



Universidad de Oviedo  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN BIOGEOCIENCIAS

**Movimientos del terreno en el municipio de Tegucigalpa,  
Honduras: caracterización, estimación de la peligrosidad y  
cuantificación de las pérdidas asociadas mediante modelos  
probabilísticos**

**Landslides in the municipality of Tegucigalpa, Honduras:  
characterization, hazard estimation and quantification of  
associated losses using probabilistic models**

Ginés Suárez Vázquez  
Tesis Doctoral  
2022





Universidad de Oviedo  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN BIOGEOCIENCIAS

**Movimientos del terreno en el municipio de Tegucigalpa,  
Honduras: caracterización, estimación de la peligrosidad y  
cuantificación de las pérdidas asociadas mediante modelos  
probabilísticos**

**Landslides in the municipality of Tegucigalpa, Honduras:  
characterization, hazard estimation and quantification of  
associated losses using probabilistic models**

Tesis Doctoral  
Directora de la tesis  
Dra. María José Domínguez Cuesta  
2022



## RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

<b>1.- Título de la Tesis</b>	
Español/Otro Idioma: Movimientos del terreno en el municipio de Tegucigalpa, Honduras: caracterización, estimación de la peligrosidad y cuantificación de las pérdidas asociadas mediante modelos probabilísticos.	Inglés: Landslides in the municipality of Tegucigalpa, Honduras: characterization, hazard estimation and quantification of associated losses using probabilistic models.
<b>2.- Autor</b>	
Nombre: Ginés Suárez Vázquez	DNI/Pasaporte/NIE:
Programa de Doctorado: Biogeociencias	
Órgano responsable: Centro Internacional de Postgrado.	

### RESUMEN (en español)

El Municipio del Distrito Central (MDC), la capital de Honduras, es la localidad del país que concentra el mayor número de eventos históricos de movimientos de ladera, debido a las características de sus rocas y suelos y a las precipitaciones asociadas a ciclones tropicales. En 1998, el huracán Mitch generó inestabilidades que impactaron directa o indirectamente a toda población del MDC. Posteriormente se llevaron a cabo distintos estudios sobre las inestabilidades con resultados muy variados que, en general, clasifican como de alta y media susceptibilidad en torno al 80% del área urbana. El principal objetivo de este trabajo es elaborar una cartografía que recoja la distribución espacial de las pérdidas probables ocasionadas por movimientos de ladera y que permita identificar acciones eficientes para la reducción de este riesgo en el MDC. Mediante trabajo de campo y fotointerpretación se revisaron los inventarios anteriores y se elaboró y validó un nuevo inventario de 28 deslizamientos, con un área promedio de 147.116 m<sup>2</sup> y una superficie total de 4.119.267 m<sup>2</sup>. El uso de Sistemas de Información Geográfica permitió cuantificar las diferencias entre todos los inventarios y establecer de manera objetiva sus limitaciones. Se confirmó la importancia de la presencia de depósitos de coluvión y suelos residuales, con una capacidad explicativa para la distribución de deslizamientos que duplica la del resto de las variables condicionantes analizadas. Esta conclusión es muy relevante, pues permite concentrar las acciones de reducción del riesgo de deslizamientos en los 39 km<sup>2</sup> cubiertos por estos depósitos, que representan un 15% de la superficie estudiada. Consecuentemente, el mapa de susceptibilidad a deslizamientos elaborado a partir de la cobertura de coluviones y suelos residuales, muestra mayor poder para explicar la distribución espacial del inventario validado que los mapas previos, con una Área Bajo la Curva de 88,6% en comparación con 79,8% y 69,8% de los anteriores. Se estimó la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos rotacionales y traslacionales, integrando i) la probabilidad espacial de los deslizamientos, calculada por medio de modelos probabilistas basados en el método del talud infinito, con ii) la probabilidad temporal, calculada a través de la probabilidad de los indicadores de lluvia antecedente asociada a datos históricos de movimientos de ladera. Adicionalmente, se caracterizaron las limitaciones del método del talud infinito para estimar la probabilidad espacial de ocurrencia de deslizamientos y se plantearon metodologías para gestionar dichas limitaciones. Además, se desarrollaron funciones de vulnerabilidad para las viviendas basadas en datos empíricos y aplicando metodologías probabilistas que permitieron caracterizar el daño promedio variable entre el 53%, para las viviendas de ladrillo precarias, al 30%, para viviendas de bloque. Para el año 2020, se estimó un número de 164.275 personas y 37.870 viviendas expuestas a deslizamientos en el MDC, lo que supone el 12 y 11,5%, respectivamente. El valor económico expuesto, considerando únicamente las viviendas, se estimó en 1.255 x 10<sup>6</sup> dólares, un 4,2% del stock de vivienda del MDC proyectado para el año 2020. Las pérdidas probables se representaron espacialmente por medio de mapas para distintos periodos de retorno, estimando el valor total de la pérdida para cada periodo de retorno y la Pérdida Anual Esperada, cuyo valor obtenido fue de 7,26 x 10<sup>6</sup> dólares. Por último, se planteó la construcción de un sistema de drenaje pluvial, como



acción costo eficiente para reducir el riesgo de deslizamientos. Se obtuvo un valor de  $2,6 \times 10^6$  dólares, al evaluarlo mediante el indicador económico del Valor Actual Neto. Este trabajo pone de manifiesto la importancia de llevar a cabo estudios especializados que permitan orientar la adecuada ocupación del territorio y optimizar los recursos invertidos minimizando los daños asociados a inestabilidades del terreno.

### RESUMEN (en Inglés)

The Municipality of the Central District (MCD), the Honduran capital, is the locality which concentrates the largest number of historical landslide events countrywide, due to the characteristics of its rocks and soils and the exposure to tropical cyclones rainfall. In 1998, Hurricane Mitch generated instabilities that direct or indirectly impacted the entire population of the MCD. Subsequently, different landslides studies were carried with various results, which classified as high and medium susceptibility around 80% of the urban footprint. The main objective of this work is to elaborate a cartography of the landslide probable losses spatial distribution, to inform the identification of efficient risk reduction actions in the MCD. Through field work and photo interpretation, the previous inventories were reviewed and a new inventory of 28 landslides, with an average area of 147.116 m<sup>2</sup> and a total area of 4.119.267 m<sup>2</sup>, was prepared and validated. The use of Geographic Information Systems supported the quantification of differences between all inventories and the definition of their limitations, in an objective manner. The importance of colluvium deposits and residual soils presence was confirmed, showing an explanatory capacity for landslides distribution which doubles the rest of the conditioning variables. This conclusion is highly relevant, because it allows to concentrate landslide risk reduction actions in the 39 km<sup>2</sup> covered by these deposits, which represent 15% of the study area surface. Consequently, the landslide susceptibility map created from the colluvium and residual soil coverage showed greater explanatory power of the validated inventory spatial distribution than previous maps, with an Area Under the Curve of 88,6%, compared to 79,8% and 69,8%. The probability of occurrence of rotational and translational landslides was estimated by integrating i) landslides spatial probability, calculated through probabilistic models based on the infinite slope method, with ii) landslides temporal probability, calculated through the probability of antecedent rainfall indicators associated with landslides historical data. Additionally, the limitations of the infinite slope method to estimate landslides spatial occurrence probability were characterized and methodologies to manage those limitations were proposed. In addition, vulnerability functions for dwellings based on empirical data and probabilistic modelling were developed. Those functions allowed to estimate a variable average damage between 53%, for precarious brick dwellings, to 30%, for block dwellings. The population and homes exposed to landslides in the MCD for 2020, were estimated in 164.275 and 37.870 homes, which represents 12% and 11,5%, respectively. Considering only the houses, the economic value exposed, was estimated at  $1.255 \times 10^6$  dollars, 4,2% of the MCD's projected housing stock for 2020. The probable losses were spatially represented by maps for different return periods, and the total losses for each return period and the Average Annual Loss (AAL) were estimated. The estimated AAL was  $7,26 \times 10^6$  dollars. Finally, the construction of a pluvial drainage system was proposed as a cost-efficient action to reduce landslides risk. Applying the economic indicator Net Present Value, a value of  $2,6 \times 10^6$  dollars was obtained for the pluvial drainage system. This work highlights the importance of carrying out specialized studies to inform an adequate land use occupation and to optimize invested resources, minimizing the damage associated with landslides.

**SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO EN BIOGEOCIENCIAS.**

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a todas las personas que han hecho posible completar esta tesis doctoral.

A mi esposa Mariluz, a mis hijos y nietos porque este ha sido un compromiso como familia, en unos tiempos muy particulares.

A mi directora María José Domínguez, por el compromiso con esta tesis, la paciencia para escuchar y orientar, la disponibilidad y el buen humor, todos ingredientes fundamentales para poder llevar a buen puerto este proyecto.

A la Alcaldía Municipal del Distrito Central, por la generosidad compartiendo la información existente, por acompañarme en las salidas de campo, toda una aventura poder visitar algunos de los barrios, y por su interés con los resultados. En particular quiero agradecer a Rubén Hernández y Cinthia Borjas, por su disponibilidad.

A la ONG GOAL por compartir la información de las encuestas, que fueron un insumo fundamental para poder aproximarse a uno de los problemas teóricos fundamentales para estimar el riesgo ante deslizamientos, como es la caracterización de la vulnerabilidad de las viviendas.

A la Universidad Nacional Autónoma por brindarme la información de su estación pluviométrica y permitirme compartir los avances del estudio con la comunidad académica de Honduras.

A la Universidad de Costa Rica y en particular a Rolando Mora y Fabian Campos, por la paciencia para orientarme en el uso del programa PISA-m.

Al Banco Interamericano de Desarrollo por brindarme la oportunidad de participaron en diversos cursos y proyectos, que contribuyeron a generar la base de conocimiento en que se asienta esta tesis.

A la arquitecta Nancy Turcios por la elaboración de los presupuestos de las viviendas.

A mi hermana Ana por todo el apoyo, incluyendo la orientación para el tratamiento estadístico de las encuestas.

A los autores de las publicaciones y estudios en que se basa esta tesis. Elaborar una tesis creo que es, sobre todo, un ejercicio de humildad que nos permite sentirnos parte de una comunidad que trató y tratará de responder a las mismas preguntas, donde cada granito de arena se va sumando para construir el conocimiento colectivo.

Finalmente, dedico esta tesis a mis padres, Conchita y Ginés.



# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>7</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1 Planteamientos generales .....	9
1.2 Estado del arte sobre cuantificación de riesgo de desastres.....	12
1.2.1 Conceptualización .....	12
1.2.2 Parametrización de la amenaza y el riesgo.....	14
1.2.3 Modelos de análisis catastrófico del riesgo.....	16
1.2.4 Caracterización de la vulnerabilidad .....	18
1.3 Análisis costo/beneficio de las medidas de reducción del riesgo .....	23
1.3.1 Indicadores de eficiencia empleados en el ACB .....	23
1.3.2 Metodología para el ACB de medidas de reducción del riesgo .....	24
1.3.3 Resultados de los ACB de medidas de reducción del riesgo .....	25
1.4 Movimientos de ladera y riesgo asociado.....	25
1.4.1 Clasificación.....	25
1.4.2 Amenaza.....	27
1.4.3 Probabilidad espacial.....	28
1.4.4 Limitaciones de las metodologías de análisis de probabilidad espacial.....	35
1.4.5 Probabilidad temporal .....	36
1.4.6 Probabilidad de la magnitud.....	37
1.4.7 Probabilidad de la intensidad .....	42
1.4.8 Limitaciones de los modelos para estimar la amenaza .....	42
1.4.9 Precisión de los modelos de probabilidad .....	43
1.4.10 Caracterización de la vulnerabilidad .....	47
1.4.11 Caracterización del riesgo .....	48
1.4.12 ACB de las medidas de reducción del riesgo .....	49
1.5 Motivación y objetivos .....	50
1.5.1 Objetivo General .....	50
1.5.2 Objetivo Específicos .....	50
1.6 Zona de estudio .....	50
1.6.1 Descripción geográfica.....	50
1.6.2 Viviendas en el MDC .....	51
1.6.3 Descripción geológica .....	53
<b>2 METODOLOGÍA.....</b>	<b>65</b>
2.1 Recopilación de información existente .....	65
2.2 Gestión de la información mediante SIG.....	66



2.2.1	Elaboración de modelos digitales del terreno .....	66
2.2.2	Elaboración del mapa de número de eventos de inestabilidad por barrio .....	66
2.2.3	Análisis mediante SIG.....	67
2.3	Comparación de inventarios .....	67
2.4	Fotointerpretación .....	69
2.5	Trabajo de campo.....	69
2.5.1	Trabajo de campo en 2016 .....	69
2.5.2	Trabajo de campo en 2018 .....	70
2.6	Elaboración de inventario de movimientos de ladera validado .....	70
2.7	Caracterización de los coluviones y suelos residuales.....	70
2.7.1	Distribución respecto a otras variables.....	70
2.7.2	Caracterización de la profundidad y propiedades mecánicas.....	71
2.7.3	Capacidad explicativa de la susceptibilidad a movimientos de ladera.....	72
2.8	Estimación del factor de seguridad aplicando el modelo del talud infinito....	73
2.8.1	Aplicación en una muestra de deslizamientos.....	73
2.8.2	Análisis de sensibilidad del modelo del talud infinito .....	76
2.8.3	Estimación del factor de seguridad aplicando el modelo del talud infinito de forma probabilista .....	78
2.9	Elaboración de funciones de daño .....	79
2.9.1	Selección de encuestas .....	80
2.9.2	Estimación del error de las encuestas.....	82
2.9.3	Metodología para construir las funciones de vulnerabilidad .....	83
2.10	Estimación probabilista del riesgo de deslizamientos .....	85
2.10.1	Estimación de la amenaza de deslizamientos.....	85
2.10.2	Estimación de la exposición .....	89
2.10.3	Estimación de la vulnerabilidad y el daño .....	89
2.10.4	Estimación del riesgo .....	90
2.11	Diseño de medidas para reducir el riesgo de deslizamiento .....	92
2.11.1	Diseño de los drenajes superficiales.....	92
2.11.2	Análisis costo/beneficio .....	96
<b>3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>99</b>
3.1	Comparación entre inventarios .....	99
3.2	Inventario de movimientos de ladera validado .....	99
3.3	Caracterización de coluviones y suelos residuales .....	102
3.3.1	Distribución espacial .....	102
3.3.2	Profundidad y propiedades mecánicas .....	106
3.3.3	Capacidad explicativa respecto a otras variables .....	107
3.3.4	Capacidad explicativa del mapa de susceptibilidad .....	108

