

Identificación de zonas susceptibles a deslizamientos en Tegucigalpa, Honduras. Limitaciones del modelo del talud infinito

Identification of landslide susceptible areas in Tegucigalpa, Honduras. Limitation of the infinite slope model

Ginés Suárez Vázquez¹ y María José Domínguez-Cuesta²

¹ Banco Interamericano de Desarrollo, Colonia Escalón 89 Avenida Norte, Edificio World Trade Center Torre 1, Nivel 4. San Salvador, El Salvador. giness@iadb.org

² Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. C/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005. Oviedo, España. dominguezmaria@uniovi.es

RESUMEN

Este trabajo se centra en un área de 260 km² en el municipio de Tegucigalpa, capital de Honduras, que es el municipio que presenta un mayor número de deslizamientos históricos a nivel nacional (39% de los registros). El objetivo es validar la aplicabilidad del modelo del talud infinito para identificar las zonas más susceptibles a deslizamientos dentro de los suelos presentes en la zona de estudio. Para dicha validación se realizaron modelizaciones con el programa PISA-m en 5 deslizamientos activos que contaban con datos de propiedades geotécnicas y se realizó un análisis de sensibilidad de la fórmula del talud infinito. Se concluye que el modelo del talud infinito presenta un ajuste aceptable en las partes de los deslizamientos que presentan mayores pendientes, pero requiere la realización de ajustes con criterio experto para incluir las secciones de los deslizamientos que se encuentra en terrenos con pendientes inferiores a 10°.

Palabras clave: Deslizamiento, PISA-m, Talud infinito, Coluviones, Tegucigalpa

Geogaceta, 69 (2021), 51-54
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción

La ciudad de Tegucigalpa, capital de Honduras, ha experimentado en los últimos años un crecimiento acelerado, lo que ha contribuido a que una parte importante de su población se haya asentado en áreas propensas a sufrir procesos de gravedad (Fig. 1).

La ciudad cuenta con diversos estudios sobre la problemática de los movimientos de ladera, que incluyen inventarios, estudios de susceptibilidad y estudios de lluvias desencadenantes.

Sin embargo, la utilidad de estos estudios para facilitar la toma de decisiones sobre ocupación del territorio es limitada, pues debido a su resolución califican como de alta y media susceptibilidad el 80% de la superficie urbana de la ciudad.

En este contexto se planteó el proyecto de tesis doctoral "Movimientos del terreno en el municipio de Tegucigalpa, Honduras: caracterización, estimación

de la peligrosidad y cuantificación de las pérdidas asociadas mediante modelos probabilísticos", del que forma parte este trabajo.

El área de estudio comprende 260 km² del área urbana del municipio (Fig. 2).

En términos geológicos el área de estudio se caracteriza por la presencia de



Fig. 1.- Deslizamiento en el coluvión de basaltos y andesitas en la residencial ciudad del Angel en Tegucigalpa (foto agosto de 2016). Foto: G. Suárez.

Fig. 1.- Landslide in the basalt and andesites colluvium, in the colony city of Angel, in Tegucigalpa (photo August 2016). Photo: G. Suárez.

ABSTRACT

This study is focused on an area of 260 km² in the municipality of Tegucigalpa, the capital of Honduras, which is the municipality with the highest number of historical landslides nationwide (39% of the records). The objective of this publication is to validate the applicability of the infinite slope model to identify the most susceptible areas to landslides within the soils present in the study area. For this validation, modeling with the PISA-m program was carried out on 5 active landslides, which available geotechnical properties data, and a sensitivity analysis of the infinite slope formula was performed. It is concluded that the infinity slope model presents an acceptable accuracy to identify the landslides areas of the that present the greatest slopes, but requires expert judgment adjustments to include the sections of the landslides located in terrains with slopes less than 10°.

Key-words: Landslide, PISA-m, Infinite slope, Colluviums, Tegucigalpa.

