

SUSCEPTIBILIDAD GEOMORFOLÓGICA A MOVIMIENTOS DE MASA EN EL CENTRO – NORTE DEL DISTRITO CENTRAL, HONDURAS

Javier García Reynaud^{1,*}; Heydi Martínez Sosa^{2,†}

¹Universidad Pedagógica Nacional “Francisco Morazán”. Facultad de Ciencia y Tecnología

²Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Facultad de Ciencias. Escuela de Física.

Recibido: 15/mayo/2020

Aceptado: 03/septiembre/2020

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v13i1.11254>

RESUMEN

Se seleccionaron 5 variables geomorfológicas (pendientes, litología, vertientes, escarpes y fallas) por su potencial condicionante de movimientos de masa en un sector del centro – norte del Distrito Central, Honduras, con una densidad de deslizamientos 4 veces superior al promedio municipal, para generar un análisis de susceptibilidad basado en la aplicación de herramientas SIG, estereoscopía de fotografías aéreas, levantamientos de litología y fallas, datos de sensores remotos y visitas de campo. Se realizó un Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para determinar pesos para cada variable, encontrándose la priorización siguiente: (1) pendientes, con peso AHP de 42.9%; (2) litología, con peso AHP de 27.0%; (3) vertientes, con peso AHP de 13.5%; (4) escarpes con peso AHP de 6.5% y (5) fallas con peso AHP de 3.7%, para las que se obtuvo un radio de consistencia de 1.9% ($1.9\% < 10\%$). Se construyó un mapa de susceptibilidad basado en los pesos establecidos para las variables. Se encontró la siguiente distribución de superficie por valor de susceptibilidad: (1) Superficie en alta susceptibilidad, 30.32%; (2) superficie en media susceptibilidad, 39.84% y (3) superficie en baja susceptibilidad, 29.84%. Se observó la distribución de los movimientos de masa documentados para la región estudiada, encontrándose un 52.63% del total de deslizamientos en superficies de susceptibilidad alta; 43.86% en superficies de susceptibilidad media y 3.51% en superficies de susceptibilidad baja. Se calcularon coeficientes de Spearman que determinaron una fuerte correlación ($\rho = .99$, $S = .50362$, $p = .0003091$) entre nivel de susceptibilidad generado por el modelo y cantidad de deslizamientos en el área estudiada.

Palabras clave: AHP, álgebra de mapas, deslizamientos, flujos de detritos, caída de rocas

ABSTRACT

Five geomorphological variables (slopes, lithology, river basins, escarpments and faults) were selected for their conditioning potential for mass movements in a sector of the center-north of the Central District,

*javiere@upnfm.edu.hn,  <https://orcid.org/0000-0002-2053-7943>

†heydi.martinez@unah.edu.hn,  <https://orcid.org/0000-0003-0001-5547>

Honduras, with a landslide density 4 times higher than the municipal average, to generate a susceptibility analysis based on the application of GIS tools, stereoscopy of aerial photographs, lithology and fault surveys, data from remote sensors and field trips. An Analytical Hierarchy Process (AHP) was carried out to determine weights for each variable finding the following prioritization: (1) slopes, with an AHP weight of 42.9%; (2) lithology, with an AHP weight of 27.0%; (3) river basins, with an AHP weight of 13.5%; (4) scarps with an AHP weight of 6.5% and (5) faults with an AHP weight of 3.7%, for which a radius of consistency of 1.9% ($1.9\% < 10\%$) was obtained. A susceptibility map based on the established weights for the variables was constructed. The following distribution of surface by susceptibility value was found: (1) Surface in high susceptibility, 30.32%; (2) surface in medium susceptibility, 39.84% and (3) surface in low susceptibility, 29.84%. The distribution of documented mass movements for the studied region was observed, finding 52.63% of the total landslides on high susceptibility surfaces; 43.86% on medium susceptibility surfaces and 3.51% on low susceptibility surfaces. Spearman coefficients were calculated that determined a strong correlation ($\rho = .98$, $S = .50362$, $p = .0003091$) between the susceptibility level calculated by the model and amount of landslides in the study area.

Keywords: AHP, map algebra, landslides, debris flows, rock falls

1 *Introducción*

En las últimas décadas se ha señalado una variedad de condicionantes de riesgo en el Distrito Central, Honduras, con una finalidad de diagnóstico e intervención. El [Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo \(2013\)](#), resalta factores históricos, políticos, técnicos, económicos y sociales tales como el origen minero de la capital hondureña y la consecuente carencia de condiciones estructurales favorables para el desarrollo urbano; vacíos regulatorios de planificación para la gestión del riesgo; falta de personal técnico y acceso a información; ocupación de espacios susceptibles, entre otros, que promueven inevitablemente una situación de vulnerabilidad elevada.

La Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) y la Alcaldía Municipal del Distrito Central (AMDC) (2014), consecuentemente, han detectado 1,529 áreas de deslizamiento en las ciudades de Tegucigalpa y Comayagüela, identificadas a través del análisis de 455 fotografías aéreas.

Aspectos necesarios en la discusión de la gestión de riesgo, son incorporados por [Gares *et al.* \(1994\)](#), al definir los riesgos geomorfológicos como la variedad de amenazas a los sistemas humanos que surgen como consecuencia de la forma del relieve en respuesta a procesos superficiales. [Alcántara \(2002\)](#), señala las magnitudes catastróficas en términos de pérdidas humanas y daños a la propiedad de desastres influenciados por la posición geográfica y el escenario geológico y geomorfológico de los países, resaltando que el 84 % de 2,808 desastres registrados a nivel mundial en un período de 9 años estuvieron relacionados con la geomorfología.

Incorporar en el análisis de riesgo el origen y el dinamismo de los procesos físicos, debe indiscutiblemente venir a complementar el enfoque social que tradicionalmente ha tenido un fuerte énfasis en el diseño de estrategias encaminadas a conocer y reducir la vulnerabilidad a desastres.

Este estudio analiza de manera preliminar el potencial condicionante que 5 variables geomorfológicas (pendientes, litología, vertientes, escarpes y fallas) ejercen sobre la ocurrencia de movimientos de masa, y describe el procedimiento para la generación de un mapa de susceptibilidad basado en los atributos específicos de tales variables.

1.1 Variables para construcción del mapa de susceptibilidad y descripción del escenario

1.1.1 Pendientes

Los flujos de detritos, avalanchas y deslizamientos presentan como condicionantes comunes las pendientes pronunciadas (Swanston, 1974; Centers for Disease Control and Prevention, 2003) teniendo en cuenta su efecto sobre la relación resistencia cortante – tensión cortante.

La tensión cortante (t), es el componente tangencial de la tensión gravitacional a lo largo de una zona basal de deslizamiento y puede expresarse a través de la siguiente ecuación:

$$t = W \sin(a) \quad (1.1)$$

Donde W es el peso efectivo del suelo, y a es la pendiente de la superficie de la falla.

Los incrementos en el componente tangencial de la tensión gravitacional incrementará la tendencia del suelo a desplazarse pendiente abajo. Incrementos en la pendiente de la superficie de la falla (o incrementos en el peso efectivo de la masa de suelo) resultarán en incrementos de la tensión cortante.

En el Distrito Central, el efecto de los ángulos de pendiente ha sido documentado recurrentemente (Harp *et al.*, 2002a; Harp *et al.*, 2002b; Flores *et al.*, 2009; García y Axelsson, 2014), resaltando cómo la energía potencial provista por estos a las fuerzas gravitacionales instiga los movimientos de rocas, suelos o detritos hasta alcanzar valores más estables, llegándose incluso a considerar como factor más importante en cualquier análisis de deslizamientos (García y Yamagishi, 2017).

Con respecto al área estudiada, las pendientes presentan un rango de 0% - 33.9%. Los valores máximos son evidentes en los sectores aledaños a El Picacho, El Chile y Cerro Grande. La mayor superficie se concentra en pendientes de hasta 17%.

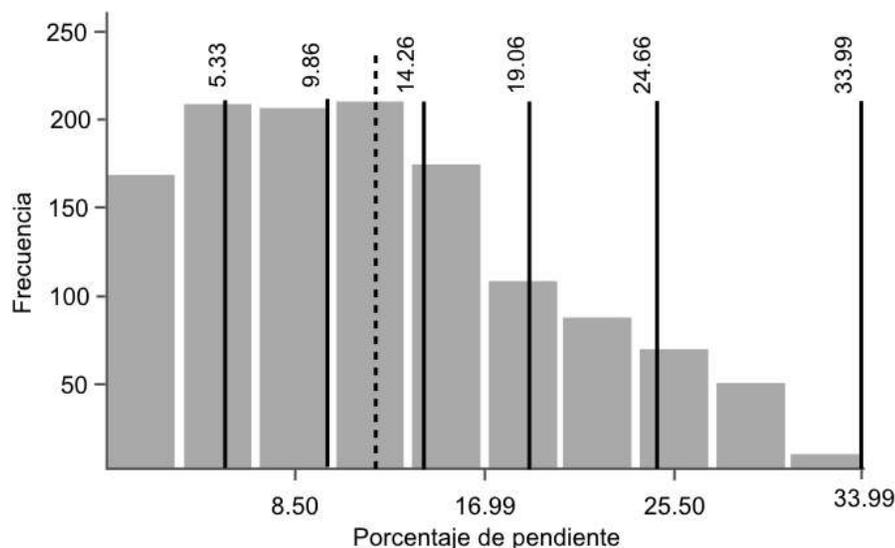


Figura 1: Distribución de pendientes en el área estudiada. Generada del cálculo de capa de pendientes a partir de datos SRTM para el centro norte del Distrito Central, Honduras.