3.4	Estimación del factor de seguridad aplicando el modelo del talud infinito..	110
3.4.1	Estimación en una muestra de deslizamientos .....	110
3.4.2	Análisis de sensibilidad del modelo del talud infinito .....	126
3.4.3	Estimación del factor de seguridad aplicando el modelo del talud infinito de forma probabilista .....	130
3.5	Funciones de daño para las viviendas situadas en deslizamientos activos ...	134
3.5.1	Estimación del error de las encuestas.....	135
3.5.2	Estados de daño y elementos a reponer de las viviendas .....	135
3.5.3	Estimación de la RMD .....	135
3.5.4	Gestión de la incertidumbre de las funciones.....	138
3.6	Estimación probabilista del riesgo por deslizamientos en el MDC .....	139
3.6.1	Estimación de la amenaza .....	139
3.6.2	Estimación de la exposición.....	141
3.6.3	Estimación de la vulnerabilidad y el daño .....	143
3.6.4	Estimación del riesgo .....	143
3.7	Diseño de medidas para reducir el riesgo de deslizamientos.....	146
3.7.1	Propuesta de medidas .....	146
3.7.2	Estimación del beneficio .....	149
3.7.3	Análisis costo/beneficio .....	151
<b>4</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>153</b>
4.1	Diferencias entre los inventarios de movimientos de ladera .....	153
4.2	Importancia de la cobertura de coluviones y suelos residuales .....	154
4.3	Limitaciones del modelo del talud infinito .....	154
4.3.1	Muestra de deslizamientos existentes en la zona de estudio.....	155
4.3.2	Limitaciones para modelar movimientos de ladera en el MDC.....	162
4.4	Modelo de riesgo de deslizamientos .....	163
4.4.1	Modelo de análisis de la amenaza .....	163
4.4.2	Relevancia del modelo de análisis del riesgo.....	165
4.4.3	Parametrización de las funciones de vulnerabilidad .....	166
4.4.4	Estimación del riesgo de deslizamientos.....	167
4.5	Eficiencia del sistema de drenaje de agua superficial.....	167
4.6	Consideraciones generales y futuras línea de investigación .....	167
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>171</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>173</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>189</b>



## RESUMEN

El Municipio del Distrito Central (MDC), la capital de Honduras, es la localidad del país que concentra el mayor número de eventos históricos de movimientos de ladera, debido a las características de sus rocas y suelos y a las precipitaciones asociadas a ciclones tropicales. En 1998, el huracán Mitch generó inestabilidades, como el deslizamiento del cerro El Berrinche, que impactaron directa o indirectamente a toda población del MDC. Posteriormente se llevaron a cabo distintos estudios para inventariar los movimientos de ladera activos e identificar las zonas más propensas a estos fenómenos, con resultados muy variados que, en general, clasifican como de alta y media susceptibilidad en torno al 80% del área urbana.

El principal objetivo de este trabajo es elaborar una cartografía que recoja la distribución espacial de las pérdidas probables ocasionadas por movimientos de ladera y que permita identificar acciones eficientes para la reducción de este riesgo en el MDC. Mediante trabajo de campo y fotointerpretación se revisaron los inventarios anteriores y se elaboró y validó un nuevo inventario de 28 deslizamientos, con un área promedio de 147.116 m<sup>2</sup> y una superficie total de 4.119.267 m<sup>2</sup>. El uso de Sistemas de Información Geográfica permitió cuantificar las diferencias entre todos los inventarios y establecer de manera objetiva sus limitaciones.

Se confirmó la importancia de la presencia de depósitos de coluvión y suelos residuales, con una capacidad explicativa para la distribución de deslizamientos que duplica la del resto de las variables condicionantes analizadas. Esta conclusión es muy relevante, pues permite concentrar las acciones de reducción del riesgo de deslizamientos en los 39 km<sup>2</sup> cubiertos por estos depósitos, que representan un 15% de la superficie estudiada. Consecuentemente, el mapa de susceptibilidad a deslizamientos elaborado a partir de la cobertura de coluviones y suelos residuales, muestra mayor poder para explicar la distribución espacial del inventario validado que los mapas previos, con una Área Bajo la Curva de 88,6% en comparación con 79,8% y 69,8% de los anteriores.

Se estimó la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos rotacionales y traslacionales, integrando i) la probabilidad espacial de los deslizamientos, calculada por medio de modelos probabilistas basados en el método del talud infinito, con ii) la probabilidad temporal, calculada a través de la probabilidad de los indicadores de lluvia antecedente asociada a datos históricos de movimientos de ladera. Esta propuesta metodológica permitió superar los principales limitantes identificados en estudios previos. Adicionalmente, se caracterizaron las limitaciones del método del talud infinito para estimar la probabilidad espacial de ocurrencia de deslizamientos y se plantearon metodologías para gestionar dichas limitaciones.

Además, se desarrollaron funciones de vulnerabilidad para las viviendas ante los deslizamientos basadas en datos empíricos, aplicando metodologías probabilistas para gestionar la incertidumbre asociada a la respuesta de las viviendas y la intensidad de los deslizamientos. Dichas funciones permitieron caracterizar el daño promedio de las viviendas, que varía entre el 53%, para las viviendas de ladrillo precarias al 30%, para viviendas de bloque. Para el año 2020, se estimó un número de 164.275 personas y 37.870 viviendas expuestas a deslizamientos en el MDC, lo que supone el 12 y 11,5%, respectivamente. El valor económico expuesto, considerando únicamente las viviendas, se estimó en 1.255 x 10<sup>6</sup> dólares, un 4,2% del stock de vivienda del MDC proyectado para el año 2020.

La probabilidad de los deslizamientos, la vulnerabilidad, caracterizada considerando su incertidumbre, y el valor expuesto de las viviendas se integraron para cuantificar las pérdidas económicas probables asociadas a los deslizamientos en el MDC. Las pérdidas probables se representaron espacialmente por medio de mapas para distintos periodos de retorno, estimando el valor total de la pérdida para cada periodo de retorno y la Pérdida Anual Esperada, cuyo valor obtenido fue de 7,26 x 10<sup>6</sup> dólares. Por último, se planteó la construcción de un sistema de

drenaje pluvial, como acción costo eficiente para reducir el riesgo de deslizamientos. Al evaluar la eficiencia de dicho sistema para reducir el riesgo de deslizamientos mediante el indicador económico del Valor Actual Neto se obtuvo un valor de  $2,6 \times 10^6$  dólares.

Este trabajo pone de manifiesto la importancia de llevar a cabo estudios especializados que permitan orientar la adecuada ocupación del territorio y optimizar los recursos invertidos minimizando los daños asociados a inestabilidades del terreno.

## ABSTRACT

The Municipality of the Central District (MCD), the Honduran capital, is the locality which concentrates the largest number of historical landslide events countrywide, due to the characteristics of its rocks and soils and the exposure to tropical cyclones rainfall. In 1998, Hurricane Mitch generated instabilities as the Berrinche's Hill landslide, that directly or indirectly impacted the entire population of the MCD. Subsequently, different landslides inventories and susceptibility studies with dissimilar results, and which classified as high and medium susceptibility around 80% of the urban footprint, were carried out.

