



XII Congreso Geológico Chileno  
Santiago, 22-26 Noviembre, 2009



---

S3\_011

## **Factores litológico-geotécnicos en el peligro de movimientos cosísmicos de ladera en El Salvador.**

Tsige, M<sup>1</sup>., García, I., Capote, R., Martínez, J., Benito, B.

(1) Dpto. Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, UCM. 28040 Madrid, España.

[meaza@geo.ucm.es](mailto:meaza@geo.ucm.es)

### Introducción

El Salvador es uno de los países más pequeños de Centro América con una extensión de 21.040 km<sup>2</sup> y una población aproximada de 7 millones de habitantes. Se sitúa dentro de una de las zonas sísmicamente más activa. Asociados a los frecuentes terremotos que afectan al país se producen inestabilidades de ladera que han causado daños severos siendo en ocasiones estos muy superiores a los efectos producidos por los temblores. Las fuentes de los terremotos en la región principalmente son; la zona de subducción donde la placa de Cocos subduce bajo la placa del Caribe que produce sismos de gran magnitud ( $M_w > 7$ ) y la falla de desgarre de más de 100 km de longitud (Zona de Falla de El Salvador), que es considerada como una de las fuentes responsables de algunos de los terremotos más destructivos [1]. En esta se producen terremotos de menor magnitudes ( $M_w < 6,7$ ) y más superficiales (<de 20 km). Desde el punto de vista geológico, es un país relativamente joven, donde la mayor parte del territorio está ocupado por materiales recientes del Plio-Cuaternario y de origen volcánico, compuestos por, rocas de composición, riolítica, dacítica y andesítica, así como por materiales piroclásticos [2]. Los depósitos más recientes donde se producen la mayor parte de las inestabilidades de ladera están formados por cenizas volcánicas no consolidadas, lapilli, depósitos de flujos, brechas y tobas.

### Control litológico-geotécnico en los movimientos de ladera cosísmicos

Los movimientos sísmicos pueden inducir inestabilidades en taludes y laderas naturales, de distintas tipologías. Uno de los aspectos más relevantes de los deslizamientos inducidos por terremotos, son las grandes áreas que se ven afectadas que pueden ser desde 200 km<sup>2</sup> para  $M_w$  de 6,0  $M_w$  hasta 400.000 km<sup>2</sup> para  $M_w > 8$  [3] y el volumen de material que ponen en movimiento, en ocasiones de varios millones de metros cúbicos. Al igual que varios países centro Americanos, en El Salvador se han producido numerosos terremotos que han producido inestabilidades de varios tipologías; caída de bloques, avalanchas de roca, desprendimientos y derrumbamientos y deslizamientos de