1.1.2 Litología

Estudios que han incorporado la evaluación de condicionantes físicas al análisis de susceptibilidad en pendientes han asignando los mayores pesos a formaciones litológicas tales como depósitos de detritos y depósitos coluviales, y los menores pesos a terrazas antiguas estables, flujos basálticos, cuarcitas y otras rocas metamórficas resistentes (Mejía y García, 1996).

Las principales unidades estratigráficas del área estudiada corresponden a las formaciones Miembro Cerro Grande (Tcg) y Principales Secuencias de Ignimbritas (Tpm), ambas del grupo Padre Miguel, al este y oeste del Río Grande o Choluteca respectivamente. Estas unidades estratigráficas representan cerca del 80 % de la superficie bajo análisis, distribuido equitativamente entre ambas. Asimismo, aproximadamente el 10 % de la superficie estudiada, su región sur y sur-oeste, corresponden a la formación Río Chiquito (Krc), del Grupo Valle de Ángeles. Una tercera unidad, alrededor del 10 % de superficie restante, está constituida por Depósitos Recientes de Aluvión (Qal) (Rogers y O'Conner, 1990).

Además de la distribución y proporción de la litología, es relevante el contacto entre las formaciones del grupo Valle de Ángeles y Padre Miguel y el contacto entre dos formaciones del grupo Padre Miguel. El primero, con una orientación diagonal suroeste - noreste en el cuadrángulo de estudio, contrapone a las Principales Secuencias de Ignimbritas y a la formación Río Chiquito. El segundo, que se observa en el sector oeste del área estudiada, adyacente al río Grande o Choluteca, contrapone las Principales Secuencias de Ignimbritas y la formación Cerro Grande.

Las características litológicas de las unidades estratigráficas y sus zonas de contacto en la zona de estudio, presentadas de mayor a menor en función del grado de susceptibilidad a movimientos de masa que representan, se describen a continuación:

En la zona de contacto entre las Principales Secuencias de Ignimbritas y la formación Río Chiquito se presenta una elevada densidad de deslizamientos, y es descrito como una superficie de desgaste inestable y estratigráficamente disconforme, siendo una paleosuperficie de erosión previa a la deposición del grupo Padre Miguel en cuyas proximidades deben extremarse precauciones al planificar y construir urbanizaciones (Rogers y O'Conner, 1990).

Los Depósitos Recientes de Aluvión en el área estudiada son limitados y descansan a lo largo de los drenajes y ríos, lo cual es notorio en el río Grande o Choluteca y río Chiquito, que recorren el cuadrángulo de este estudio de susceptibilidad. La formación consiste en sedimentos de arena, grava y guijarros de fragmentos de lutita, arenisca, tobas y otros materiales volcánicos (Rogers y O'Conner, 1990). Se considera a la formación como condicionante de altos valores de susceptibilidad a movimientos de masa, teniendo en cuenta la reducida resistencia de corte de litologías con tales características (Mejía y García, 1996) y (Braun *et al.*, 2018)

La formación Río Chiquito, única del grupo Valle de Ángeles en el área estudiada, está caracterizada por lutitas, limonitas, areniscas rosadas y algunas capas de conglomerado de cuarzo. La unidad fue depositada por ríos y flujos de alta viscosidad en la parte más lejana de un abanico aluvial, resultando en una formación muy erosionable y con suelos proclives a desgaste. (Rogers y O'Conner, 1990).

Las principales secuencias de ignimbritas al este del río Grande o Choluteca están compuestas principalmente por tobas riolíticas, dacíticas y andesíticas de varios colores, con algunas rocas sedimentarias de clastos volcánicos con elevada resistencia de corte y tobas bien estratificadas (Rogers y O'Conner, 1990).

El Miembro Cerro Grande, está caracterizado por ignimbritas con cristales de cuarzo y sanidino en una matriz vitrificada de color violeta con fracturación intensa y vertical (O'Conner, 1986). En el cerro El Berrinche, el miembro presenta flujos individuales de ignimbritas negruzcas con cristales líticos y matriz obsidiánica. Sobre la formación se apunta adicionalmente que está actualmente muy endurecida, con un grosor mínimo de 200 metros y una edad de 14 millones de años obtenida a través de métodos radiométricos. (Emmet, 1983 citado por Rogers y O'Conner, 1990).

1.1.3 Vertientes

La erosión fluvial del pie o los márgenes laterales de un cuerpo de deslizamiento han sido destacadas como causas geomorfológicas de los movimientos de masa en el Distrito Central (Harp *et al.*, 2002a; Flores *et al.*, 2009 y García y Axelsson, 2014).

Los flujos de detritos, por otro lado, son una combinación de suelo suelto, rocas, materia orgánica, aire y agua que se moviliza rápidamente en forma de una combinación líquida que fluye pendiente abajo, y presentan como detonante común los flujos intensos de agua superficial que erosionan y movilizan el suelo suelto en pendientes pronunciadas (U.S. Geological Survey, 2004).

En el Distrito Central, la salida de los ríos Grande o Choluteca y río Chiquito de sus lechos históricos fue la causa de un socavamiento en las laderas que a su vez provocó los deslizamientos y avalanchas que destruyeron total o parcialmente colonias residenciales de la capital (Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas, 1999). Ambos ríos son los principales flujos superficiales de agua en el área estudiada. Se ha encontrado a través de la interpretación estereoscópica de fotografías aéreas, superficies con corrientes superficiales donde el 90 % de los movimientos de masa ocurren en los meandros debido a la erosión hídrica del pie de los cuerpos de deslizamiento (Thomson y Morgenstern, 1977).

Con respecto a la geomorfología fluvial en su recorrido dentro del área estudiada, los ríos Grande o Choluteca y Chiquito presentan índices de sinuosidad de 1.40 y 1.49 respectivamente, considerados de tipo meándrico (Mueller, 1968; Sánchez, 1986).

1.1.4 Escarpes

Las evaluaciones de susceptibilidad basadas en el análisis de condicionantes, toman como base las variables que han generado eventos en el pasado para proyectar nuevos. En el caso de los movimientos de masa, los análisis se enfocan en el área en que estos se originaron, conocida como zona de arranque, lo que vuelve a los bordes superiores de escarpes principales (MSUE) una referencia conveniente, al ser siempre visibles por la diferencia del ángulo de la pendiente con respecto a las zonas circundantes no afectadas, es decir, con el contacto de la corona del deslizamiento y a lo largo de los flancos de la zona de arranque.

Los MSUE, además de ser un indicador físico de movimientos de masa en el pasado, en Honduras han presentado movimientos regresivos pendiente arriba, provocando daño adicional y maximizando la cobertura de escenarios de riesgo (Harp *et al.*, 2002a; Harp *et al.*, 2002b).

El área estudiada muestra una densidad muy superior de movimientos de masa de diferentes antigüedades en su sector norte y oeste, con 82.14 % del total de MSUE condensados en esta región, que incluye procesos notables tales como El Berrinche y El Reparto. El 17.86 % restante de MSUE se encuentran en la región central, con movimientos tales como el de El Bambú, en las inmediaciones de un sector densamente poblado del Distrito Central.

1.1.5 Fallas

La proximidad a epicentros y alrededores de fallas ha sido señalada repetidamente como condicionante de movimientos de masa, particularmente en sectores con actividad sísmica reciente (Tibaldi *et al.*, 1995; Lang y Nakamura, 1997; Wang *et al.*, 2003).

Dentro del área estudiada se observan 4 segmentos de fallas predominantes: (1) falla exacta con orientación suroeste, noreste y longitud de 1,061 metros; (2) falla inferida en el sector norte y orientación oeste-este y longitud de 668 metros; (3) falla con segmentos inferidos y exactos, de orientación oeste – noreste y longitud de 2,487 metros y (4) falla inferida en el sector sur y orientación oeste-este y longitud de 2,030 metros (Rogers y O’Conner, 1990). Ninguna de las fallas en el cuadrángulo presenta reportes de actividad reciente.

1.2 Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) aplicado a la evaluación de susceptibilidad a movimientos de masa.

Las ponderaciones estimadas a través de AHP son particularmente convenientes en modelos basados en álgebra de mapas, para los cuales se requieren de pesos relativos que se traducirán en el grado en que cada variable aporta al nivel de susceptibilidad total representado visualmente.

El AHP aplicado a la evaluación de susceptibilidad a movimientos de masa puede encontrarse en una diversidad de estudios con evidencias poder predictivo superior al 80 %. (Mezughi *et al.*, 2012; Shahabi y Hashim, 2015).

2 Metodología

2.1 Criterios de selección del escenario

El área estudiada, de 11.71 Km², ubicada en el centro - norte del Distrito Central, desde la perspectiva de la gestión de riesgos, constituye un escenario relevante para el análisis de variables geomorfológicas al considerar que presenta los mayores valores de pendiente en la capital hondureña; 6 formaciones geológicas y 2 regiones de contacto entre litologías; 4 fallas geológicas y los ríos Choluteca y Chiquito, siendo ambos los principales detonantes de las inundaciones y deslizamientos durante el Huracán Mitch, en 1998 (Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas, 1999).

