastres asociados a este fenómeno en algunos países del mundo en años recientes, los cuales han sido observados y, en algunas ocasiones, medidas sus características fundamentales.

### *ESTADOS UNIDOS*

Utah recibió atención nacional y su primera declaración presidencial de zona de desastre en la primavera del año 1983 debido a las inundaciones, deslizamientos de tierras y flujo de derrubios causados por tormentas de nieve severas en la región (Wieczorek et al, 1983). Los peores daños ocasionados por los flujos de derrubios se presentaron en el Condado Davis, en la desembocadura del arroyo Rudd. Algunos flujos de derrubios ocurrieron en al menos 600 tributarios del Río Colorado en el Gran Cañón, entre Lees Ferry y Surprise Canyon, Arizona (Melis et al., 1994; Griffiths et al., 1996). La mayoría de los flujos se presentaron durante las tormentas convectivas del verano con intensidades de lluvia del orden de 40 mm/h.

Más de 1,000 flujos de derrubios ocurrieron en las laderas boscosas del Condado de Madison, Virginia Central, durante una intensa tormenta ocurrida el 27 de junio de 1995 (Wieczorek et al., 1996).

Numerosas observaciones de la ocurrencia de flujos de derrubios han sido realizadas en las áreas montañosas del sureste de British Columbia en la última década. En noviembre de 1995 se presentaron dos flujos de derrubios en Pierce Creek en el Valle

Chilliwak y en Hope Creek, con 50,000 m<sup>3</sup> de escombros acarreados durante dos horas, muy cerca de la ciudad de Hope (Jakob et al., 1997).

Una serie de flujos de derrubios se presentaron en varios cañones a 35 millas al este de Pórtland, Oregón, los días 7 y 8 de febrero de 1996, cerca de las pequeñas localidades de Dodson y Warrendale, destruyendo la carretera interestatal 84 así como el ferrocarril y teniendo que ser evacuados los residentes del área al ser destruidas sus casas (Powell et al., 1996).

## CHINA

La provincia Liaoning está localizada en el sur de la región noreste de China entre los 118°53'E y 125°46'E de longitud y desde los 38°43'N hasta los 43°26'N de latitud, dividida en cuatro regiones. El 28 de julio de 1981 una intensa precipitación extrema produjo avalanchas, deslizamientos de rocas y flujos de derrubios en más de 100 barrancas y laderas de la montaña Laomao en esta provincia, teniéndose como resultado 115 villas afectadas en 6 condados afectando a 556,000 personas, destruyendo 38,517 casas, 60,000 hectáreas de cultivos y 4.9 kilómetros de la línea del ferrocarril Changchun-Dalian fueron destruidos. Las pérdidas económicas ascendieron a 547'000,000 de yuans chinos (Zhao Huanchen et al, 1992).

En la relación presentada a continuación, tabla 1, se aprecian algunos lugares afectados por este tipo de fenómenos en años recientes en China.

LOCALIZACIÓN	PROVINCIA	FECHAS
Pingwu, Songpan, Lisian,	Sichuan	16-08-76 a 24-08-76
Songpan, Wenchuan,	Sichuan	16-07-77 a 17-07-77
Desde Baoji a Tianshui,	Shanxi	12-07-78
Dongchuan,	Yunnan	22-10-80 a 25-10-80
Zhaojue	Sichuan	22-10-80 a 25-10-80
Shanxi, Gansu, noreste Sichan,	Sichuan	19-08-81 a 22-08-81
Rangtang, Jinchuan, Heishui	Sichuan	20-07-83 a 29-07-83
Hanzhong,	Shanxi	12-07-84 a 18-07-84
Wenchuan, Nanping,	Sichuan	12-07-84 a 18-07-84
Dongchuan,	Yunnan	26-07-85
Dandong, Fuxian,	Liaoning	14-08-87 a 20-08-87
Dangchang, Zhuoni, Jingxi,	Gansu	06-07-88 a 14-07-

		88
Miduogou, Midui	Sicuaní, Xizhang	85 a 88

**Tabla 1 Afectaciones producidas por flujos de derrubios en China**

### JAPÓN

En Japón durante veinte años, entre 1967 y 1987, perdieron la vida por desastres naturales 4598 personas, de las cuales 1257 fallecieron debido a los flujos de derrubios, lo que corresponde al 27.3% (Takahashi, 1991). Este alto porcentaje se debe a que cada vez con mayor frecuencia las personas tienden a vivir en zonas de alto riesgo al pie de las montañas donde se presentan este tipo de escurrimientos.