The main objective of this work is to elaborate a cartography of the landslide probable losses spatial distribution, to inform the identification of efficient risk reduction actions in the MCD. Through field work and photo interpretation, the previous inventories were reviewed and a new inventory of 28 landslides, with an average area of 147.116 m<sup>2</sup> and a total area of 4.119.267 m<sup>2</sup>, was prepared and validated. The use of Geographic Information Systems supported the quantification of differences between all inventories and the definition of their limitations, in an objective manner.

The importance of colluvium deposits and residual soils presence was confirmed, showing an explanatory capacity for landslides distribution which doubles the rest of the conditioning variables. This conclusion is highly relevant, because it allows to concentrate landslide risk reduction actions in the 39 km<sup>2</sup> covered by these deposits, which represent 15% of the study area surface. Consequently, the landslide susceptibility map created from the colluvium and residual soil coverage showed greater explanatory power of the validated inventory spatial distribution than previous maps, with an Area Under the Curve of 88,6%, compared to 79,8% and 69,8%.

The probability of occurrence of rotational and translational landslides was estimated by integrating i) landslides spatial probability, calculated through probabilistic models based on the infinite slope method, with ii) landslides temporal probability, calculated through the probability of antecedent rainfall indicators associated with landslides historical data. This methodological proposal allow to overcome the main limitations identified in previous studies. Additionally, the limitations of the infinite slope method to estimate landslides spatial probability were characterized and methodologies to manage those limitations were proposed.

In addition, landslide vulnerability functions for dwellings, based on empirical data, were developed applying probabilistic methodologies to reduce the uncertainty associated with the structural response and the intensity of landslides. Those functions allowed to estimate the average damage, which varies between 53%, for precarious brick dwellings, to 30%, for block dwellings. The population and homes exposed to landslides in the MCD for 2020, were estimated in 164.275 and 37.870, which represents 12% and 11,5%, respectively. Considering only the houses, the economic value exposed, was estimated at  $1.255 \times 10^6$  dollars, 4,2% of the MCD's projected housing stock for 2020.

Landslides probability, the vulnerability, characterized considering its uncertainty, and the dwellings exposed value were integrated to quantify the probable economic losses associated with landslides in the MCD. The probable losses were spatially represented by maps for different return periods, and the total losses for each return period and the Average Annual Loss (AAL) were estimated. The estimated AAL was  $7,26 \times 10^6$  dollars. Finally, the construction of a pluvial drainage system was proposed as a cost-efficient action to reduce landslides risk. The evaluation of the pluvial drainage system efficiency with the economic indicator Net Present Value showed a value of  $2,6 \times 10^6$  dollars.

This work highlights the importance of carrying out specialized studies to inform an adequate land use occupation and to optimize invested resources, minimizing the damage associated with landslides.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Planteamientos generales

El conocimiento del riesgo asociado a los desastres naturales, es decir, de las pérdidas probables que pueden causar los desastres, es fundamental para promover políticas públicas orientadas a realizar inversiones proactivas para reducir o prevenir el riesgo (Wisner et al., 2004; Bonachea Pico, 2006; Llosa y Zodrow, 2011; Corominas et al., 2014). Un gran número de estudios coinciden en caracterizar estas inversiones proactivas como más eficientes que atender de forma reactiva los desastres cuando se producen (Multihazard Mitigation Council, 2005; Moench et al., 2007; World Bank/United Nations, 2010; Mechler, 2016).

Los datos de las pérdidas probables por desastre, expresados en forma de métricas como la curva de excedencia de pérdidas, la Pérdida Máxima Esperada (PME) o la Pérdida Anual Esperada (PAE), son la base para la definición de una política de gestión del riesgo de desastres basada en el análisis costo beneficio de las posibles medidas, incluyendo inversiones en reducción del riesgo, prevención del riesgo, preparación para la emergencia, fondos de emergencia y aseguramiento (Michel-Kerjan et al., 2013; Yamin et al., 2013).

El Municipio del Distrito Central (abreviado MDC), popularmente conocido como Tegucigalpa, es la capital de Honduras (Figura 1). El MDC es el municipio que presenta más registros de movimientos de ladera a nivel de Honduras: 36% del total de registros, según la base de datos “desinventar” ([www.desinventar.org](http://www.desinventar.org)). En el periodo de 1966-2016 esta base de datos registra para el MDC 55 fallecidos, 13.644 afectados y 875 viviendas destruidas por efecto de los movimientos de ladera.

Aunque el MDC dispone de diversos estudios para caracterizar la problemática de los movimientos de ladera se considera que se requiere una revisión crítica de la información disponible para asegurar que se pueda emplear como base para una toma de decisiones adecuada. Así, en relación a los inventarios de movimientos de ladera, existen 4 inventarios (Lotti, 1986; Harp et al., 2002a; JICA, 2002a; UPI-JICA, 2014) que identifican un número significativo de movimientos de ladera, algunos de los cuales se encuentran en áreas densamente urbanizadas. Sin embargo, se desconoce su probabilidad de ocurrencia real, ni las pérdidas económicas asociadas.

Varios movimientos de pequeño tamaño situados en zonas urbanas (como el movimiento de la colonia La Obrera, con un área de 25.000 m<sup>2</sup> o el movimiento de la colonia La Guillen de 2.500 m<sup>2</sup>, por citar algunos) se han venido activando en años recientes (Figura 1). El enfoque del municipio para atender estos movimientos de ladera ha sido reactivo, es decir se atienden los movimientos de ladera cuando se producen, y se adoptan soluciones paliativas (evacuaciones, obras de emergencia) pero no se le da seguimiento a la problemática. Por ello, finalmente son las familias afectadas las que se ven obligadas a responder al impacto del desastre con sus limitados recursos (BID, 2015).