Con respecto a la ocurrencia de movimientos de masa, el área estudiada presenta una densidad de 4.87 deslizamientos/Km², considerablemente superior al promedio de 1.01 deslizamientos/Km² observados en el inventario realizado por JICA y AMDC (2014).

El área estudiada presenta movimientos de masa de carácter emblemático por la magnitud de las pérdidas humanas y económicas provocadas, tales como El Berrinche, El Reparto y El Bambú (Harp *et al.*, 2002b) (y procesos más recientes como los observados en los asentamientos Altos de Santa Rosa y Campo Cielo).

2.2 Tratamiento de capas de variables seleccionadas.

El tratamiento de las variables de información geomorfológica para la generación del mapa de susceptibilidad a movimientos de masa fue realizado con el software ArcMap 10.6, de la herramienta ArcGIS de ESRI.

2.3 Generación de capa de vertientes

Se utilizaron fotografías aéreas georeferenciadas (escala 1:1000) de 4 cuadrángulos que cubren el área total de estudio para trazar una capa de poli líneas sobre las principales vertientes y sus afluentes asociados.

Se generó una capa con bandas de proximidad a las poli líneas de vertientes (escala 1:10,000), consistentemente con [García y Yamagishi \(2017\)](#) bajo el criterio de distancia euclidiana en 6 rangos, definiendo códigos representativos para la susceptibilidad inherente a cada uno considerando las máximas proximidades como categorías de mayor susceptibilidad (Figura 2).

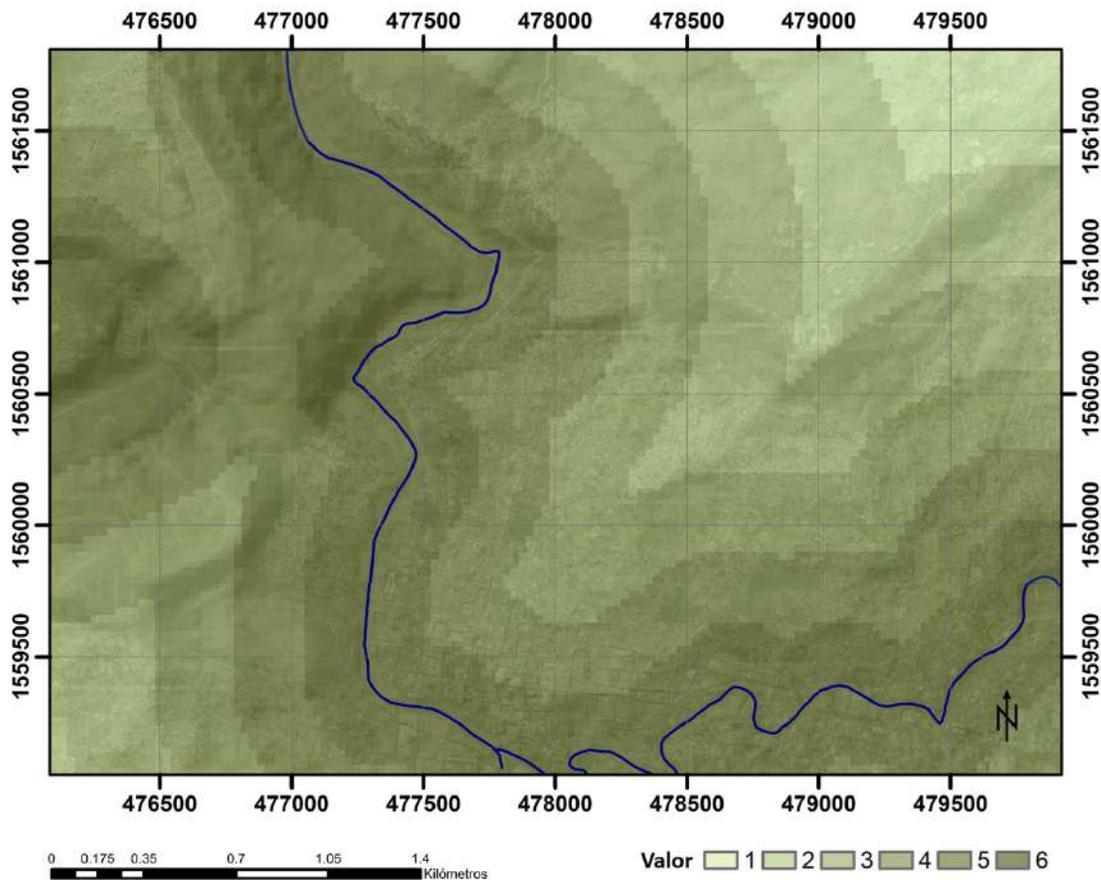


Figura 2: Vertientes con detalle de proximidad (1:10,000). Los valores de 1 a 6 corresponden a las distancias máximas hasta las mínimas, respectivamente, con respecto a río Grande o Choluteca (con orientación norte - sur), y a Río Chiquito (con orientación sur - este).

Se realizó un cálculo de sinuosidad para cada uno de los tramos de las vertientes en el área estudiada, esto es, el río Grande o Choluteca y el río Chiquito, utilizando la relación propuesta por [Leopold et al. \(1964\)](#):

$$P = \text{Long. Thalweg} / \text{Long. Valle} \quad (2.1)$$

Donde P es el índice de sinuosidad; Long. Thalweg es la longitud entre dos puntos en la parte más profunda de un cauce y Long. Valle es la longitud en línea recta entre ambos puntos.

De lo anterior, se encontró para el río Grande o Choluteca, valores para Long. Thalweg de 3,953 m y Long. Valle de 2,821 m, con un índice de sinuosidad resultante de 1.40. Para el río Chiquito, valores de Long. Thalweg de 2,986 m y Long. Valle de 2,007 m, resultaron en un índice de sinuosidad de 1.49. (Figura 3).

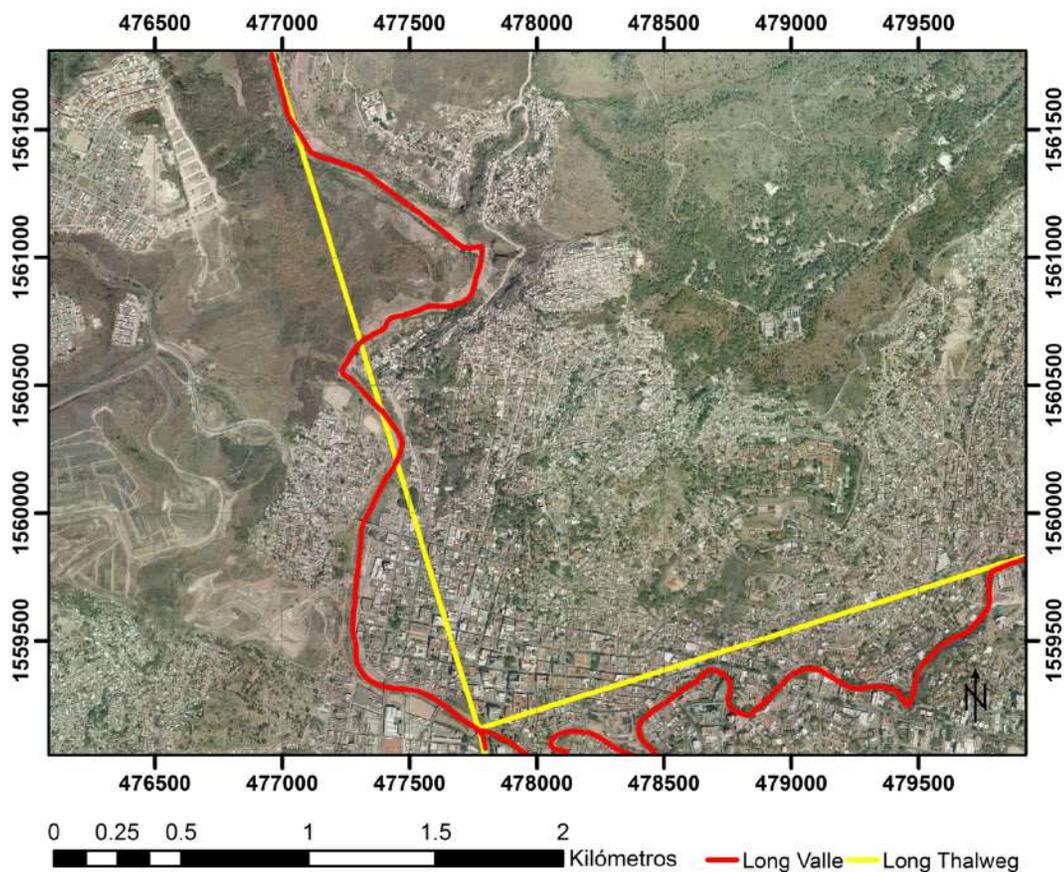


Figura 3: Longitudes para el cálculo de sinuosidad del río Chiquito (1:10,000).