En 1990 el volcán Mount Unzen, en Japón, hizo erupción y se presentaron mas de 114 flujos de derrubios (lahars) que depositaron cerca de 8'000,000 de m<sup>3</sup> de debris que destruyeron 1123 edificios. El número de refugios requeridos por este evento fue mayor a los 11,000 en agosto de 1991 (Suwa & Yamakoshi, 1997).

### ITALIA

El día 19 de julio de 1985 la falla de dos presas en el Valle del río Stava, al noreste de Italia causó un flujo de derrubios catastrófico, que destruyó 2 villas y mató a 270 personas (Berti et al, 1997).

Un flujo de derrubios ocurrió el día 18 de octubre de 1990 en Pomonte Creek, con flujos hacia aguas abajo de Monte Capanne en la isla Elba, del Archipiélago de Toscana, Italia, con aproximadamente 34,000 m<sup>3</sup> de debris, (Iotti & Simoni, 1997).

### TAIWAN

Durante la década pasada, ocurrieron varios desastres producidos por flujos de derrubios en Taiwán, causando cientos de muertes, pérdidas y personas lastimadas, así como daños en casas, escuelas, caminos, puentes y otras propiedades públicas y privadas (Cheng et al). En la tabla 2 se presentan las características de 6 desastres producidos por flujos de derrubios en años recientes en esta región.

LOCALIZACIÓN	FECHA	IMPACTOS
Tug-Men, Hualien, Taiwán	23-06-90	29 muertos, 6 perdidos, 7 heridos, 24 casas destruidas, 68 damnificados y daños importantes a caminos.
Chun-Keng Kuo, Nantou, Taiwán	31-07-96 a 01-08-96	4 muertos, daños importantes a casas, caminos y otras propiedades.
Er-Bu-Keng, Taiwán	31-07-96	5 muertos, 10 casas y 3.78 hectáreas de fruta destruidas, daños importantes en arroyos.

Feng-Chiu, Nantou, Taiwán	31-07-96 a 01-08-96	2 muertos, 10 casas y 14 hectáreas de cultivos destruidos, graves daños en 18 caminos, presas y ríos.
Tung-Fu, Nantou, Taiwán	31-07-96	2 muertos, 18 casas destruidas o dañadas.
Shen-Mu Village, Nantou, Taiwán	31-07-96 a 01-08-96	5 muertos, 6 heridos, 8 casas y puentes destruidos, daños importantes a 3 hectáreas de cultivos.

**Tabla 2 Zonas afectadas por flujos de derrubios en Taiwán**

### *ASIA CENTRAL*

Asia central es un área con un alto grado de riesgo por flujos de derrubios, siendo las más importantes las colinas del Valle Fergana, el Valle Zerafshan, la cuenca Issyk-Kul, la parte central y sur de Tadjikistan y también las colinas de Kopetdag. En todas estas áreas los flujos destructivos ocurren durante el periodo de la primavera-verano en pequeños ríos y canales efímeros (Salikhova & Liahovskaya, 1992).

### *ALEMANIA*

La villa de Tramin en el sur de Tyrolia fue afectada por un repentino flujo de derrubios que se presentó durante una tormenta severa el día 23 de junio de 1986, que destruyó completamente el nuevo centro de recreación local y dañó seriamente una cooperativa de vino, estimándose el daño total en 6 millones de dólares (Strunk, 1990).