XII Congreso Geológico Chileno  
Santiago, 22-26 Noviembre, 2009

---

tierra de gran tamaño, que han causado importantes daños materiales y una gran alarma social. El impacto de éstos quedó demostrado en los dos movimientos sísmicos ocurridos en el año 2001 que produjeron un gran número de deslizamientos y que causaron alrededor de 800 muertos y daños económicos muy elevados. El primero de los terremotos se produjo el 13 de Enero en la zona de subducción con una magnitud Mw 7.7 y 40 km de profundidad. El epicentro fue situado a 100 km de la costa Oeste del país y activó gran número de movimientos de ladera y taludes de diferente magnitud, causando daños en varios países (El Salvador, Guatemala y Nicaragua), si bien fue en El Salvador donde se concentraron gran parte de sus efectos más destructivos [4]. Estas han sido desprendimientos de roca y suelos relativamente superficiales y de pequeña envergadura. Sin embargo, en una zona muy localizada a grandes distancias del epicentro se produjeron grandes deslizamientos y flujos (Las Colinas y La Curva de la Lona) siendo los que causaron daños importantes. El segundo terremoto del 13 de Febrero 2001, de magnitud 6,6 MW profundidad de unos 14 km se produjo debido a la actividad de la falla de desgarre, [5]. Este también activó cientos de inestabilidades, fundamentalmente de tipo “desprendimiento coherente roca-suelo”, en ocasiones de grandes dimensiones a pesar de su baja magnitud. Entre ellos destacan los deslizamientos que afectaron a los ríos El Desague y Jiboa, La quebrada del muerto entre otros. Éstos pusieron en movimiento una gran cantidad de materiales que interceptaron y bloquearon los cauces de los ríos Jiboa (12 millones m<sup>3</sup>) y El Desagüe (1,5 millones m<sup>3</sup>), formando presas artificiales, llegando a amenazar con su rotura e inundación catastrófica a las poblaciones situadas aguas abajo. Aunque el área afectado por estas inestabilidades parece coincidir con las establecidas por [6] según la magnitud de los terremotos, es de destacar la concentración local y distribución anómala de las inestabilidades especialmente los grandes deslizamientos. En los dos casos independientemente del origen del movimiento sísmico y la distancia del foco, las zonas de mayor concentración de las inestabilidades se situaron fundamentalmente en la parte central del país coincidiendo con la cadena volcánica joven. Del análisis realizado en este estudio se desprende la existencia de un *efecto local* importante donde deben haber coincidido varios aspectos geológicos y geomorfológicos que han modelado la distribución, tamaño y mecanismo de rotura. Dentro de ellos los más importantes son; a) comportamiento geotécnico-sísmico de los materiales geológicos b) la topografía; derivada del fuerte encajamiento de los ríos y de la rugosidad [7] y c) las estructuras tectónicas: fallas y discontinuidades preexistentes. El 80% de las inestabilidades se produjo en las FM's de San Salvador y Cuscatlan (Fig. 1) compuestos por depósitos piroclásticos, lapilli y tobas andesíticas con frecuentes intercalaciones de cenizas volcánicas poco consolidados y paleosuelos arcillosos. Estos depósitos en su mayoría son limos y arenas de baja plasticidad con cantos de tamaño considerable. Por lo general estos cantos están englobados en una matriz areno-limosa, por lo que a efectos de comportamiento geomecánico el material actúa como un material limoso o limo-arenoso unido por cementos frágiles. Una de las características más relevantes desde el punto de vista de su comportamiento geotécnico-dinámico de esta



XII Congreso Geológico Chileno  
Santiago, 22-26 Noviembre, 2009

matriz es su microestructura en forma de panel de abeja (con enlaces químicos débiles) que contribuyen tanto a la amplificación de las ondas sísmicas como, al comportamiento resistente de conjunto de los materiales. Esta microestructura abierta unido a la existencia de numerosos cristales con porosidad intracristalina (fig. 2), dan lugar a densidades muy bajas al conjunto de los depósitos, pudiendo amplificar las ondas sísmicas en varios órdenes de magnitud. En el caso del deslizamiento de mayor destrucción (La Colinas) se han registrado un PGA de hasta 1.1g. Por otra parte, estos materiales presentan una alta cohesión debido a la cementación química primaria de origen volcánico (aluminio-silicio-magnesio) pudiendo mantener taludes altos ( $>45^\circ$ ). Esta cementación enlaza los granos de limo y arena, dando una microestructura metaestable (fig 2). Durante el temblor se produce la destrucción de la estructura y el material pierde su resistencia al corte produciendo un efecto de licuación, pero con el aire jugando el papel que generalmente desempeña el agua. En este estado adquieren un comportamiento que podemos llamar como quick-silt pudiendo desplazarse grandes distancias.

Respecto a la morfología es de destacar que, la mayor parte de éstos se encuentran en un valle muy encajado, en cuya base discurría el río. La interacción entre las ondas sísmicas y la morfología de las laderas, con pendientes de  $30-45^\circ$  y valles encajados, produce un complejo comportamiento de los movimientos de tierra, dando lugar a una concentración local de estos procesos. La propagación lateral de las ondas difractadas y su interferencia con las ondas primarias (P y S) debe haber creado una variación tanto de la amplitud como de la fase, produciendo una amplificación importante del movimiento del terreno.

Por otra parte, los grandes movimientos de tierra se concentraron preferentemente a lo largo de elementos geológicos estructurales lineales preexistentes, fundamentalmente fallas y fracturas preexistentes [8], lo que indica un fuerte control tectónico en la concentración y tamaño de estos fenómenos. A ello debe haber contribuido también el factor “fuente cercana”, debido a la rotura de la falla y correspondiente direccionamiento de las ondas sísmicas verticales y a la presencia de la discontinuidad lateral. Además los límites y planos de algunos deslizamientos (la curva de la Leona Jibia), coinciden en parte con fracturas preexistentes.