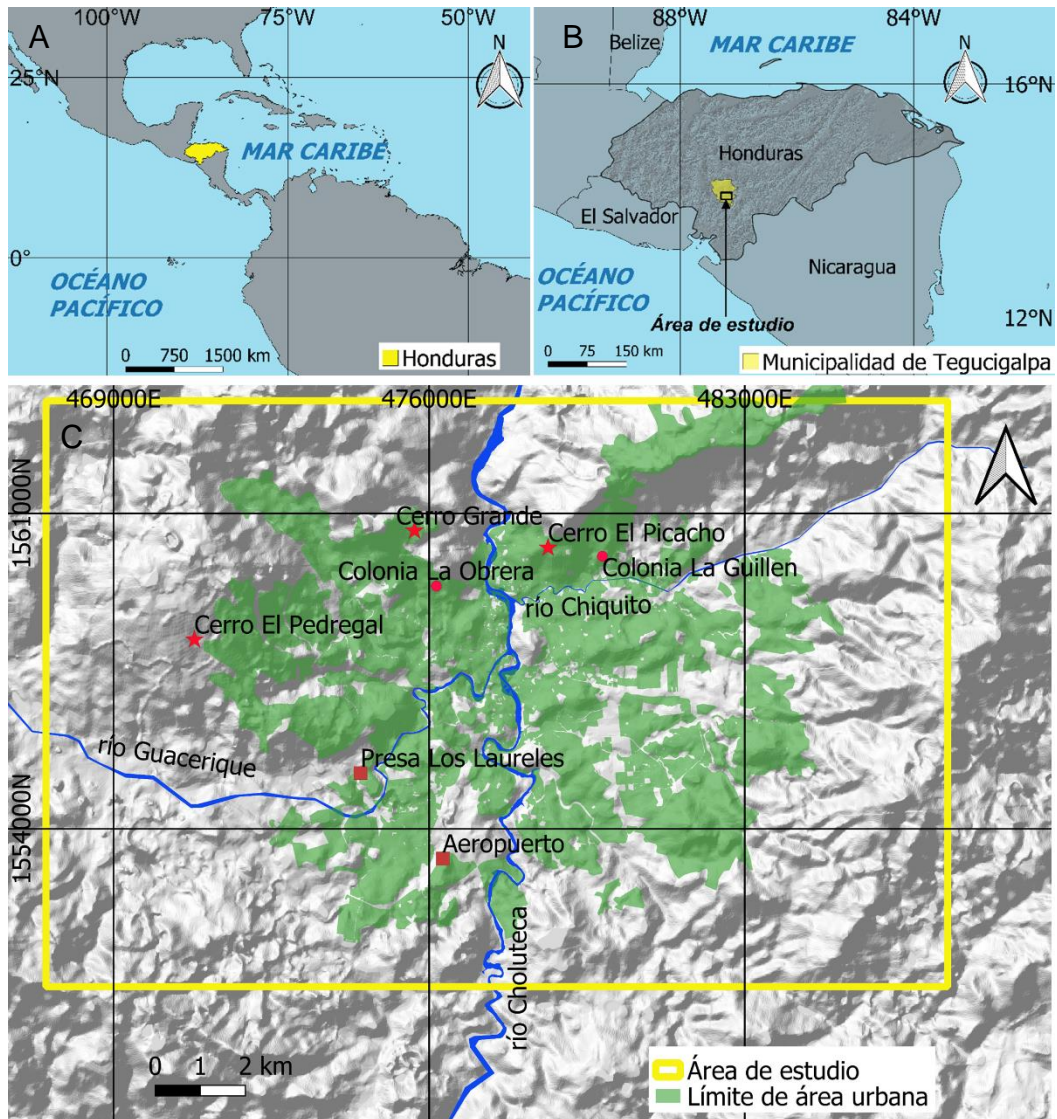


Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: elaboración propia a partir del mapa de Honduras (Instituto Nacional de Estadística-INE, 2001) y del mapa del área urbana de Tegucigalpa (BID, 2015).

Las diversas visitas de campo a los movimientos de ladera en zonas pobladas del MDC permitieron constatar un patrón que se repite, según el cual se activa el movimiento, se dañan las viviendas, se producen algunas evacuaciones temporales, el problema queda en el olvido y nuevos pobladores ocupan el lugar del deslizamiento, construyendo viviendas cada vez más precarias que puedan adaptarse al desplazamiento del terreno (con materiales ligeros como madera). Por otro lado, el drenaje pluvial, que es clave para reducir la activación de nuevos movimientos, tiene una cobertura de apenas el 20% y grandes vacíos institucionales en su administración (BID, 2015).

Existen algunos estudios previos que recogen propuestas de modelos de susceptibilidad ante movimientos de ladera para la zona de estudio (BID, 2015). Sin embargo, en general, estos modelos presentan baja resolución para la toma de decisiones ya que clasifican como media y alta susceptibilidad un 80% de la mancha urbana actual del MDC (Figura 1).

Como apoyo a la toma de decisiones para reducir el riesgo de movimientos de ladera se requiere de información adicional a los análisis de susceptibilidad, que representan una primera aproximación cartográfico-estadística para caracterizar la probabilidad espacial de que se produzcan movimientos de ladera (Brabb, 1985; Ayala Carcedo y Corominas, 2002).

Por otro lado, la aplicación de modelos deterministas de estabilidad de talud, que permitirían determinar con alta precisión la probabilidad de activación de los deslizamientos, requiere de importantes inversiones para generar información geotécnica (Ayala Carcedo y Corominas, 2002). Actualmente, la Alcaldía del Municipio del Distrito Central (AMDC) no dispone de los recursos necesarios para generar dicha información. Adicionalmente, la normativa de la AMDC no exige la realización de estudios geotécnicos o de estabilidad de laderas para la aprobación de los permisos de construcción (BID, 2015) y es poco probable que sean requeridos en el corto plazo, dada la impopularidad que tendría dicho requisito para las familias y los inversores y la escasez de profesionales calificados en el país para realizar este tipo de estudios.

En este contexto de limitaciones, tanto de recursos económicos y humanos, como de información, la aplicación de modelos probabilísticos basados en el método del talud infinito es una opción promisoriosa para definir la probabilidad de activación de los movimientos de ladera (Hammond, 1992; Haneberg, 2004; Mora, 2006). Dichos modelos permiten estimar la probabilidad de rotura del terreno, mediante la realización de un gran número de cálculos de factor de seguridad por pixel, introduciendo las variables del modelo en forma de funciones de distribución de probabilidad, con el fin de cuantificar de forma probabilística la incertidumbre y variabilidad asociadas con el factor de seguridad estimado (Hammond, 1992; Haneberg, 2004; Mora, 2006).

Por otra parte, para poder priorizar las inversiones, además de conocer la probabilidad de ocurrencia de los movimientos de ladera, es necesario determinar las pérdidas económicas asociadas. Para ello, se plantea combinar la información sobre la frecuencia y severidad de los eventos de inestabilidad, con el valor de los bienes expuestos y su vulnerabilidad (Michel-Kerjan et al., 2013; Yamin et al., 2013) para poder llegar a establecer modelos probabilísticos de riesgo que permitan cuantificar las pérdidas probables.

En los últimos años ha habido un avance importante en el análisis de riesgo de desastres para las amenazas de huracanes, sismos e inundaciones, basados en modelos probabilistas promovidos inicialmente por las aseguradoras y, posteriormente, por los bancos de desarrollo (Michel-Kerjan et al., 2013). Sin embargo, el análisis de riesgo provocado por movimientos de ladera ha sido mucho más reducido y los modelos existentes presentan limitaciones para integrar todos los componentes de la estimación probabilística del riesgo, es decir, la amenaza, la vulnerabilidad y el análisis del valor expuesto. De hecho, el desarrollo de las funciones de vulnerabilidad para movimientos de ladera, un insumo clave para transformar los valores de peligrosidad en estimaciones de pérdida probable, es aún muy limitado (Van Westen et al., 2006; Galli y Guzzetti, 2007; Papathoma-Köhle et al., 2011; Corominas et al., 2014).

La carencia de modelos que permitan el análisis probabilístico de las pérdidas causadas por los movimientos de ladera a partir de información base reducida, limita la priorización de acciones proactivas de reducción del riesgo (Papathoma-Köhle et al., 2011; Corominas et al., 2014). Esto es especialmente crítico en algunas de las principales ciudades de América Latina y el Caribe, que cuentan con presupuestos limitados para realizar estudios y donde una parte importante de los suelos disponibles para la urbanización están en zonas de pendiente media-alta, como es el caso de Cuenca en Ecuador, Montego Bay en Jamaica, Ciudad de Guatemala en Guatemala o La Paz en Bolivia, por mencionar algunas.