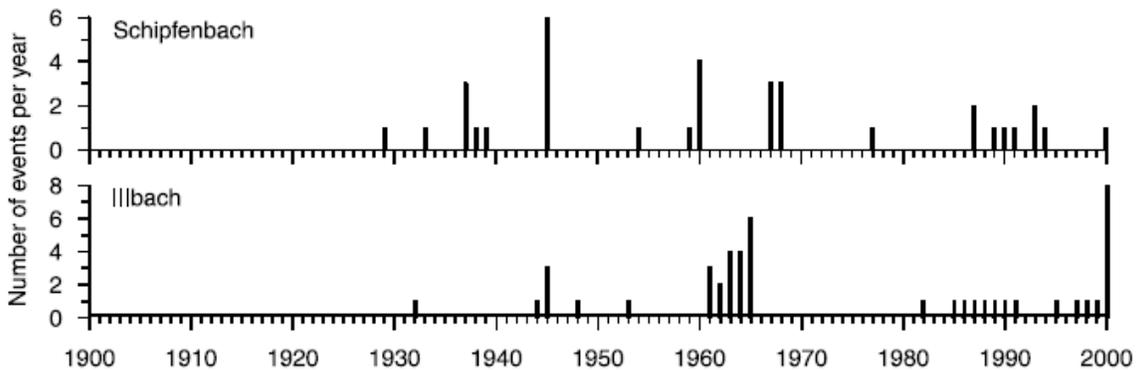
### *SUIZA*

Los flujos de derrubios son un fenómeno común en los Alpes suizos, así como en otras zonas montañosas del mundo. Una herramienta importante para entender la mecánica de este tipo de flujos es la instalación de estaciones de observación que permite obtener datos en tiempos reales. Se instalaron este tipo de estaciones en 3 cuencas de Suiza, equipadas con videocámaras, dispositivos ultrasónicos, radares, geóponos e instrumentos para medición de la precipitación. En la figura 4 se presenta la localización de estas estaciones.



**Figura 4 Localización de las 3 estaciones de observación de flujos de derrubios en Suiza**

Se presentan en la gráfica 5 el número de eventos de flujo de derrubios por año que se han registrado en dos de estas cuencas hidrológicas de Suiza.



**Figura 5 Registros históricos de flujos de derrubios durante el siglo XX en Schipfenbach e Illbach, Suiza. (Hurlimann et al, 2003)**

En el año 2000 fueron observados cuatro flujos de derrubios importantes en esta zona de Suiza, midiéndose sus características más destacadas, variando el volumen de material depositado desde 5,000 m<sup>3</sup> hasta 35,000 m<sup>3</sup>; el rango de velocidades medias fue de 2.0 m/s hasta 5.0 m/s y los gastos máximos de flujo se presentaron entre 20 m<sup>3</sup>/s a 125 m<sup>3</sup>/s.

**RUSIA**

Las áreas en donde se han presentado mayor cantidad de flujos de derrubios en este país son tres regiones: al este de las montañas Sayan, la montaña al sureste del Lago Baikal y el noreste de la región Baikal, con registros desde 1871 a 1971, (Makarov y Agafonov, 1977).

### *FILIPINAS*

La erupción del Monte Pinatubo en junio de 1991 depositó de 7 a 8 km<sup>3</sup> de material piroclástico en las laderas del volcán. Estos depósitos piroclásticos formaron las fuentes de sedimento para los flujos de escombros de volcán (lahares) frecuentes y de gran escala, que se presentan cada temporada de lluvias causando grandes cambios morfológicos y devastación masiva en la zona. A la fecha más de 400,000 personas han sido desplazadas y alrededor de 350 km<sup>2</sup> de tierras de cultivo agrícola están cubiertas de material de lahar.

El número de muertos en una serie de deslaves ocurridos en Filipinas tras seis días de intensas lluvias puede superar el centenar, dijeron las autoridades del país, después de que fueran recuperados 35 cadáveres y decenas de personas siguieran desaparecidas, en diciembre de 2003. Unas 300 personas fueron evacuadas hacia zonas más seguras después de que los soldados llegaran a la zona de desastre a rescatar a víctimas atrapadas bajo el lodo y los escombros desprendidos de las colinas de los alrededores, dijeron las autoridades.

### *UCRANIA*

La combinación de condiciones naturales en las montañas Carpatian, Crimean y los desfiladeros a lo largo de los ríos Dnieper y Dniester son favorables para la formación de los flujos de derrubios, (Yablonskiy et al, 1992).

### *CANADA*

Howe Sound es una región propensa a la presencia de flujos de derrubios, que se extiende desde la bahía Horseshoe (20 Km al noroeste de Vancouver) hasta Squamish, en Canadá, donde se han presentado un gran número de estos eventos debidos al tipo de suelo, pendientes en sus valles así como la deforestación e incendios en la zona.

### *BRASIL*

A principios de agosto de 2000 se produjeron grandes flujos de derrubios provocados por cinco días de lluvias torrenciales en el noreste de Brasil, provocando 28 muertos y 90,000 desamparados. El mal tiempo provocó los daños más graves en los estados de Pernambuco y Halagaos, afectando a 46 localidades.