Los valores obtenidos se consideran dentro de la categoría de río meándrico ($1.40 > 1.3$; $1.49 > 1.3$), según lo anotado por [Mueller \(1968\)](#) y [Sánchez \(1986\)](#), y fueron tomados en consideración para el proceso de comparación por pares de AHP, entre otros factores relacionados a la influencia histórica de vertientes en el desencadenamiento de movimientos de masa en el Distrito Central.

2.3.1 Generación de capa de escarpes

Se identificaron los principales movimientos de masa en el área estudiada a partir de la interpretación estereoscópica de fotografías aéreas (escala 1:1000) con un traslape de 40 % del área, con estereoscopios de espejo Sokkia MS27, consistentemente con los procedimientos de [Spencer \(2000\)](#).

A partir de las fotografías digitalizadas y georreferenciadas, se realizó un trazado de los bordes superiores de los escarpes principales (MSUE), apoyándose adicionalmente de Modelos de Elevación Digital (DEM) del área estudiada y de los hallazgos de la interpretación estereoscópica.

Se generó una capa de bandas de proximidad alrededor de los MSUE, consistentemente con [Süzen y Doyuran \(2004\)](#) (escala 1:10,000). Las bandas fueron generadas bajo el criterio de distancia euclidiana en 6 rangos de proximidad diferentes, (Figura 4) asignando códigos para categorías de menor a mayor susceptibilidad, esto es, las más distantes y las más cercanas a los MSUE, respectivamente.

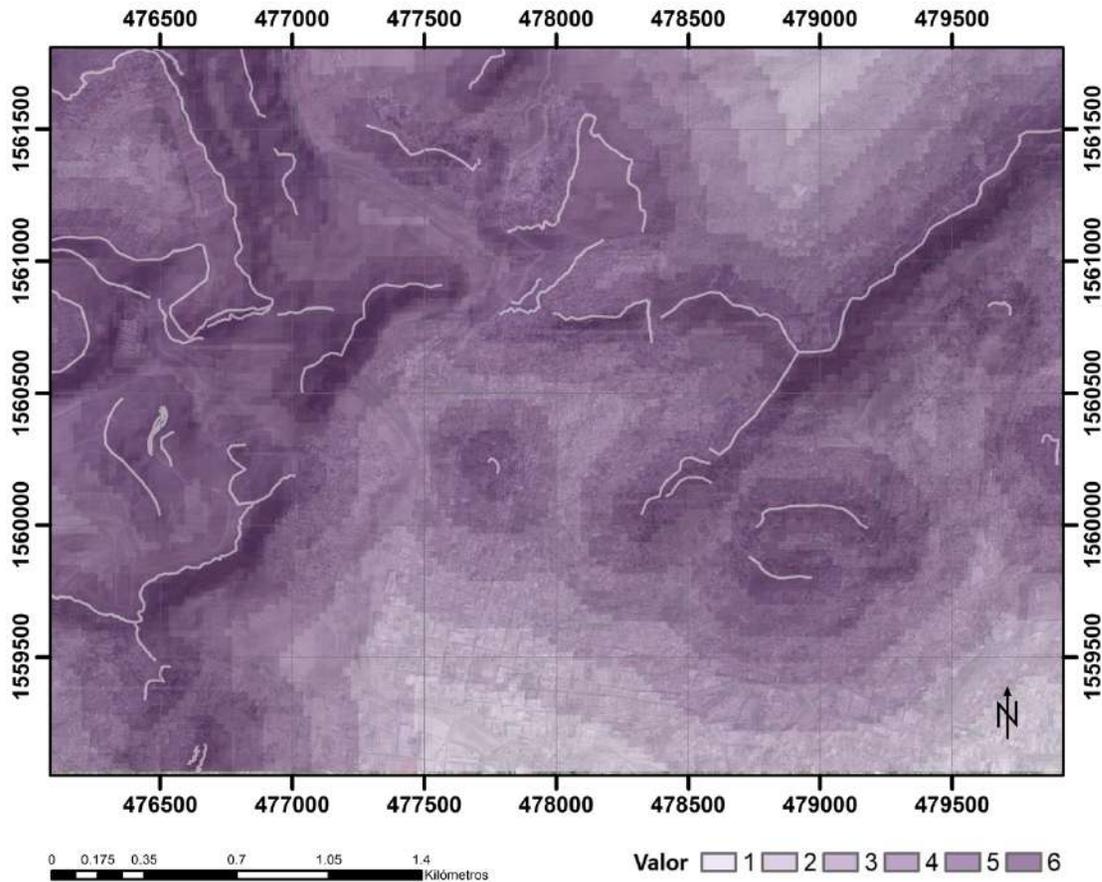


Figura 4: Proximidad a bordes superiores de escarpes principales (MSUE) (1:10,000). Los valores de 1 a 6 representan en orden descendente, las distancias con respecto a los MSUE.

2.3.2 Tratamiento de capa de fallas

Se utilizó la información disponible en el mapa geológico de Honduras por [Rogers y O’Conner \(1990\)](#), hoja Tegucigalpa (2758II G, escala 1:50,000) para visualizar las fallas geológicas distribuidas en el área estudiada.

Una versión digitalizada por el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT-UNAH) para la capa de fallas fue utilizada para generar una capa de bandas de proximidad (escala 1:50,000) bajo el criterio de distancia euclidiana, asignando códigos para 6 categorías de susceptibilidad en función de la distancia a cada poli línea de falla geológica. Los rangos con mayores proximidades a las fallas constituyeron las categorías de máxima susceptibilidad (Figura 5).

2.3.3 Generación de capa de pendientes

La capa de pendientes se generó a partir de datos de sensores remotos de la Misión Topográfica de Radar Shuttle (SRTM), desarrollado por la Agencia Nacional de Inteligencia-Geoespacial (National Geospatial-Intelligence Agency, NGA), la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (National Aeronautics and Space Administration, NASA) y el Centro Aeroespacial Alemán (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) ([Van Zyl, 2001](#)).

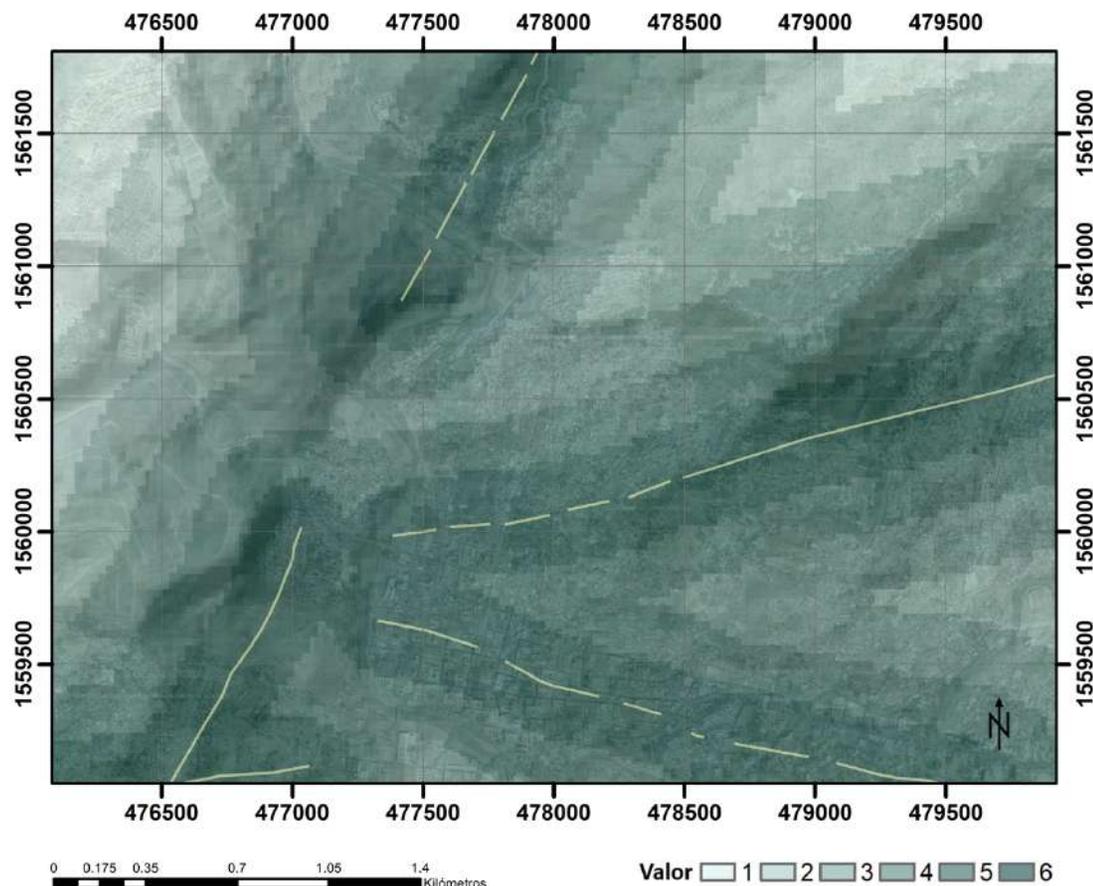


Figura 5: Fallas con detalle de proximidad (1:50,000). Los valores de 1 a 6 corresponden a las distancias máximas a fallas hasta las distancias mínimas, respectivamente.