Teniendo en cuenta la relevancia de esta problemática para Tegucigalpa, el presente proyecto de investigación se orienta a ampliar el conocimiento del riesgo de desastre asociado a los movimientos de ladera en el MDC, con el fin de promover políticas más eficaces para gestionarlo. El área de estudio seleccionada abarca 260 km<sup>2</sup> donde se concentran la mayor parte de los movimientos de ladera históricos del MDC.

Junto con la estimación de pérdidas probables por movimientos de ladera en un municipio afectado por esta problemática, el proyecto de investigación desarrolla un modelo conceptual

de análisis probabilístico del riesgo de movimientos de ladera, caracterizando estadísticamente las principales variables que determinan los movimientos de ladera. Para ello, se generan funciones de daño a partir de datos empíricos obtenidos en Tegucigalpa y se desarrolla una aplicación piloto de modelaje probabilístico de riesgo de movimientos de ladera, contribuyendo al avance general en el conocimiento de la temática de aplicación de estos modelos para caracterizar la problemática de los movimientos de ladera.

## **1.2 Estado del arte sobre cuantificación de riesgo de desastres**

### **1.2.1 Conceptualización**

El término riesgo se aplica en diversos contextos, hablándose de riesgo económico, político, social, financiero, etc. En el campo del riesgo natural, diversos estudios coinciden en identificar que la cuantificación del riesgo de desastres naturales es la base para poder orientar la toma de decisiones para su reducción. En ese contexto el marco conceptual en que se basa el presente proyecto de investigación se enfoca en el análisis cuantitativo del riesgo de desastres naturales (Wisner et al., 2004; Llosa y Zodrow, 2011; Corominas et al., 2014).

El análisis cuantitativo del riesgo de desastres naturales se basa en la identificación de los eventos (amenazas) que pueden suceder, la estimación de la probabilidad de que sucedan y el establecimiento de sus consecuencias (Kaplan y Garrick, 1981; National Research Council, 1989; Grossi et al., 2005; Van Westen et al., 2006; Bedford y Cooke, 2009a; Yamin et al., 2013; Corominas et al., 2014). Matemáticamente el riesgo se puede definir como un conjunto de escenarios, cada uno con una probabilidad  $p_i$  y una consecuencia  $x_i$ . Si los escenarios se ordenan de mayor a menor severidad o intensidad se obtiene la curva de riesgo, una de las representaciones matemáticas fundamentales del riesgo (Figura 2) (Kaplan y Garrick, 1981; National Research Council, 1989; Grossi et al., 2005; Bedford y Cooke, 2009a; Yamin et al., 2013).

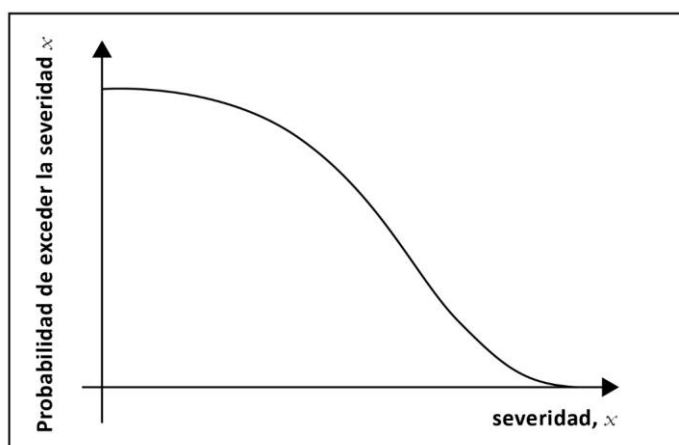


Figura 2. Curva de riesgo. Adaptado de Bedford y Cooke (2009a).

La certidumbre es el resultado científico de la observación (Kaplan y Garrick, 1981; Bedford y Cooke, 2009b). La incertidumbre se define en términos negativos como lo contrario a la certidumbre, identificándose con frecuencia en la literatura dos tipos fundamentales: aleatoria y epistemológica (Bedford y Cooke, 2009b). La incertidumbre aleatoria es resultado de la variabilidad natural del sistema que se analiza. La incertidumbre epistemológica es el resultado de nuestro desconocimiento del sistema. Mientras la incertidumbre aleatoria puede ser cuantificada mediante medidas, estimaciones estadísticas, así como a través de la opinión de expertos, la incertidumbre epistemológica, en principio puede ser caracterizada por expertos, pero no medida (Bedford y Cooke, 2009b).

Naciones Unidas (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, 2009) define la gestión del riesgo de desastres como el “conjunto de decisiones administrativas, de organización y conocimientos operacionales desarrollados por sociedades y comunidades para implementar políticas, estrategias y fortalecer sus capacidades a fin de reducir el impacto de amenazas naturales y de desastres ambientales consecuentes”.

Una gestión del riesgo de desastres apropiada requiere de la estimación cuantitativa en el área de interés, es decir la cuantificación de las pérdidas de vidas, personas heridas, daños a la propiedad y interrupciones de la actividad económica debidas a una amenaza en un área dada y un periodo de referencia (Van Westen et al., 2006; Yamin et al., 2013).

Una de las expresiones matemáticas más aceptadas para representar este concepto de manera cuantitativa es la siguiente (Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014):

$$riesgo = \sum (A \sum (VE))$$

*Ecuación 1*

Donde:

*A* es la amenaza o peligrosidad, expresada como la probabilidad de ocurrencia de un valor determinado de intensidad de la amenaza dentro de un periodo de referencia. Por ejemplo, en el caso de sismos puede ser un valor de aceleración, en el caso de inundaciones un valor de altura del nivel de agua, en el caso de movimientos de ladera una velocidad de desplazamiento, etc. Este concepto se puede expresar como función de dos probabilidades: una propiedad temporal vinculada a factores disparadores de la amenaza (lluvia, sismos, etc.) y una probabilidad espacial vinculada a las características físicas estáticas del territorio analizado (Van Westen et al., 2006; Crozier y Glade, 2005a; Corominas et al., 2014), distinción que es particularmente útil en el caso del análisis de la amenaza de movimientos de ladera.

*V* es la vulnerabilidad física de un elemento particular en riesgo para una amenaza determinada. Se define como el grado de afección que puede generar la amenaza en los elementos expuestos (Yamin et al., 2014). En la mayor parte de los análisis de vulnerabilidad física, esta variable toma valores entre “0” (afección nula) a “1” (afección total) (Papathoma-Köhle et al., 2011).

*E* es el valor expuesto o costo del elemento particular sometido a riesgo (número de personas, costo de edificios, etc.). En el caso de infraestructuras, generalmente se usa el valor de reposición, que es el valor de un bien similar en el caso de que éste sea totalmente destruido, aunque hay otros posibles valores a considerar como el valor intrínseco o el valor utilitario (Alexander, 2005). El caso del valor de la vida humana es singular, pues aunque se puede considerar intrínsecamente invaluable, sin embargo en la práctica se le asignan valores estadísticos (Viscusi y Aldy, 2003; Alexander, 2005).