### Conclusiones

En el mecanismo, volumen y concentración de los deslizamientos disparados por los dos terremotos ocurridos en el Salvador en el año 2001, confluyen varios factores de entre los que se pueden destacar la litología, con presencia de materiales especiales tales como cenizas volcánicas no consolidadas y paleo-suelos arcillosos endurecidos, la topografía, con pendientes altas y valles encajados y discontinuidades preexistentes que controlan el tamaño y mecanismo de rotura. Esta observación se puede emplear y será útil para la elaboración de un mapa de microzonación de los movimientos de tierra que se pueden disparar por terremotos y ser utilizada para la planificación territorial y análisis de mitigación.



Geología  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

XII Congreso Geológico Chileno  
Santiago, 22-26 Noviembre, 2009

### Referencias

- [1] White, R., (1991) Tectonic implications of upper-crustal seismicity in Central America Boulder, Colorado, *Geological Society of America, Geology of North America*, Decade map volume, p. 323–338.
- [2] Bosse, H.R., Lorenz, W., Merino, A., Mihm, A., Rode, K., Schmidt-Thomé, M., Wiesemann, G., and Weber, H.S., (1974) Geological map of El Salvador Republic: *Hannover Germany, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*, D-3 scale 1:500,000
- [3] Wilson, R.C. y Keefer, D.K. (1985) Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding. In: *Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region: An Earth-Science Perspective* (J.I. Ziony, Ed.). U.S. Geological Survey Professional Paper 1360, Washington, 317-345.
- [4] SNET (2005) Servicio Nacional de Estudios Territoriales. Los deslizamientos de tierra en El Salvador, algunos aspectos importantes.
- [5] Martínez-Díaz, A. Álvarez-Gómez, B. Benito D. Hernández, (2004) Triggering of destructive earthquakes in El Salvador. Triggering of destructive earthquakes in El Salvador. *Geology*, 32-1::65-68.
- [6] Boomer & C. Rodríguez, (2002) Earth-quack induced landslides in Central America. *Engineering Geology*, 63 189-220.
- [7] García Rodríguez, M. (2008). Metodología para la evaluación de peligrosidad de los deslizamientos inducidos por terremotos. *Tesis doctoral*, Universidad de Alcala.
- [8] Tsige, M., I., García-Flórez, R., Capote, R., Mateos, (2008). Los grandes deslizamientos inducidos por los terremotos de El Salvador del 2001. *Geotemas 10, SGE*

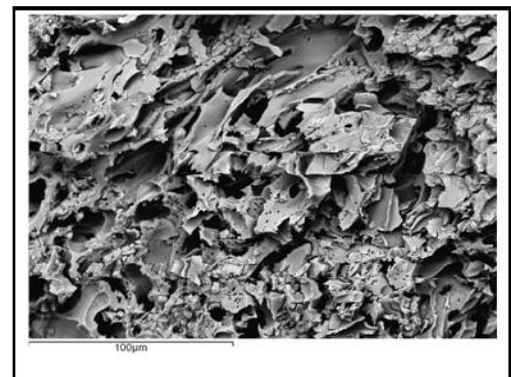
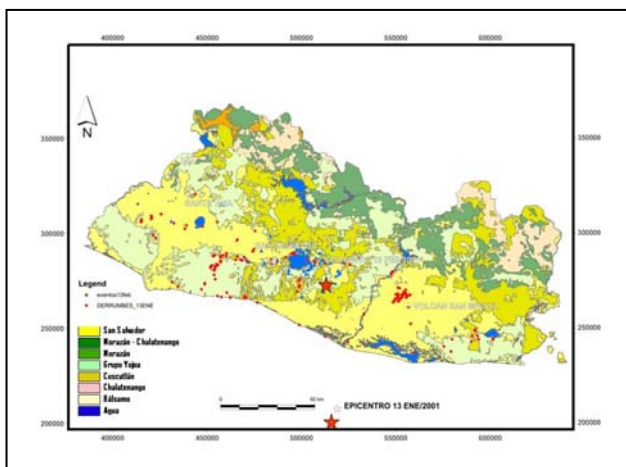


Figura 1. Situación de los movimientos de ladera y taludes disparados con los dos sismos del 2001 y las formaciones geológicas mas importantes de El Salvador. Figura 2. Micro-estructura de los materiales involucrados en la mayor parte de los grandes deslizamientos.