Los DEM de SRTM cuentan con una resolución de 30 metros, y se presentan en coordenadas geográficas (latitud - longitud), por lo que se asignó a las capas raster de las 5 variables adicionales, tamaños de celda de 30 por un lado, y adicionalmente, se realizó una reproyección de la capa al sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM) mediante la función de proyección de rasters del subgrupo de aplicaciones de proyección y transformaciones en el paquete de herramientas de datos.

El DEM reproyectado sirvió como base para generar un mapa de pendientes (escala 1:120,000) con el paquete de análisis 3D. (Figura 6)

2.3.4 Tratamiento de capa de litología

Utilizando una capa de litología digitalizada por IHCIT-UNAH a partir de la información presentada en el mapa geológico de Rogers y O'Conner (escala 1:50,000), se definieron en función de los atributos asociados a propensión a movimientos de masa, 6 categorías de susceptibilidad. Los máximos valores se asignaron a formaciones litológicas con características de baja resistencia de corte y pobre permeabilidad, según el detalle siguiente: Valor 1= deslizamientos antiguos; valor 2= Miembro Cerro Grande; valor 3= Principales Secuencias de Ignimbritas; valor 4= Formación Río Chiquito; valor 5= Contacto entre Principales Secuencias de Ignimbritas y Miembro Cerro Grande; valor 6= Depósitos recientes de Aluvión y Contacto entre Principales Secuencias de Ignimbritas y formación Río Chiquito. (Figura 7)

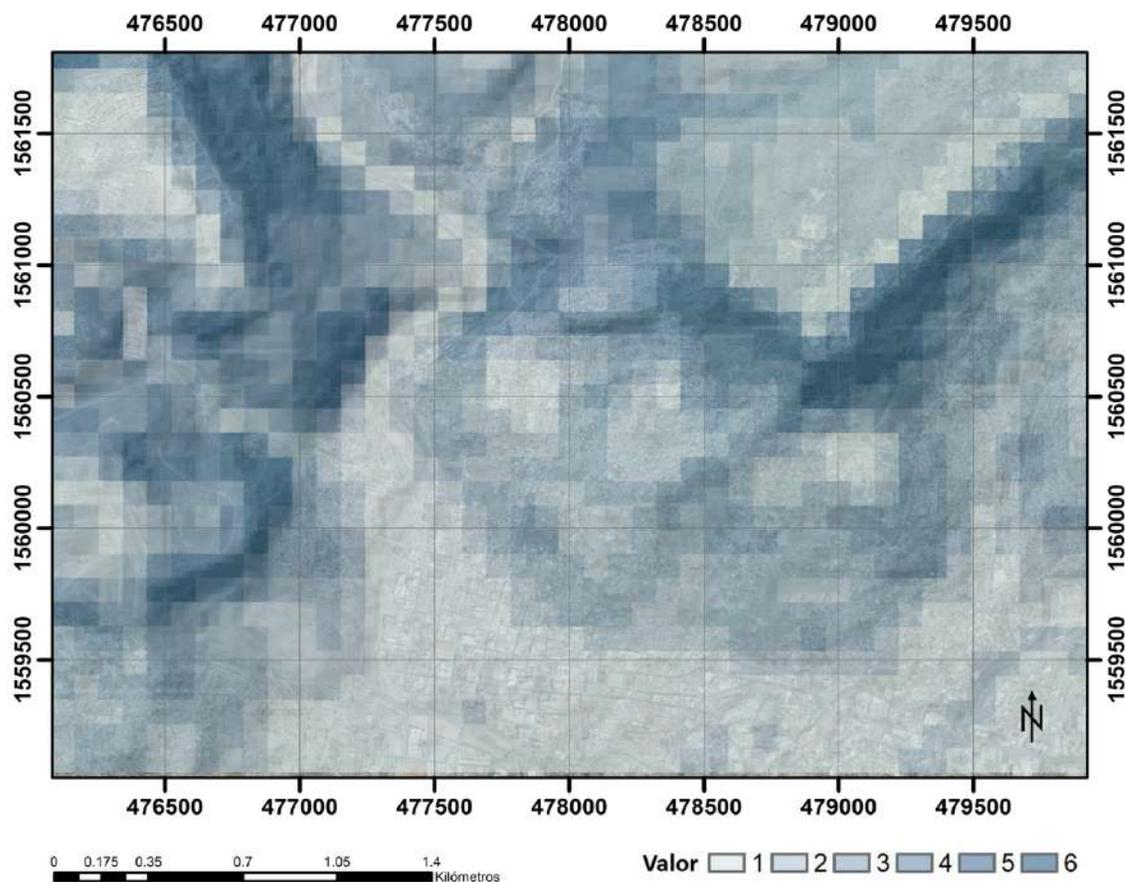


Figura 6: Pendientes (1:120,000). Los valores de 1 a 6 representan los niveles mínimos a máximos de susceptibilidad, respectivamente, definidos según su rango de pendiente.

Se realizaron dos visitas de campo para aportar argumentos adicionales a los presentados por el mapa geológico teniendo en consideración la extensión reducida del área estudiada. Como resultado, se confirmaron límites de formaciones litológicas, se tomaron muestras de rocas para la identificación de sus características y se verificaron los puntos contacto de las unidades.

2.4 Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) de variables.

Se desarrolló un Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), cuyas etapas se resumen en la Figura 8, y que inicia con la descomposición del problema de susceptibilidad a movimientos de masa, en sus principales variables.

(a, Figura 8) Cinco variables geomorfológicas: (1) pendientes, (2) litología, (3) vertientes, (4) escarpes y (5) fallas, fueron definidas en función de su naturaleza condicionante de movimientos de masa y de la disponibilidad de datos, y a su vez desagregadas según las características que dentro de su rango de variabilidad predisponen a mayores grados de susceptibilidad.

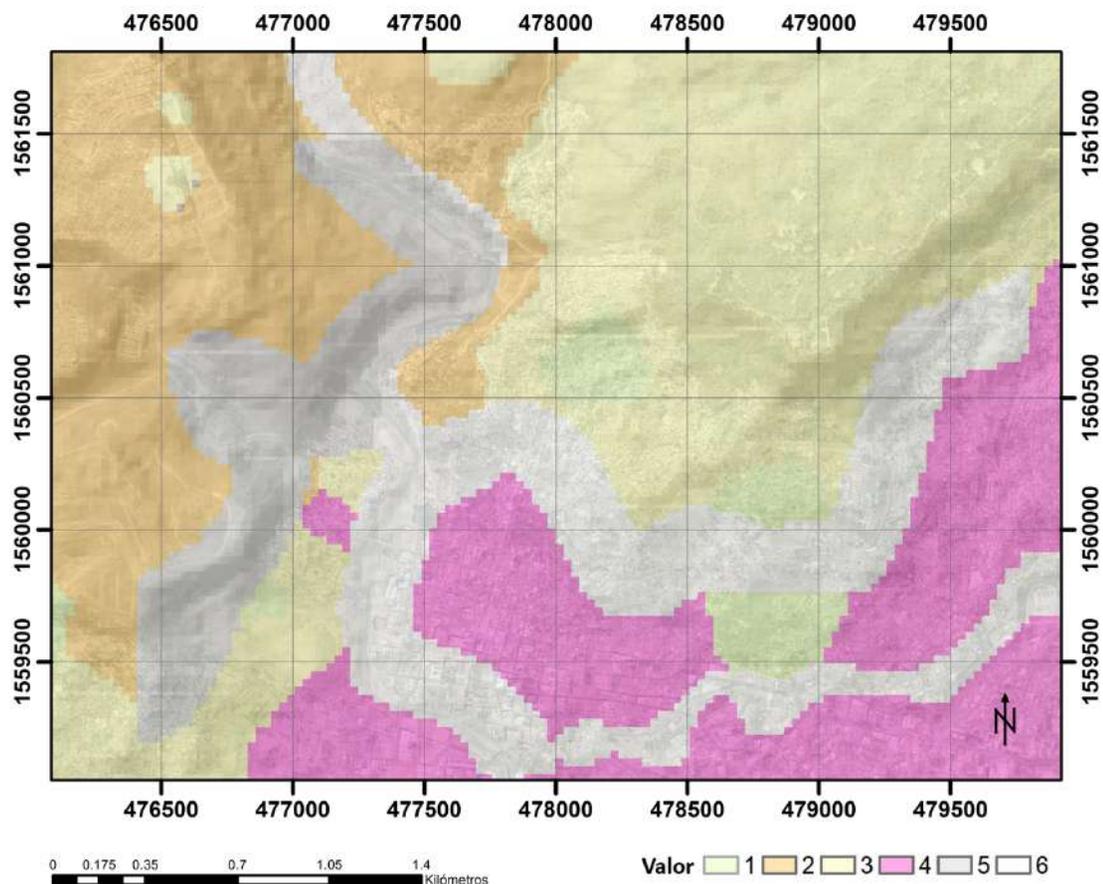


Figura 7: Litología (1:50,000). Los valores de 1 a 6, representan en orden ascendente el grado de susceptibilidad a movimientos de masa que las propiedades del material confieren.