Fecha de recepción: 01/07/2020
Fecha de revisión: 23/10/2020
Fecha de aceptación: 27/11/2020

(Fig. 3): (i) basamento sedimentario constituido por areniscas, lutitas y conglomerados rojos del Grupo Valle de Ángeles de edad Cretácica, con las formaciones Río Chiquito y Villa Nueva (Viland *et al.*, 1996); (ii) unidades volcánicas del Grupo Padre Miguel de edad Mioceno Medio compuesto principalmente por depósitos de tobas e ignimbritas (Garza *et al.*, 2012); (iii) vulcanismo basáltico, andesítico y riolítico, posiblemente de edad Holoceno (Carr *et al.*, 2003) y (iv) recubrimientos cuaternarios, que incluyen coluviones, depósitos aluviales y depósitos de movimientos en masa.

Como parte de la investigación se identificó la presencia de deslizamientos rotacionales y traslacionales afectando a suelos residuales y recubrimientos asociados a coluviones. Estos suelos cubren 39 km², un 15% del área de estudio (Fig. 3). Se identificaron 3 tipos, derivados de las principales litologías presentes: (i) el coluvión procedente de los basaltos,



Fig. 2.- Localización de la zona de estudio.
 Fig. 2.- Location of the study area.

andesitas y riolitas (ii) el coluvión originado a partir del Grupo Padre Miguel y (iii) el suelo residual derivado del Grupo Valle de Ángeles. En conjunto, los coluviones y el suelo residual presentan pendientes de moderadas a bajas, con un 37% de su área por debajo de 10° de pendiente y un 82% por debajo de 20°.

El modelo del talud infinito es ampliamente utilizado para realizar análisis regionales de susceptibilidad espacial (Dietrich and Montgomery; 1998; Harp et al., 2002; Van Westen et al., 2006), dada su simplicidad, lo que permite aplicarlo en áreas extensas incluso con datos limitados.

El objetivo de este trabajo es analizar la validez del modelo del talud infinito para identificar las zonas susceptibles a deslizamientos dentro de los coluviones y suelos residuales presentes en la zona de estudio.

Metodología

A partir de las observaciones de campo se plantea que el modelo del talud infinito puede ser aplicable para modelar los deslizamientos traslacionales y rotacionales existentes en el área de estudio, dado que cumplen con las simplificaciones que adopta el modelo (Hammond, 1992): (i) el plano de rotura es paralelo a la superficie del terreno, (ii) existe una barrera de drenaje paralela a la superficie del terreno que es menos permeable que el suelo superficial, (iii) hay un gran contraste de conductividad hidráulica entre el suelo y la barrera de drenaje y (iv) existe una sola capa de suelo.

Para que esta hipótesis se pueda validar se requiere reducir las fuentes de incertidumbre asociadas a la aplicación del modelo. En este sentido existen dos tipos de fuentes de incertidumbre, las asociadas a la carencia de datos de los parámetros de resistencia al corte y pro-

fundidad de los suelos (Guimarães et al., 2003; Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014) y la incertidumbre epistémica asociada a las propias limitantes del modelo para explicar los deslizamientos traslacionales y rotacionales. Los pasos realizados para la validación se describen a continuación.

Selección de los deslizamientos y zonas piloto

Se seleccionó al menos un deslizamiento con información geotécnica y de profundidad de suelos para cada uno de los tres tipos principales de coluvión/suelo identificados. En total se seleccionaron 5 deslizamientos en 3 zonas piloto: 1 deslizamiento en las colonias José Arturo Duarte/La Ulloa, situadas sobre el coluvión de basaltos y andesitas, 2 deslizamientos en la colonia Nueva Santa Rosa, sobre el coluvión del grupo Padre Miguel y 2 deslizamientos en el cerro el Berrinche, en suelos residuales derivados del grupo Valle de Ángeles.

Un aspecto importante para la selección de los deslizamientos es que presenten actividad reciente. La mayor parte de la información de campo de este estudio se recopiló en junio del 2016, por lo que se consideró actividad reciente la de los años 2010-2015. Si los deslizamientos no están activos y han alcanzado un estado

de equilibrio, el Factor de Seguridad (FS) de la modelización debería ser mayor de 1 y perdería sentido la validación de la aplicabilidad del modelo del talud infinito para estos deslizamientos.