### *ECUADOR*

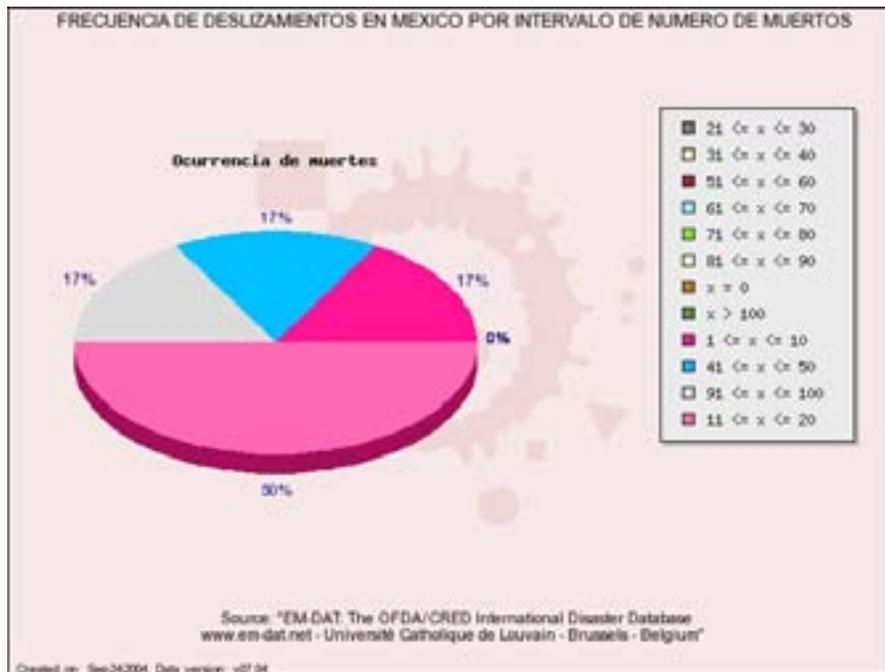
Al menos 36 personas muertas, 11 desaparecidas y 212 familias damnificadas fue el saldo que dejaron los flujos de derrubios ocurridos en Ecuador el día 13 de junio de

2001, afectando a las provincias de Papallacta, Amazonia, Tungurahua y Zamora Chinchipe.

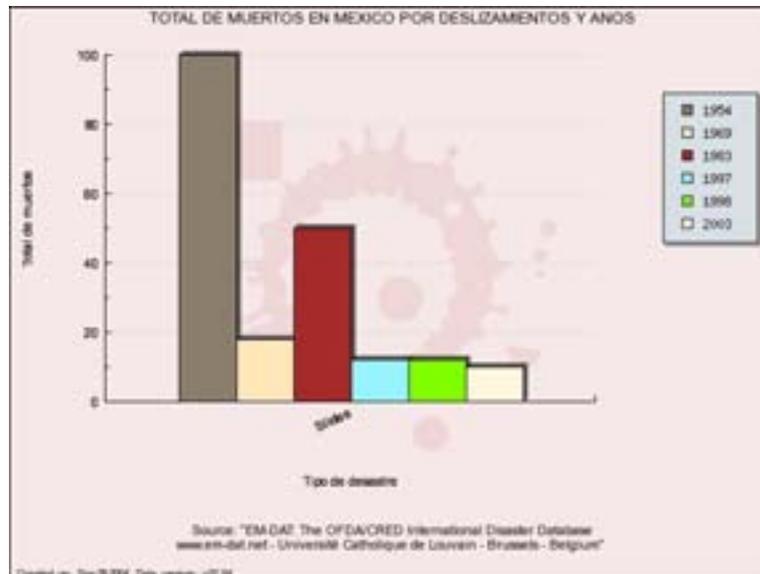
**MÉXICO**

En nuestro país se han presentado gran cantidad de flujos de derrubios en los años recientes, muchos de ellos en el eje trans-volcánico mexicano y en las cordilleras costeras, tales como los ocurridos en el volcán Popocatépetl, en el volcán Pico de Orizaba, en el volcán Nevado de Toluca, en las montañas de Puebla, en Acapulco, Gro., en la ciudad de Tijuana, B.C. y en la cordillera costera de Chiapas y Oaxaca, por mencionar solamente los que han producido desastres importantes en tiempos recientes.

La base datos EM-DAT ha registrado las características de los deslizamientos registrados en México presentados en las figuras 6 y 7.



**Figura 6 Deslizamientos en México en función del número de muertos.**



**Figura 7 Total de muertos en México por año debido a deslizamientos**

## VENEZUELA

Probablemente uno de los desastres producidos por la combinación de diversos procesos de remoción en masa, incluyendo los flujos de derrubios, de dimensiones mayores en años recientes, sea el debido a la tormenta del 14 al 16 de diciembre de 1999 en las costas de Venezuela, particularmente en las laderas de la Sierra de Ávila, al norte de Caracas, Venezuela.