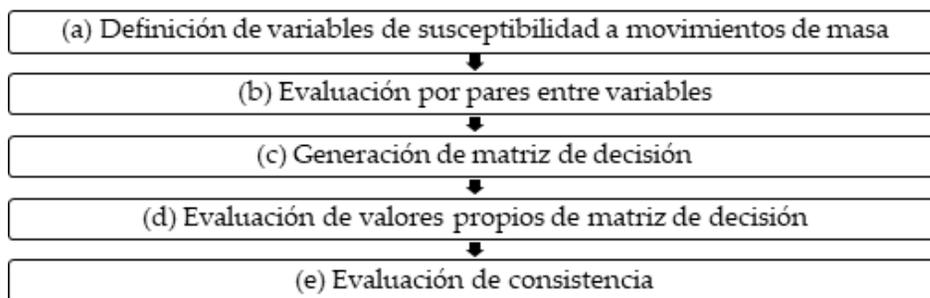


Figura 8: Etapas del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para evaluación de susceptibilidad a movimientos de masa. Adaptado de “Strategic decision making: applying the analytic hierarchy process”, por [Bhushan y Rai \(2007\)](#)

(b, Figura 8) Se realizó un proceso de evaluación por pares, a través de la aplicación de la Administración de Desempeño de Negocios de Singapur (BPMSG), AHP Priority Calculator (AHP - OS), que basa sus algoritmos en los fundamentos del Proceso de Jerarquía Analítica resumido por [Saaty \(1990\)](#). Partiendo de los argumentos técnicos discutidos para cada variable (apartados 1.1.1 – 1.1.5), se comparó cada una contra otra, para el total de variables seleccionadas. El grado en que una variable es superior a otra en el momento de la evaluación por pares se cuantifica a través de la escala fundamental de [Saaty \(2008\)](#). (Tabla 1)

Tabla 1: La escala fundamental de Saaty.*La escala fundamental. Tomado de “How to make a decision: the analytic hierarchy process”, por Saaty (1990).

Intensidad de la importancia en escala absoluta	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Ambas alternativas contribuyen de igual manera al problema
3	Importancia moderada de una sobre la otra	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una alternativa sobre la otra
5	Fuerte o esencial importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una alternativa sobre la otra
7	Importancia muy fuerte	Una de las alternativas es fuertemente favorecida y su dominancia se demuestra en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una alternativa sobre la otra es del mayor orden de afirmación posible
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	Para diferenciar entre alternativas con afinidad a más de una de las presentes explicaciones
Recíprocos	Si la alternativa X tiene asignado uno de los números de arriba al compararlo con la alternativa Y, entonces Y tiene el valor recíproco al compararlo contra X.	

(c, Figura 8.) Tras introducir los valores de intensidad de la escala absoluta de la Tabla 1 para cada comparación de pares en la etapa anterior, se generó en AHP – OS una matriz de decisión (Tabla 2) con los resultados de cada comparación (que muestra los valores de la comparación del lado derecho de la diagonal, según la escala de la Tabla 1, y sus recíprocos, a la izquierda de la diagonal) dando una idea de la importancia relativa de cada variable.

Tabla 2: Matriz de decisión AHP.

	Pendiente (1)	Litología (2)	Vertientes (3)	Escarpes (4)	Fallas (5)
(1)	1	2	5	7	9
(2)	0.5	1	2	5	7
(3)	0.2	0.5	1	2	5
(4)	0.14	0.2	0.5	1	2
(5)	0.11	0.14	0.2	0.5	1
W	0.4920	0.2700	0.1350	0.0650	0.0370

(d, Figura 8) Se obtuvo el peso AHP de cada variable en AHP - OS. Para ello, se generó una tabla de valores normalizados a partir de los valores de la matriz de decisión, dividiendo cada valor de la matriz entre la sumatoria de los valores de su columna respectiva, para posteriormente calcular el promedio de

los valores de las filas de la tabla de valores normalizados. Tal valor se presenta en la fila W de la matriz de decisión (Tabla 2) y corresponde a los pesos AHP de cada variable.

El resumen de pesos asignados a cada variable se detalla en la tabla 3.

Tabla 3: Matriz de decisión AHP.

	Variable	Prioridad	Rango
(1)	Pendientes	49.20 %	1
(2)	Litología	27.00 %	2
(3)	Vertientes	13.50 %	3
(4)	Escarpes	6.50 %	4
(5)	Fallas	3.70 %	5

(e, Figura 8) El radio de consistencia (CR), calculado en AHP – OS a partir del contraste de la similitud del arreglo de valores de la matriz de decisión con un arreglo aleatorio de valores en una matriz del mismo tamaño, presentó un valor de 1.9 %, inferior al 10 % ($1.9\% < 10\%$) definido por Saaty como valor máximo aceptable de inconsistencia.

2.5 Generación de mapa de susceptibilidad a movimientos de masa.

Las capas de cada una de las 5 variables geomorfológicas fueron convertidas a datos ráster con un tamaño de celda de 30, para componer un mapa de susceptibilidad del sector centro-norte del Distrito Central.

Cada capa, que a su vez contó con una subclasificación basada en atributos ordenados por el nivel de propensión a movimientos de masa (apartados 2.2.1 a 2.2.5), fue ingresada a la calculadora ráster de la familia de álgebra de mapas, asignando los pesos porcentuales arrojados por el Proceso de Jerarquía Analítica de la Tabla 3.

Se generaron histogramas zonales, con herramientas de análisis espacial, para determinar la frecuencia de los 6 niveles de susceptibilidad definidos en la superficie total. Los valores de frecuencia, que representan la superficie en cada clase de susceptibilidad, fueron posteriormente consolidados en 3 superclases denominadas alta, media y baja susceptibilidad a movimientos de masa.

Se comparó el mapa de susceptibilidad del centro – norte del Distrito Central generado en este estudio con el mapa de deslizamientos realizado en 2014 por JICA y AMDC y digitalizado por IHCIT-UNAH para observar la distribución de los movimientos de masa documentados en el sector como argumentos para evaluar el poder predictivo del modelo.

Se calculó el coeficiente de correlación de Spearman entre la cantidad de unidades de superficie por valor de susceptibilidad (esto es, el área en cada uno de los valores de susceptibilidad del mapa de susceptibilidad generado) y la cantidad de deslizamientos para determinar si la aleatoriedad podría ser causal de la distribución de deslizamientos en el área estudiada. Asimismo, se calculó la correlación entre el valor de susceptibilidad (valores ordinales del 1 al 6, asignados de menor a mayor susceptibilidad en el mapa de susceptibilidad generado) y la cantidad de deslizamientos, como insumo para evaluar la incidencia de los diferentes niveles de susceptibilidad calculados, en la cantidad de deslizamientos documentados para el área estudiada.

3 Resultados y Discusión

Se generó un mapa de susceptibilidad para la región centro-norte del Distrito Central. La definición de 6 grados de susceptibilidad para cada una de las capas de variables geomorfológicas, generó una simbología que muestra una variación cromática desde el rojo intenso, para valores máximos de susceptibilidad, hasta el verde oscuro, para atributos que presentan los menores valores (Figura 9)