Definición de los parámetros para las modelizaciones

Para la modelización, se utilizó un modelo digital de elevaciones de tamaño de píxel de 10 x 10 m y los parámetros geotécnicos de profundidad, peso específico, ángulo de rozamiento y cohesión, introducidos como un valor único para cada tipo de suelo. Estos datos geotécnicos proceden de los estudios realizados por la alcaldía de Tegucigalpa. Se obtuvieron datos de: (i) 8 ensayos con valores de parámetros de resistencia al corte para el coluvión del Grupo Padre Miguel; (ii) 5 ensayos para el coluvión de basaltos y andesitas y (iii) 3 ensayos para el suelo residual del Grupo Valle de Ángeles. Para la modelación se utilizaron los valores promedio (ver Tabla I).

Adicionalmente a los valores obtenidos de los ensayos, para cada caso de estudio se realizaron modelizaciones con los parámetros por defecto que recomiendan Dietrich and Montgomery (1998) para coluviones: cohesión de 2000 N/m² y ángulo de rozamiento de 35°. Se consideraron estos parámetros por defecto

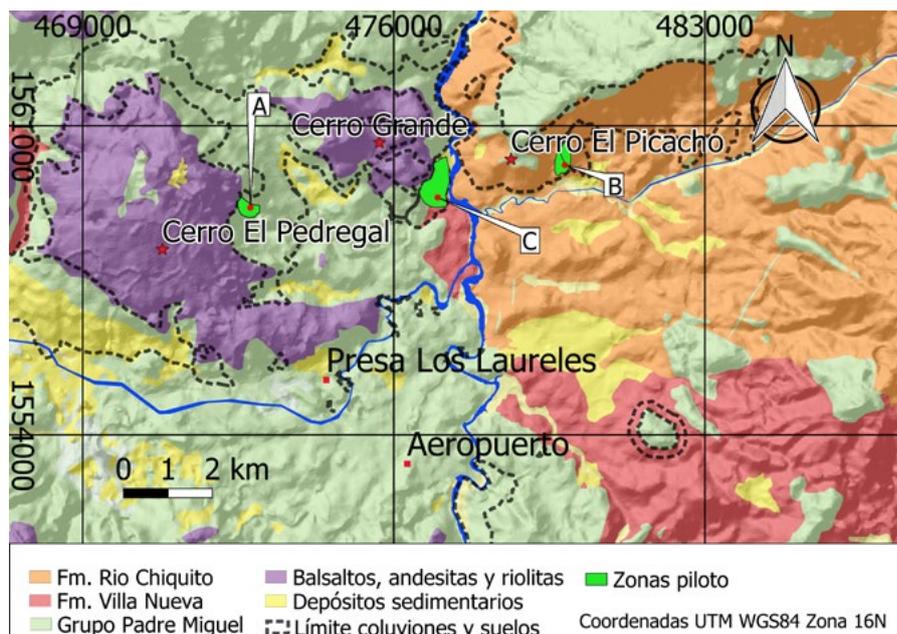


Fig. 3.- Mapa litológico del área de estudio elaborado a partir de la síntesis en BID, 2016. A: estudio piloto colonias Ulloa/José Arturo Duarte, B: estudio piloto colonia Nueva Santa Rosa y C: estudio piloto Cerro el Berrinche.

Fig. 3.- Lithology map of the study area, elaborated based on the synthesis from BID, 2016. A: pilot study Ulloa/José Arturo Duarte neighborhoods, B: pilot study Nueva Santa Rosa neighborhood and C: pilot study Cerro el Berrinche.

ya que corresponden a las propiedades que diversos autores atribuyen de forma genérica a los coluviones, considerando que son materiales que ya han experimentado procesos de remoción en masa y cuyo comportamiento está dominado por el ángulo de rozamiento y con baja cohesión (Ayala Carcedo y Posse, 1991; Dietrich and Montgomery, 1998). Esto contrasta con los valores promedio obtenidos de los ensayos, que arrojaron ángulos de rozamiento relativamente bajos y cohesiones altas (Tabla I).