La tormenta severa del 14 al 16 de diciembre de 1999 causó deslizamientos de tierra catastróficos e inundaciones con flujo de derrubios a lo largo de 40 kilómetros sobre la costa de Caracas, entre la Guaira y Naiguata, localizadas en el estado costero de Vargas, Venezuela. Los daños a las comunicaciones y la infraestructura de esta zona fueron muy amplios. En Vargas más de 8,000 residencias individuales y 700 edificios de departamentos fueron completamente destruidos (Salcedo, 2000). En la fotografía 8 se observan algunos daños en esta zona.



**Fotografía 8 Algunos daños en edificios y viviendas localizadas en la trayectoria principal de los flujos de derrubios en Vargas, Venezuela.**

Los caminos, los servicios telefónicos, de electricidad, agua y alcantarillado fueron severamente dañados. Las pérdidas económicas totales se calculan en \$ 1.79 billones y estimaciones preliminares establecieron que entre 5,000 y 50,000 personas fallecieron (Brandes, 2000; Sancio y Barrios, 2000; Salcedo 2000; y USAID; 2000). La cifra actual manejada de personas muertas por esta catástrofe es de 30,000 aproximadamente (USAID, 2001), aunque ha sido difícil precisar el número exacto de víctimas, debido a la zona de desastre en que fue convertida la ciudad de Vargas y al arrastre de cuerpos hacia el mar, lográndose recuperar alrededor de 1,000 cuerpos. La estimación del número de habitantes de Vargas era de 300,000 habitantes antes de la catástrofe, lo que significa que aproximadamente el 10% o más fallecieron por este evento.

## **MODELOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL INICIO DE LOS FLUJOS DE DERRUBIOS**

El análisis de los principales mecanismos desencadenantes del inicio del movimiento en un flujo de derrubios subrayan que los factores causantes de esta fase del proceso son la localización del área desencadenante y el mecanismo principal desencadenante (acciones hidrodinámicas, causas geotécnicas y equilibrio mecánico).

En un nivel de pronóstico es difícil identificar cuál de estos mecanismos es el más probable o realiza la mayor contribución; en cualquier caso, alguno de estos tipos de mecanismos puede incluir a otros, o más bien, dentro del mismo evento distintos mecanismos desencadenantes pueden ocurrir en diferentes áreas de la cuenca.

En algunos estudios relativos a las condiciones de desencadenamiento de flujos de derrubios no cohesivos seguidos de un flujo de agua superficial, el análisis se concentra en el estudio de la inestabilidad de la acumulación de materiales que tiene lugar a continuación de la saturación.

Un flujo superficial que escurre a lo largo de una ladera, proveniente de una lluvia intensa, primeramente satura las capas de derrubios, a continuación los moviliza,

causando de este modo la dispersión de las partículas sólidas de la acumulación a lo largo de la profundidad completa del escurrimiento superficial, el cual se convierte finalmente en un flujo de derrubios.

Con el propósito de identificar los mecanismos que involucran al material sólido dentro de un flujo líquido, es necesario analizar los papeles jugados por las varias fuerzas actuantes en la génesis del movimiento. Las aproximaciones desarrolladas hasta la fecha son las siguientes, (Lorenzini et al., 2004):

- a. Modelo de estabilidad de talud infinito.
- b. Aproximación de Shields.
- c. Aproximación de Takahashi.
- d. Desarrollos recientes.

El proceso de inicio de los flujos de derrubios está influido por gran cantidad de factores, destacando: geológicos y morfológicos, hidrológicos, cobertura vegetal, topográficos y antrópicos; siendo necesario establecer una metodología que tome en consideración la mayor parte de estos aspectos.

Algunas investigaciones han tratado de entender la relación entre los procesos geomorfológicos y los climáticos que desencadenan los flujos de derrubios. En estos trabajos se han analizado las propiedades físicas de los taludes fallados, los efectos del ángulo de inclinación y la presión de poro en los suelos, la mecánica del movimiento de los flujos de derrubios y las propiedades de los depósitos resultantes, (Scott 1972, Williams and Guy 1973, Hollingsworth and Kovacs 1981, Istok and Harward 1983, Pierson and Costa 1987, Montgomery and Dietrich, 1994; Wu and Sidle, 1995; Pack, 1995; Morgan et al. 1997, Reid et al. 1997, Griffiths et al. 1997, Wieczorek et al. 1997, Tognacca & Bezzola 1997, Gregoretti 2000, Iverson 2000, Chen & Jan 2003, Reid et al. 2003, Savage & Baum 2003).