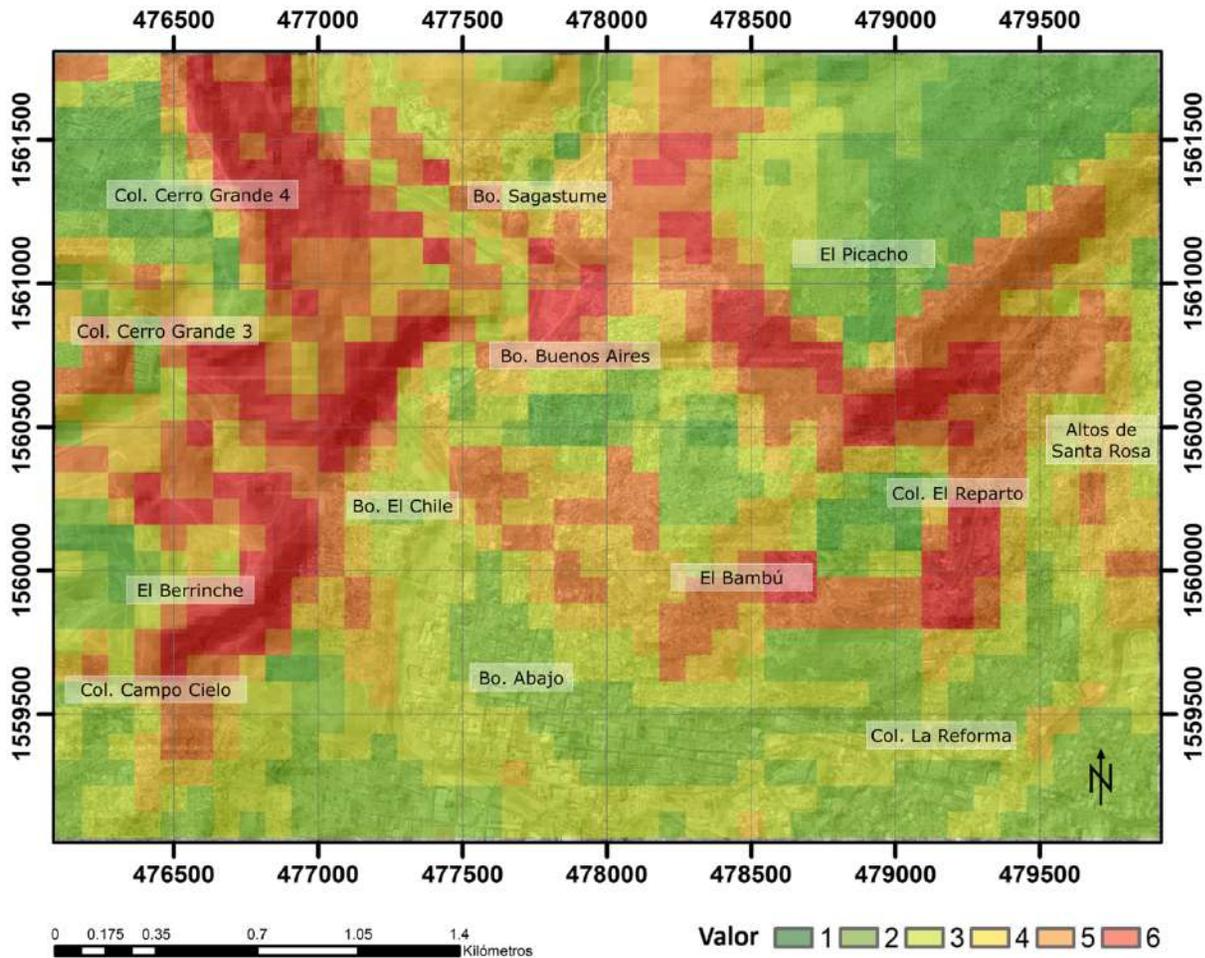


Figura 9: Susceptibilidad para la región centro-norte del Distrito Central, bajo la perspectiva de geomorfología aplicada a movimientos de masa (1:120,000).

De la superficie en alta susceptibilidad, un 54.71 % (16.59 % del total del área estudiada) se encuentra en terreno no urbanizado o en superficies que corresponden a deslizamientos recientes. Teniendo en consideración el efecto que el incremento de la masa y el ángulo de la superficie de falla presentan sobre la tensión cortante, es recomendable evitar el establecimiento de infraestructura o la transformación de pendientes.

Se observa una tendencia a que las zonas de alta susceptibilidad sean adyacentes principalmente a zonas de media susceptibilidad. Medidas permanentes de vigilancia de variables de movimientos de masa podrían estar siendo adoptadas en zonas de susceptibilidad media como resultado del contacto con el paisaje circundante. Existe sin embargo un 20.56 % del total de la superficie estudiada, que muestra sectores de susceptibilidad media rodeada por sectores de susceptibilidad baja, por lo que la necesidad de

adoptar medidas de control de riesgo en la zona podría ser menos evidente; lo que vuelve aconsejable la revisión de los mecanismos actuales de monitoreo y respuesta a movimientos de masa en la zona.

El 16.22 % del total de la superficie de baja susceptibilidad es adyacente a sectores de alta susceptibilidad, por lo que se sugiere considerar contramedidas que valoren las características condicionantes de las regiones vecinas.

La distribución de la superficie por valores y niveles de susceptibilidad a movimientos de masa obtenida del mapa de susceptibilidad generado se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4: Superficie por valores y niveles de susceptibilidad.

Valor de Susceptibilidad	Unidades de superficie por valor de susceptibilidad	Porcentaje de superficie por valor de susceptibilidad	Cantidad de deslizamientos por valor de susceptibilidad	Nivel de susceptibilidad	Porcentaje de superficie por nivel de susceptibilidad	Porcentaje de deslizamientos por nivel de susceptibilidad
1	112	8.89 %	0.00 % (0)	Baja	29.84 %	3.51 %
2	264	20.95 %	3.51 % (2)			
3	276	21.90 %	19.30 % (11)	Media	39.84 %	43.86 %
4	226	17.94 %	24.56 % (14)			
5	246	19.52 %	26.32 % (15)	Alta	30.32 %	52.63 %
6	136	10.79 %	26.32 % (15)			
Totales	1260	100 %	100 % (57)		100 %	100 %

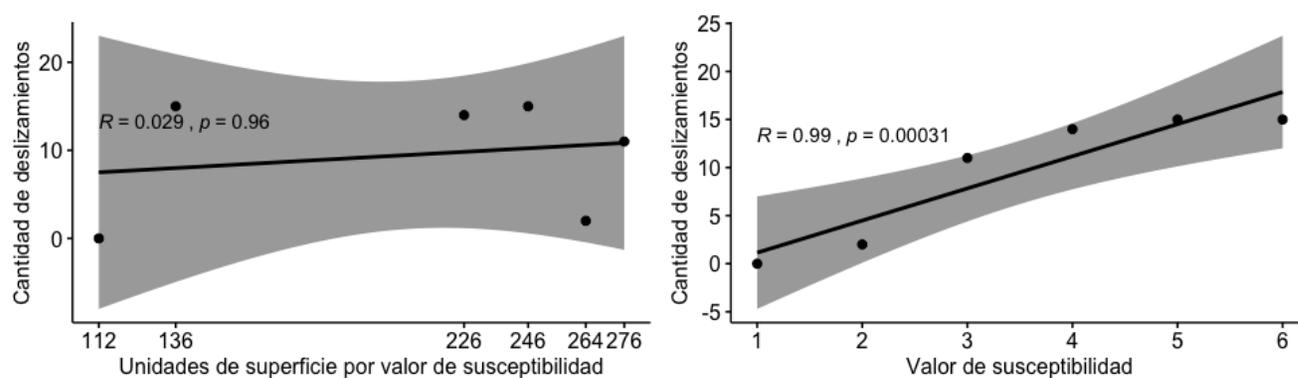


Figura 10: Correlación (Spearman) de la cantidad de deslizamientos con: unidades de superficie por valor de susceptibilidad (izquierda) y valores de susceptibilidad (derecha).

La Figura 10 ilustra cómo los valores de susceptibilidad generados por el modelo (valores ordinales del 1 al 6, indicativos de mínima y máxima susceptibilidad, respectivamente), coinciden con la cantidad de deslizamientos documentados para el centro norte del Distrito Central. La gráfica izquierda muestra una nula correlación entre la cantidad de unidades de superficie y cantidad de deslizamientos, con un $\rho = .029$,

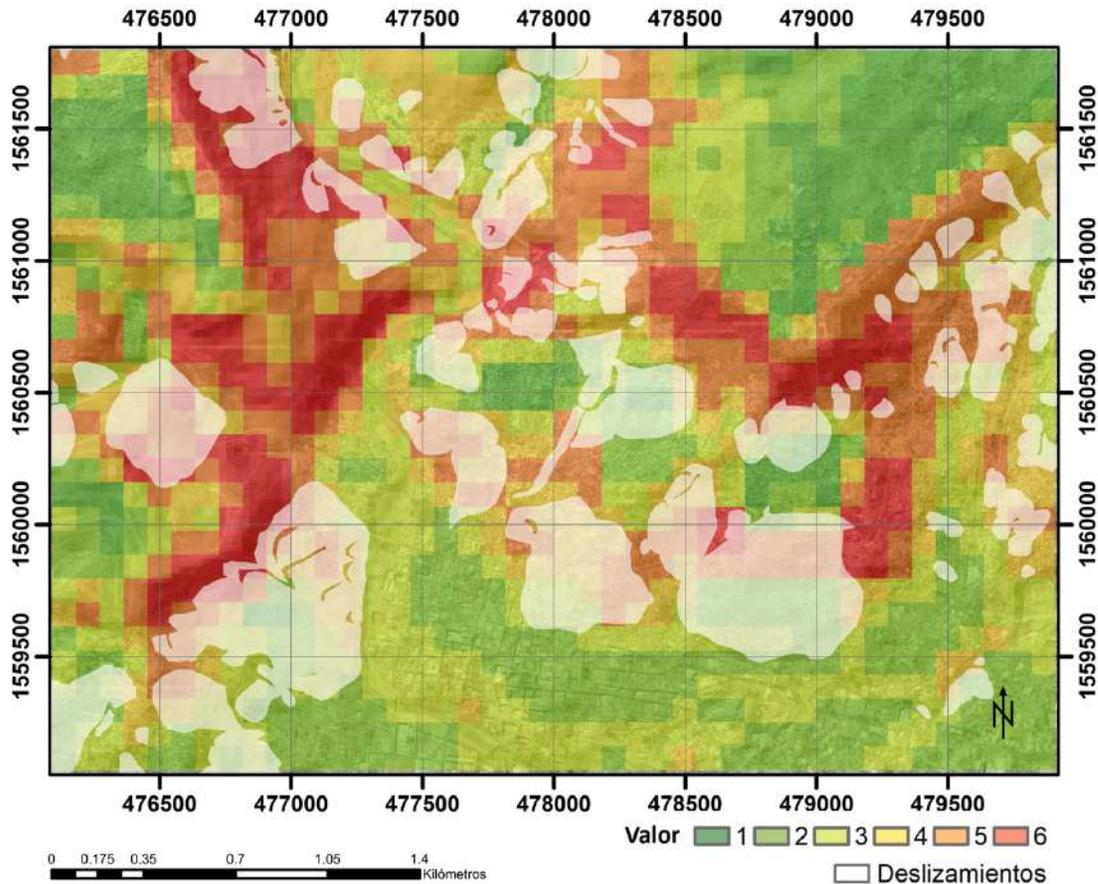


Figura 11: Categorías de susceptibilidad e inventario de deslizamientos en el centro – norte del Distrito Central.