Realización de las modelizaciones

Se realizaron modelizaciones con el programa PISA-m versión 1.0, que aplica el modelo del talud infinito y estima la probabilidad (de 0 a 1) de obtener un FS menor de 1 en cada píxel. Los parámetros del modelo se pueden introducir de forma probabilista o determinista, en este caso se hizo de forma determinista, aplicando valores fijos. Se asumió el escenario de saturación más desfavorable, es decir, que el valor Hw de la fórmula de talud infinito sea igual a 1. Los valores de probabilidad obtenidos fueron divididos en rangos en base a los rangos de probabilidad definidos por Hammond (1992).

Evaluación de los resultados de las modelizaciones

La calidad de las modelizaciones se evaluó comparando el resultado de las mismas con los deslizamientos existentes en las zonas piloto, mediante un índice de ajuste (IA). Este índice de ajuste es similar al empleado por Guimarães et

al., 2003 para comparar los resultados de distintas modelizaciones con el modelo del talud infinito (aplicando la extensión de Arc View shalstab). El índice IA se definió como:

$$IA (\%) = ADI/AD$$

Siendo ADI el área (m2) de los deslizamientos en la zona de análisis que se superponen con áreas clasificadas como de alta y muy alta probabilidad de deslizamientos y AD el área total de deslizamientos en la zona de análisis. Cuanto mayor es el valor de IA, mejor es el ajuste de la modelización para explicar los deslizamientos inventariados.

Análisis de sensibilidad

A partir de las conclusiones de los estudios de los casos piloto se realizó un análisis de sensibilidad de la fórmula del talud infinito a la variación de la pendiente (Saltelli et al., 2008). Se realizaron series de modelizaciones para valores fijos de pendiente en rangos de 5 grados, para todos los valores de propiedades mecánicas considerados en el estudio y asumiendo un valor fijo de Hw de 1. Cada serie incluyó 1000 cálculos de la fórmula, estimándose como resultado el porcentaje de valores de FS menores de 1.

Resultados y discusión

El valor más alto de IA se obtuvo para la modelización del deslizamiento en las colonias José Arturo Duarte/ La Ulloa y los parámetros promedio obtenidos de los estudios de suelos, con un valor del 76%. La modelización para la zona de estudio del Cerro el Berrinche con parámetros promedio, obtuvo un valor del 60%. De igual forma, el valor más alto para la zona piloto de la colonia Nueva Santa Rosa se obtuvo con la modelización con los parámetros promedio de los ensayos de suelos (Fig. 4).

Se aprecia (Fig.4) que los valores de IA obtenidos para las modelaciones donde se emplearon los parámetros promedio de los ensayos de suelos son sustantivamente mayores a los valores que arrojaron las modelaciones realizadas con las propiedades por defecto para coluviones, caracterizadas por ángulos de rozamiento mayores y cohesiones menores. Por otro lado, el coluvión de basaltos y

andesitas, caracterizado por los menores ángulos de rozamiento y mayores cohesiones (Tabla I), es el que presenta mayores valores de IA.

En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos para las 3 zonas piloto, con los parámetros promedio de los estudios geotécnicos. En los casos de José Arturo Duarte/Ulloa y Cerro el Berrinche se puede apreciar, observando las distancias entre las curvas de nivel, que los valores menores de probabilidad de deslizamiento corresponden a las zonas con menores pendientes. En el caso de la colonia Santa Rosa esta relación no es tan evidente, lo que puede deberse a que la pendiente promedio es menor a la de las otras dos zonas. Como se puede apreciar en la tabla II las áreas de los deslizamientos clasificadas como estables se concentran en pendientes inferiores a 10°.

El resultado de la sensibilización de la fórmula del talud infinito evidenció que, para una pendiente de 10° el porcentaje de las modelizaciones que arrojan valores de FS inferiores a 1 (considerando el promedio de todos los parámetros geotécnicos) es del 20%. Este valor aumenta a 59% (prácticamente se triplica) con una pendiente de 20° y 81% con una pendiente de 30°. Estos valores evidencian la alta correlación entre pendiente y resultado de FS que caracteriza el modelo del talud infinito y es la causa de que el modelo subestime las áreas de deslizamiento con baja pendiente.