Esta expresión matemática (Ecuación 1) integra dos componentes: el componente de estimación del comportamiento de la amenaza y el componente de estimación de las consecuencias (que agrupa la vulnerabilidad y la exposición). Un elemento que determina la forma en que se aplica esta fórmula es la escala, es decir, si se está analizando el riesgo para una infraestructura o bien singular en un sitio específico o para una unidad de estudio más grande (Crozier y Glade, 2005a; Van Westen et al., 2006).

Si el riesgo se analiza como una variable aleatoria continua éste se expresa en función de la tasa de excedencia de la pérdida de acuerdo con la siguiente ecuación (Cardona et al., 2011):

$$\text{riesgo} = \sum_{i=1}^{\text{eventos}} \text{Pr}(P > p | \text{Evento}_i) F_A(\text{Evento}_i)$$

*Ecuación 2*

Donde  $\text{Pr}(P > p | \text{Evento}_i)$  es la probabilidad de excedencia de la pérdida  $p$  dado un evento  $i$  y  $F_A(\text{Evento}_i)$  es la probabilidad anual de ocurrencia del evento  $i$ .

A continuación, se describen las bases conceptuales y retos para caracterizar los distintos elementos que componen la expresión matemática del riesgo de desastre a nivel territorial, de forma general y en el caso particular de la estimación del riesgo asociado a movimientos de ladera.

### 1.2.2 Parametrización de la amenaza y el riesgo

Cuando un evento  $A$ , en presencia de un conjunto de condiciones  $S$ , en ocasiones ocurre y en otras no ocurre, se considera que es un evento aleatorio con respecto al conjunto  $S$ . Esto refleja que existen procesos físicos que no han sido considerados dentro de las condiciones  $S$ , lo que se suple con una ley de probabilidades que establece con qué frecuencia se produce el evento  $A$ , dadas las condiciones  $S$  (Aparicio, 2009).

Cuando el número de valores  $x$  que puede tomar una variable aleatoria  $X$  es finito,  $X$  se define como una variable aleatoria discreta (ejemplo: tirar un dado). Cuando el número de valores  $x$  que puede adoptar una variable aleatoria  $X$  es infinito,  $X$  se define como una variable aleatoria continua.

La amenaza y el riesgo se comportan como variables aleatorias y continuas por tanto la probabilidad que tomen un valor exacto es nulo (Aparicio, 2009).

$$P(X = x) = 0$$

*Ecuación 3*

Donde  $P$  es la probabilidad,  $X$  una variable aleatoria y  $x$  un valor cualquiera de la variable.

Y por tanto sólo es posible hablar de probabilidades distintas de cero para intervalos finitos:

$$P(a \leq X \leq b) \neq 0, a < b, a > x_0, b < x_1$$

*Ecuación 4*

Donde  $x_0, x_1$  es el intervalo de definición de la variable aleatoria  $X$ .

De este modo, para realizar el análisis probabilista de la amenaza o la amenaza en lugar de analizar las probabilidades de ocurrencia, se analizan la probabilidad en promedio de que se supere un determinado valor de intensidad, si se trata de la amenaza, o de las pérdidas, si se trata del riesgo (Figura 3). Para ello se utiliza el periodo de retorno o su inversa, la tasa de excedencia anual (Grossi et al., 2005; Michel-Kerjan et al., 2013; Yamin et al., 2014).

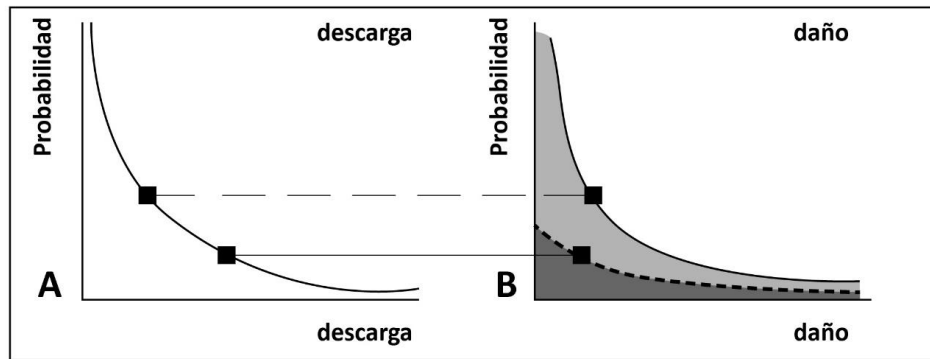


Figura 3. A. Curva probabilidad/intensidad. B. Curva de probabilidad/daño o pérdidas. La zona bajo la curva gris claro corresponde a las pérdidas sin realizar ninguna intervención; el área gris oscura representa como se modificaría la curva después de una acción de reducción del riesgo. Adaptado de Penning-Rowsell et al. (2005).

A partir de la estimación de las tasas de excedencia anuales de los valores de intensidad de la amenaza y el riesgo (expresado como pérdidas probables) se construyen las curvas de excedencia de la amenaza y el riesgo, estas últimas llamadas curvas de excedencia de pérdidas o curvas EP (Figura 4), que son insumos clave para la caracterización de la amenaza y el riesgo considerando que se trata de dos variables aleatorias y continuas. En las curvas de excedencia de la amenaza cada punto de la curva representa la probabilidad promedio de que la amenaza tome este valor de intensidad o superior. En el caso de las curvas de excedencia de pérdidas cada punto de la curva representa la probabilidad  $p$  de que un determinado nivel de pérdida agregada  $\$P$  sea excedido en un año determinado (Grossi et al., 2005; Michel-Kerjan et al., 2013; Yamin et al., 2014). La integral bajo la curva de excedencia de pérdidas es la esperanza matemática de la pérdida anual y se conoce como la pérdida anual esperada (PAE) (Grossi et al., 2005; Michel-Kerjan et al., 2013; Yamin et al., 2014). La Pérdida Máxima Esperada (PME) es un valor que se obtiene de la curva EP y se refiere a la pérdida asociada a un valor de probabilidad que se define como valor límite, por ejemplo, para la cobertura del aseguramiento.

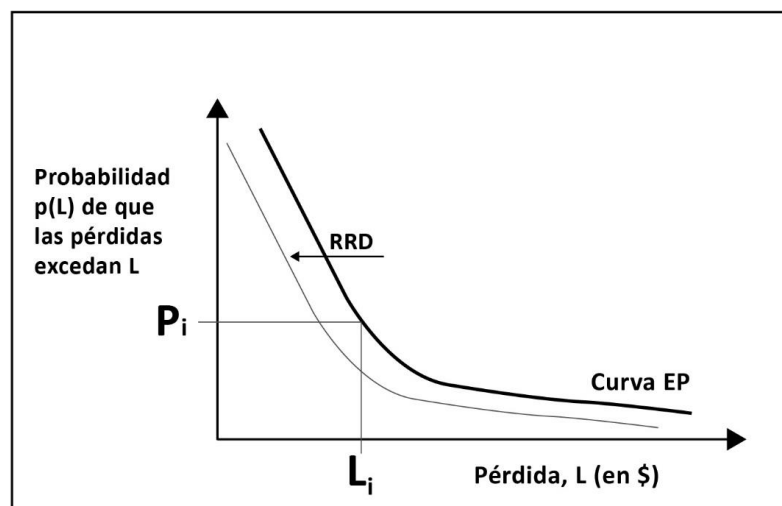


Figura 4. Curva de excedencia de pérdidas (Curva EP). RRD se refiere a acciones de Reducción del Riesgo de Desastres. Adaptado de Michel-Kerjan et al., 2013.