En la mayoría de estos trabajos de investigación se observa la necesidad de efectuar una serie de determinaciones y cálculos sobre una gran extensión de terreno afectado por la presencia de un flujo de derrubios, lo que origina la necesidad de desarrollar un sistema de información geográfica, que permite efectuar los cálculos de manera ordenada en la malla de cálculo propuesta.

## **SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

De acuerdo a los requerimientos necesarios para la determinación de las zonas de inicio producidas por los flujos de derrubios en una región montañosa, se puede seleccionar el empleo del software desarrollado por ESRI para un sistema de información geográfica, llamado ArcView GIS 3.3 o alguno otro más reciente, debido su versatilidad y características.

A lo largo de la década de los 1990, los paquetes para SIG profesionales diseñados para trabajo productivo pesado fueron de uso no-amigable para usuarios casuales de

un SIG. Por ejemplo, versiones más antiguas de ArcInfo y MGE fueron sistemas de software complejo que requerían un entrenamiento especial y habilidades técnicas.

La mayoría de los usuarios de aplicación de un SIG, tales como los ingenieros civiles y los ingenieros ambientales, no tienen la experiencia técnica para desarrollar, correr y mantener un SIG complicado.

Por otra parte, ArcView 3.x es una software para mapeo de escritorio con ambiente amigable y una herramienta para SIG que puede aprenderse por la mayoría de las personas sin entrenamiento extenso ni experiencia en un SIG.

ArcView 3.x es un sofisticado software de escritorio para mapeo y un paquete para SIG que trae el poder de un SIG a los usuarios promedio de una PC (Personal Computer). Con más de 500,000 usuarios, ArcView puede ser considerado como el paquete de escritorio para un SIG más popular en todo el mundo. Las principales características de ArcView 3.x son las siguientes:

- ✓ Tiene un ambiente amigable y proporciona un contexto sensible con ayuda en línea.
- ✓ Está disponible para sistemas operativos de Windows, Mac y UNIX.
- ✓ Puede acceder y enlazar documentos, imágenes, tablas, textos, gráficas, mapas, multimedia y dibujos de CAD de una forma integrada y comprensiva.
- ✓ Proporciona una rutina de despliegue y ploteo mapas para sistemas de abastecimiento de agua, alcantarillado e inundaciones y provee herramientas para interrogar la base de datos del SIG.
- ✓ Ayuda al usuario a seleccionar rápidamente y desplegar diferentes combinaciones de datos para la visualización creativa de datos para mapeo.
- ✓ Es compatible con los formatos de los archivos de ArcInfo, PC ArcInfo y ArcCAD.
- ✓ Suministra herramientas de edición para la creación de mapas nuevos y la modificación de los existentes.
- ✓ Provee la capacidad de ajustar direcciones y direcciones geocodificadas, por ejemplo, los datos tabulares conteniendo direcciones de calles pueden ser desplegados como puntos en un mapa.
- ✓ Puede emplear directamente dibujos de AutoCAD (archivos tipo DWG) o archivos intercambiables de AutoCAD (archivos DXF).
- ✓ Utiliza archivos con formato dBASE para el manejo de los datos y puede acceder información desde otras aplicaciones, tales como FoxPro, Lotus 1-2-3 y Microsoft Excel.
- ✓ Puede enlazar información de un mapa a las bases de datos SQL, tales como Oracle, Ingres, Informix y Sybase, las cuales son comúnmente usadas en el gobierno local, estatal y federal de los Estados Unidos de Norteamérica.
- ✓ Soporta DLL (por sus siglas en inglés, Dynamic Link Libraries) y DDE (Dynamic Data Exchange), las cuales pueden ser utilizadas para proporcionar capacidades de interfase e integración de tercera generación eficientes.
- ✓ Los datos para un SIG pueden ser explorados y recuperados mediante la selección de rasgos o la formulación de expresiones lógicas.
- ✓ Los datos para un SIG pueden ser desplegados para presentación y reportes como cuadros, gráficas de barras o tablas.

- ✓ Avenue (lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado para ArcView 3.x) o Microsoft Visual Basic pueden ser empleados para crear aplicaciones de costumbre y usar interfases.