Dado que el modelo del talud infinito estima el FS en un píxel de forma independiente a los píxeles próximos, al existir una correlación entre la pendiente y el valor de FS, el modelo tiende a clasificar como inestables los escarpes y pies de los deslizamientos (Fig. 5), que se sitúan en zonas con mayores pendientes y como estables las zonas con pendientes menores, a pesar de que pueden formar parte de un mismo deslizamiento.

Esta subestimación del área de deslizamiento es relevante porque es precisamente en las zonas de menores pendientes donde se sitúa la mayor concentración de la población, lo que puede contribuir a una subestimación de la población expuesta y el riesgo de deslizamientos. Por ello, se sugiere que las modelizaciones de estabilidad de laderas mediante diferentes softwares y modelos matemáticos se complementen con estudios geomorfológicos que ayuden a tomar decisiones basadas en criterio experto.

Tipos de suelo	Peso específico húmedo (kN/m ³)	C (N/m ²)	Θ (°)
1	19	47317	11,25
2	16	28562	23,88
3	18	23536	13,33

Tabla I.- Principales parámetros utilizados en la modelización. C: cohesión. Θ: ángulo de rozamiento interno. Suelos 1: coluvión basalto andesita, 2: coluvión Padre Miguel y 3: suelo residual Grupo Valle de Ángeles.
 Table I.- Main parameters applied in the modelling. C: cohesion. Θ: internal friction angle. Soil 1: basalts and andesites colluvium, 2: Padre Miguel colluvium and 3: residual soil Valle de Angeles Group.

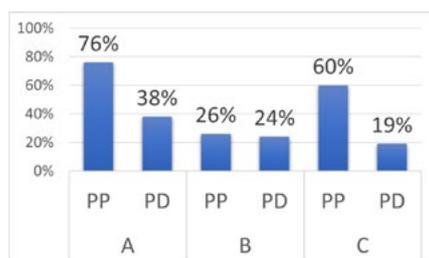


Fig. 4.- Resultados de IA para las 3 zonas piloto. PP: parámetros promedio de estudios de suelos, PD: parámetros por defecto para coluviones. A: colonias Ulloa/José Arturo Duarte, B: colonia Nueva Santa Rosa y C: cerro el Berrinche.

Fig. 6.- AI results for the 3 pilot zones. PP: average parameters from geotechnical studies, PD: standard parameters for colluviums. A: pilot study Ulloa/José Arturo Duarte neighborhoods, B: pilot study Nueva Santa Rosa neighborhood and C: pilot study Cerro el Berrinche.

Conclusiones

En los casos piloto analizados en la ciudad de Tegucigalpa se constata que el modelo del talud infinito tiende a clasificar como estables las zonas con pendientes inferiores a 10°. Dado que, en esta zona, los deslizamientos se localizan en coluviones y suelos residuales que se caracterizan por pendientes moderadas y que incluyen áreas de pendientes menores de 10°, el modelo tiende a subestimar las zonas de deslizamiento. Esto puede contribuir a minusvalorar el riesgo asociado, pues es precisamente en estas zonas con pendientes bajas, donde se concentra la población. Como alternativa para reducir esta subestimación se plantea complementar la modelización con un análisis basado en criterio exper-