($S=33.985$, $p=.9565$), que indica que el área no es el factor que determina la abundancia de este tipo de movimientos de masa, sino los valores de susceptibilidad (gráfica derecha), que muestran con un $\rho=.99$, ($S=.50362$, $p=.0003091$) una fuerte correlación con la cantidad de deslizamientos. En otras palabras, no son las mayores áreas las que presentan las mayores cantidades de deslizamientos, como podría esperarse en un modelo donde la distribución de movimientos de masa se debe a la aleatoriedad, sino que se observa una clara tendencia a que sean los incrementos en el valor de susceptibilidad los que corresponden con un incremento en el número de deslizamientos en el área estudiada.

4 Conclusiones

El hecho de que la cantidad de deslizamientos presenten una correlación directa fuerte con los valores de susceptibilidad definidos ($\rho=.99$, $S = .50362$, $p=.0003091$), proporciona argumentos favorables para evaluar el poder predictivo del modelo. Lo anterior sugiere que realizar nuevas versiones del mapa de susceptibilidad, basadas en la metodología presentada y alimentadas por capas con escalas más detalladas, producto de verificaciones más exhaustivas en campo para el refinamiento de litologías y de imágenes satelitales de mayor resolución para la representación de pendientes podrán depurar este análisis teniendo en cuenta la relevancia del sector en términos de combinación de condicionantes y de la consecuente urgencia de gestionar el riesgo geomorfológico para la población radicada en el centro - norte del Distrito Central.

El radio de consistencia obtenido ($1.9 < 10$) en la evaluación por pares de AHP, sugiere que esta ha sido soportada en argumentos que posibilitaron una jerarquía clara entre variables en función de su potencial condicionante de movimientos de masa, lo cual podría explicar la adecuada correlación entre deslizamientos y superficies de media y alta susceptibilidad encontrada en este estudio preliminar. De manera general, la evaluación de susceptibilidad a movimientos de masa toma en consideración procesos físicos universales, sin embargo, los pesos calculados en este estudio responden a un análisis que parte de la revisión de los efectos y las causalidades documentadas hace al menos dos décadas en el Distrito Central, por lo que metodologías que consideren variables similares para regiones diferentes encontrarán en sus registros locales, los insumos más valiosos para la definición de prioridades adaptadas a su contexto geomorfológico.

Si bien la replicación de la metodología con datos de mayor resolución puede generar para la zona estudiada valiosos hallazgos en el corto plazo que posibiliten una gestión de riesgo precisa y eficiente, resulta sumamente revelador a manera de aproximación inicial, el hecho de que los porcentajes de superficie en baja y alta susceptibilidad a movimientos de masa presenten valores tan cercanos (29.84 % de superficie en baja susceptibilidad y 30.32 % en alta susceptibilidad). Más aún, al considerar la actividad en los sectores en alta y media susceptibilidad, se observa que estos acumulan el 96.49 % de los deslizamientos en el 70.16 % del área, lo que resulta en una minoría de áreas seguras, en las cuales la construcción de sistemas resilientes debe ser priorizada para garantizar condiciones sostenibles para la vida comunitaria.

5 Reconocimientos

El Proyecto Regional de Formación Aplicada a los Escenarios de Riesgo con Vigilancia de los Fenómenos Volcánicos, Sísmicos e Hidrogeológicos en Centro América (RIESCA), desarrolló en marzo de 2018, bajo la coordinación del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT-UNAH) y el acompañamiento técnico del Instituto de Geología y Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (IGG-CIGEO-UNAN), el proceso formativo “Geomorfología aplicada a movimientos de masa”. La metodología presentada en este trabajo tiene origen en tal iniciativa.

Los comentarios y valoraciones de Elisabeth Espinoza (UPNFM/UNAH) y la orientación sobre funcionalidad de herramientas SIG de José David Cáceres (UNAH) han sido de suma importancia para el desarrollo de este estudio.

El departamento de Ciencias Naturales de la UPNFM y la Escuela de Física de la UNAH proporcionaron las condiciones para el involucramiento del recurso humano en las etapas de construcción del presente estudio de susceptibilidad.

6 Referencias

Agencia Japonesa de Cooperación Internacional, JICA., Sociedad Japonesa para el Fomento de las Ciencias, JSPS., Universidad Politécnica de Ingeniería de Honduras, UPI. (2014). Mapa de deslizamientos de tierra de Tegucigalpa [Mapa]. (escala 1:9,000). Tegucigalpa, Honduras.

Alcántara, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4):107–124.

Bhushan, N. y Rai, K. (2007). Strategic decision making: applying the analytic hierarchy process. Springer Science & Business Media.

Braun, A., García, E. L., Moncada, R., y Yamagishi, H. (2018). Landslide Susceptibility Mapping in Tegucigalpa, Honduras, Using Data Mining Methods. En *IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California*, volumen 1, pp. 207–215, Berlín.

Centers for Disease Control and Prevention (2003). *Landslide (Mudslide) Safety*. Atlanta. Recuperada de <https://www.cdc.gov/disasters/pdf/landslides.pdf>.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas (1999). Honduras: evaluación de los daños ocasionados por el huracán Mitch, 1998. sus implicaciones para el desarrollo económico y social y el medio ambiente. LC/MEX/L. 367), 26 de enero de 1999.

Flores, R., Luo, Z., y Juang, C. H. (2009). Framework for probabilistic assessment of landslide: a case study of el berrinche. *Environmental Earth Sciences*, 59(3), 489–499.

García, E. y Axelsson, K. (2014). The use of press data in the development of a database for rainfall-induced landslides in tegucigalpa, honduras, 1980–2005. *Natural Hazards*, 73(2), 237–258.

García, E. y Yamagishi, H. (2017). Landslide Susceptibility Mapping Based on Aerial Photograph Interpretation Inventory for Tegucigalpa, Honduras: An Application of the Matrix Method. *GIS Landslide*, 163–181.

Gares, P., Sherman, D., y Nordstrom, K. (1994). Geomorphology and natural hazards. In *Geomorphology and natural hazards*, 1-18.

Harp, E. L., Castañeda, M., y Held, M. D. (2002a). Landslides triggered by Hurricane Mitch in Tegucigalpa, Honduras. US Department of the Interior, US Geological Survey.

Harp, E. L., Hagaman, K. W., Held, M. D., y McKenna, J. P. (2002b). Digital inventory of landslides and related deposits in Honduras Triggered by Hurricane Mitch. US Geological Survey Open-File Report, 02-61.

Lang, Y. y Nakamura, H. (1997). Characteristics of earthquake induced landslides and theoretical analysis on model slopes. *Landslides*, 34(3):25–33.

Leopold, L. B., Wolman, M., y Miller, J. (1964). *Fluvial processes in Geomorphology*. San Francisco: W.H. Freeman and Co.

Mejía, M. y García, L. A. (1996). Natural hazard and risk assessment using decision support systems, application: Glenwood springs, colorado. *Environmental & Engineering Geoscience*, II(3), 299–324.

Mezoghi, T., Akhir, J., Rafek, A., y Abdullah, I. (2012). Analytical hierarchy process method for mapping landslide susceptibility to an area along the EW highway (Gerik-Jeli), Malaysia. *Asian Journal of Earth Sciences*, 5(1):13–24.

Mueller, J. (1968). An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes. *Annals of the Association of American Geographers*, 58(2):371–385.

O’Conner, E. A. (1986). Report on a visit to Tegucigalpa. Technical Report Honduras technical report MP/86/19/R, Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2013). En busca del orden perdido. La experiencia de Tegucigalpa en la incorporación de la gestión de riesgos y la adaptación climática en el manejo del territorio. Recuperado de https://doc.rero.ch/record/231816/files/07-En_busca_del_orden_perdido.pdf.

- Rogers, R. y O'Conner, E. (1990). Mapa Geológico de Honduras: Hoja de Tegucigalpa (segunda edición) [Mapa]. (escala 1:50,000). Tegucigalpa: Instituto Geográfico Nacional.
- Saaty, T. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1):9–26.
- Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1):83–98.
- Shahabi, H. y Hashim, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. *Scientific reports*, 5:98–99.
- Spencer, W. (2000). *Geologic Maps. A practical guide to the preparation and interpretation of geologic maps*. New Jersey: Prentice Hall. (ISBN 0-13-011583-5).
- Swanston, D. (1974). Slope stability problems associated with timber harvesting in mountainous regions of the western United States. Technical Report Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-021, US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland.
- Sánchez, G. (1986). *Manual de Ingeniería de Ríos*. México: UNAM.
- Thomson, S. y Morgenstern, N. R. (1977). Factors affecting distribution of landslides along rivers in southern Alberta. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(4):508–523.
- Tibaldi, A., Ferrari, L., y Pasquarè, G. (1995). Landslides triggered by earthquakes and their relations with faults and mountain slope geometry: an example from Ecuador. *Geomorphology*, 11(3):215–226.
- U.S. Geological Survey (2004). Landslide types and processes. [Hoja informativa]. Recuperada de <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>.
- Van Zyl, J. (2001). The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*, 48. (5-12), 559–565.
- Wang, W., Wu, H., Nakamura, H., Wu, S., Ouyang, S., y Yu, M. (2003). Mass movements caused by recent tectonic activity: The 1999 Chi-chi earthquake in central Taiwan. *Island Arc*, 12(4):325–334.