## CONCLUSIONES

El incremento de la presencia de los desastres asociados a los fenómenos naturales en los territorios a nivel mundial y en México se ha incrementado de manera significativa en las últimas décadas, como es el caso de los desastres asociados a los flujos de derrubios. Por lo que es necesario implementar modelos, estudios y desarrollos que permitan conocer la génesis de este tipo de fenómenos naturales, los cuales permitan implementar sistemas de alerta temprana en los distintos territorios, que permitan reducir la magnitud de las pérdidas de vidas humanas y económicas que están asociadas a dichos fenómenos de la naturaleza.

Se analizaron las cuatro aproximaciones desarrolladas hasta la fecha para identificar los mecanismos que involucran al material sólido dentro de un flujo líquido, así mismo se analizaron los papeles jugados por las varias fuerzas actuantes en la génesis del movimiento de un flujo de derrubios y se seleccionó el empleo del modelo de estabilidad de talud infinito y el desarrollo de un sistema de información geográfica en la zona del flujo de derrubios.

El cálculo del factor de seguridad (FS) está basado en la forma para talud infinito de la ley de falla de Mohr-Coulomb, expresada mediante la relación de fuerzas estabilizadoras con respecto a las fuerzas desestabilizadoras en un plano de falla paralelo a la superficie del suelo, (Hammond et al., 1992, Montgomery and Dietrich, 1994) que compara las componentes desequilibrantes debido a la acción de la gravedad y las componentes resistivas de fricción y cohesión sobre un plano de falla paralelo a la superficie del terreno con efectos de borde despreciables. La presión de poro debida a la mezcla de suelo reduce el esfuerzo normal efectivo, el cual gracias al ángulo de fricción interna es relacionado con el esfuerzo cortante. La presión hidráulica de poro es calculada suponiendo un estado uniforme hidrológico con la profundidad del suelo saturado suficientemente calculado para sostener una descarga lateral proporcional al área de captación específica (el área talud arriba por unidad de longitud de contorno). Estas relaciones se expresan a través de la ecuación general de estabilidad de talud infinito, que presenta la forma siguiente:

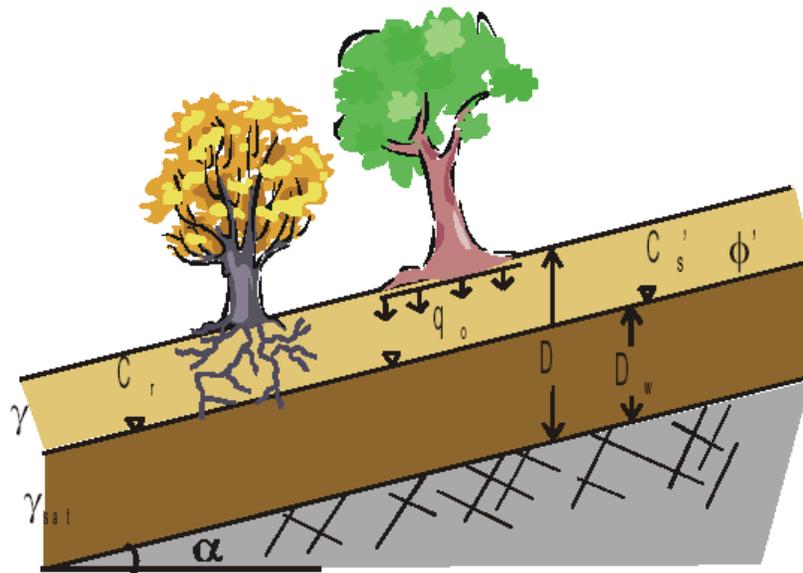
$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_s g (D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g) D_w] \tan \phi}{D \rho_s g \sin \theta \cos \theta}$$

En esta expresión las variables tienen el significado mostrado en la figura 9 y definidas enseguida.

$FS$ , factor de seguridad.

$\theta$ , ángulo del terreno con la horizontal, en grados.

- $\phi$ , ángulo de fricción interna efectivo, en grados.  
 $\rho_s$ , densidad del suelo [M/L<sup>3</sup>].  
 $\rho_w$ , densidad del agua [M/L<sup>3</sup>].  
 $D$ , profundidad vertical total del suelo [L].  
 $D_w$ , espesor vertical de la línea freática [L].  
 $C_r$ , fuerza de la raíz de los árboles, expresada como cohesión [F/L<sup>2</sup>].  
 $C_s$ , cohesión efectiva del suelo [F/L<sup>2</sup>].  
 $g$ , aceleración de la gravedad [L/T<sup>2</sup>].