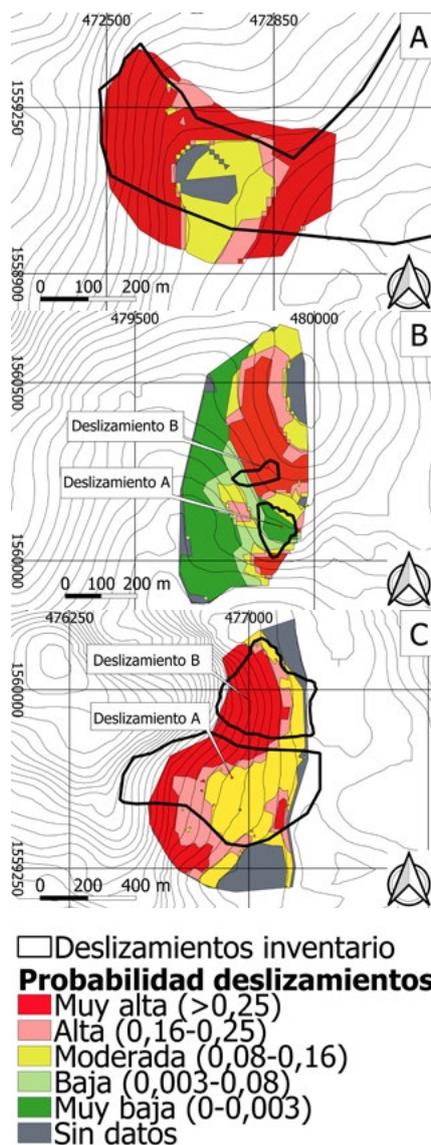


Fig. 5.- Mapas de las 3 zonas piloto con la probabilidad de movimientos de ladera. A: colonias Ulloa/José Arturo Duarte, B: colonia Santa Rosa, C: cerro el Berrinche.

Fig. 5.- Maps of the three pilot areas showing landslide probability. A: Ulloa/José Arturo Duarte neighborhoods,

to, para incorporar las áreas con menores pendientes en las zonas identificadas como de potencial deslizamiento por el modelo.

En lo que respecta a la relación de la estabilidad con las propiedades geotécnicas de los recubrimientos, son los suelos con ángulos de rozamiento menores y comportamiento cohesivo (con mayores valores de cohesión) los que presentan mayor probabilidad de deslizamientos.

En general, se constata la existencia de limitantes del modelo del talud infinito para identificar las áreas de movimientos de ladera en terrenos de bajas pendientes, limitantes que son intrínsecas al propio modelo.

Agradecimientos

Agradecemos a la Municipalidad de Tegucigalpa por brindar información para la realización de este estudio y a los revisores Carlos López Fernández y Óscar Elvir Ferman por sus valiosos aportes.

Referencias

Ayala Carcedo, F.J. y Posse, A. (1991). *Manual de ingeniería de taludes*. Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE), Madrid, 436 p.

Carr, J., Feigenson, M., Patino, L. y Walker, J. (2003). *American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 138.

Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J. y Smith, J.T. (2014). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263.

Dietrich, W.E. y Montgomery, D. R. (1998). In: *National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement Technical Report*, February 1998.

Garza, R.S.M., Van Hinsbergen, D.J. J., Rogers, R.D., Ganerød, M. y Dekkers, M.J. (2012). *Tectonophysics*, 574–575, 144–157.

Guimarães, R.F., Ramos, V.M., Redivo, A.L., Gomes, R.A.T., Fernandes, N.F. y Abílio de Carvalho, O. (2003). *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 4(June 2015), 2444–2446.

Hammond, C. (1992). *Level 1 stability analysis (LISA) documentation for version 2.0*.

Harp, B.E.L., Held, M.D., Castañeda, M.R., Mckenna, J.P. y Jibson, R. W. (2002). *Landslide Hazard Map of Tegucigalpa, Honduras*.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. y Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. In: *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley and Sons Ltd, Wichester, 300 p

Van Westen, C.J., Van Asch, T.W.J. y Soeters, R. (2006). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167–184.

Viland, J.C., Henry, B., Calix, R. y Diaz, C. (1996). *Journal of South American Earth Sciences*, 9(3–4), 153–160.

Zona piloto	Rangos de pendiente (°)		
	5-10	10-20	20-30
A	99%	1%	
B	73%	27%	
C	100%		

Tabla II.- Distribución del área de los deslizamientos clasificada como estable por el PISA-m por rango de pendiente. A: zona piloto colonias José Arturo Duarte/Ulloa, B: colonia Santa Rosa, C: cerro el Berrinche.
Table II.- Distribution of landslide area classified as stable by PISA-m by slope range. A: pilot study José Arturo Duarte/ Ulloa neighborhoods, B: Nueva Santa Rosa neighborhood and C: cerro el Berrinche.