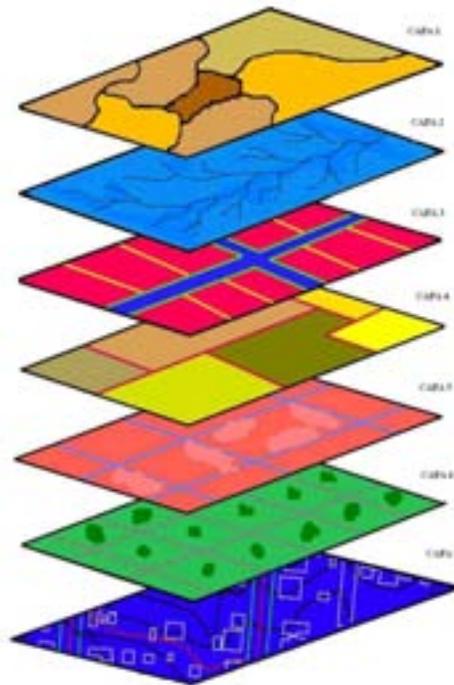


**Figura 9 Variables utilizadas en la ecuación del Modelo de estabilidad de talud infinito**

Atendiendo a los factores desencadenantes del proceso de inicio en los flujos de derrubios se proponen los temas enlistados a continuación como parte integrante del análisis de un flujo de derrubios mediante un sistema de información geográfica:

- CAPA 1. Topografía de la zona de estudio.
- CAPA 2. Datos hidráulicos superficiales.
- CAPA 3. Ángulo de fricción interna del suelo.
- CAPA 4. Densidad del suelo.
- CAPA 5. Cohesión del suelo.
- CAPA 6. Cobertura vegetal (fuerza de la raíz de los árboles).
- CAPA 7. Datos hidráulicos subterráneos.

En el esquema presentado en la figura 10 se observan los temas o capas propuestos para el desarrollo de un SIG utilizado en el estudio de un flujo de derrubios:



**Figura 10 Temas o capas propuestas en el modelo seleccionado para efectuar el análisis de un flujo de derrubios.**

### TRABAJOS FUTUROS

Se requiere aplicar el modelo de estabilidad de talud infinito y las capas propuestas para un sistema de información geográfica a un flujo de derrubios ocurrido en algún sitio con mediciones reales en campo de sus características, lo que permitirá efectuar la validación del modelo propuesto en este artículo, con lo cual se está trabajando en el presente, esperando poder presentar los resultados numéricos en un futuro próximo.

### REFERENCIAS

- Cheng, K., Lin, L., Chang, S.** 1997. The field investigation and GIS application in a potential hazardous area of debris flow. *Proceedings of the First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, ASCE, 83-92.
- Cho, S. E., and Lee, S. R.** 2002. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128(9), 756-763.
- Hamilton, R. M.** 2000. Science and technology for natural disaster reduction. *Natural Hazards Review*, ASCE, 1(1), 56-60.
- Highland, L. M., Ellen, S. D., Christian, S. B., y Brown III, W. M.** 1997. *Debris-flow hazards in the United States*. USGS, Fact Sheet 176-97.
- Honda, N., Egashira, S.** 1997. Prediction of debris flow characteristics in mountain torrents. *Proceedings of the First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, ASCE, 707-716.
- Lanfeard, K. J.** 2000. The future of GIS and water resources. *Water Resources Impact*, AWWA, Vol. 2, and number 5, September 2000, 9-11.

- López, J. L., García, R.** 2002. Análisis y mapeo de inundaciones torrenciales en abanicos aluviales (Parte I y Parte II). *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cuba, IAHR.
- Makarov, S., Agafonov, B.** 1997. Activity of debris-flow process in the Baikal region during the recent centuries. *Proceedings of the First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, ASCE, 64-73.
- Sakellariou, M. G., y Ferentinou, M. D.** 2001. GIS-based estimation of slope stability. *Natural Hazards Review*, ASCE, 2(1), 12-21.
- Shamsi, U. M.** 2002. *Gis tools for water, wastewater, and stormwater systems*. First Edition, ASCE Press, 375 pages.
- Vasconcelos, M., Goncalves, A., Catry, F.** 2002. A working prototype of a dynamic geographical information system. *International Journal of Geographical Information Science*, Pubs. Taylor & Francis, 16(1), 69-91.