Estas parametrizaciones (la curva de excedencia de pérdidas, la pérdida anual esperada y la pérdida máxima esperada) constituyen la base para una planificación apropiada de los distintos procesos de la gestión del riesgo de desastres, es decir la reducción y prevención del riesgo, la preparación para la emergencia, los fondos de emergencia y el aseguramiento (Grossi et al., 2005; Van Westen et al., 2006; Cardona et al., 2008; Michel-Kerjan et al., 2013; Yamin et al., 2013). El hecho de representar la amenaza y el riesgo como variables continuas por medio de las curvas de excedencia de amenaza y riesgo, en lugar de analizar algunos escenarios puntuales,

es más apropiado conceptualmente ya que permite un análisis integral de la relación costo/eficiencia de las medidas para su gestión. Esto es así ya que, mientras algunas medidas, como medidas estructurales de reducción del riesgo de desastres, pueden ser costo/efectivas para eventos de alta frecuencia y bajo impacto, otras como los seguros pueden ser costo/efectivas para eventos de baja frecuencia y alto impacto (Mahdyiar y Porter, 2005; Van Westen et al., 2006; Cardona et al., 2008; Michel-Kerjan et al., 2013; Yamin et al., 2013). Por otro lado, los modelos probabilistas permiten reducir la incertidumbre asociada con la naturaleza aleatoria de los eventos naturales.

### *1.2.3 Modelos de análisis catastrófico del riesgo*

Los modelos de análisis para generar estas curvas de excedencia de la amenaza y el riesgo a escala territorial se denominan modelos de análisis catastrófico del riesgo (Grossi et al., 2005; Michel-Kerjan et al., 2013). Dichos modelos contemplan 4 módulos: el módulo de amenaza, el módulo de exposición, el módulo de vulnerabilidad y el módulo de estimación de pérdidas (Cardona et al., 2008; FEMA, 2011a, 2011b; Michel-Kerjan et al., 2013; Yamin et al., 2013). El módulo de amenaza se basa en el análisis de la probabilidad y de la intensidad de los eventos en cada punto de la región de estudio, es decir en la construcción de una curva de excedencia de la amenaza en cada punto de análisis. El modelo de exposición determina el valor económico de los bienes expuestos a la amenaza. El módulo de vulnerabilidad analiza cómo se comportarán los bienes expuestos bajo los escenarios generados en el modelo de amenaza. Combinando la información de la frecuencia e intensidad de los eventos, los bienes expuestos y su vulnerabilidad, el módulo de pérdidas estima las pérdidas probables en forma de curvas de excedencia agregadas para toda la región de análisis.

El módulo de amenaza debe estimar dos elementos principales que son la probabilidad de que se produzca un fenómeno que origina el desastre y su intensidad en cada punto de la región de análisis (Mahdyiar y Porter, 2005). Por ejemplo, en el caso de sismos se debe estimar la probabilidad de ocurrencia de un sismo de una determinada magnitud con un determinado epicentro, pero además estimar la intensidad del sismo en cada punto de la región de análisis por medio de funciones de atenuación y estimaciones del efecto de sitio (Mahdyiar y Porter, 2005; FEMA, 2011a). En el caso de huracanes se estima la probabilidad de que un huracán de una determinada magnitud impacte la región de análisis, debiendo estimarse adicionalmente la fuerza del viento en cada punto de la región, la cual es función de parámetros como la altura y rugosidad del terreno (Mahdyiar y Porter, 2005). En el caso de las inundaciones se debe estimar la probabilidad de que se exceda un determinado caudal, pero además estimar la intensidad (altura de inundación y/o velocidad) en cada punto de la región de análisis (FEMA, 2011b).

#### *1.2.3.1 Modelo totalmente probabilista versus probabilista simplificado*

Dentro de la modelación de la amenaza y el riesgo para construir las curvas de excedencia de pérdidas existen dos aproximaciones principales: la totalmente probabilista y la probabilista simplificada (Barandiarán et al., 2019). La aproximación totalmente probabilista se ha empleado principalmente para el análisis de las amenazas extensivas, que se manifiestan de forma simultánea en territorios amplios a escala regional (como los sismos y los vientos huracanados), y donde resulta más relevante caracterizar de forma agregada las pérdidas a escala regional e identificar los valores máximos de pérdidas posibles (Grossi et al., 2005) y no tanto precisar cuál será la intensidad que se alcanzará en un sitio específico. Dichos modelos totalmente probabilistas se basan en la generación de un número elevado (miles) de escenarios estocásticos de la amenaza aplicando números aleatorios, por medio de interacciones como la de Montecarlo. Estos escenarios estocásticos son combinados con los valores de vulnerabilidad (analizada también como una variable aleatoria) y exposición para cada sitio específico. La agregación de los valores de pérdida para cada sitio y escenario específico permiten obtener valores de

perdidas esperadas para la región de análisis con su probabilidad asociada, con lo que se construye la curva de excedencia de pérdidas (Cardona et al., 2008, 2011).

La aproximación probabilista simplificada para construir las curvas de excedencia de pérdidas se ha empleado principalmente para amenazas cuya intensidad tiene mucha variabilidad espacial, como las inundaciones. Varios de los modelos existentes para inundaciones estiman un número limitado de escenarios de la amenaza, con dichos escenarios se construye el mismo número de escenarios de excedencia de pérdidas y se realiza una extrapolación de la curva de excedencia de pérdidas. Por ejemplo, el módulo de inundaciones de HAZUS (Hazard United States) (FEMA, 2011b) calcula inundaciones para 5 periodos de retorno (10, 25, 50, 100, 500). Mediante la extrapolación de estos 5 valores de pérdidas, HAZUS construye la curva de excedencia de pérdidas y calcula la Pérdida Anual Esperada. De igual forma, el Manual de técnicas de análisis para inundaciones (Penning-Rowell et al., 2005) para construir la curva de excedencia de pérdidas de inundaciones recomienda modelar al menos 5 periodos de retorno (5, 10, 25, 75 y 100 años).

El uso de un número limitado de escenarios responde a la búsqueda de un balance entre las capacidades de computación y la precisión marginal (FEMA, 2011a), por ejemplo, en el caso de inundaciones los software de cálculo en 2 dimensiones, que utilizan modelos del terreno de alta precisión, requieren elevadas capacidades de computación. Adicionalmente en el análisis de inundaciones con fines de planificación territorial se requiere poder modelar con alta precisión escenarios individuales, pues de éstos se desprenden regulaciones de uso del suelo. Por ejemplo, la normativa europea (Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007) y española (artículo 9, Real Decreto 9/2008, de 11 de enero) sobre gestión del riesgo de inundaciones establece restricciones para la construcción de infraestructuras dentro de la llanura de inundación con 100 años de periodo de retorno ([https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2008-755](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2008-755)). Por tanto, para el análisis de la amenaza de inundación con fines de planificación territorial, no sólo es importante el análisis de las pérdidas agregadas a nivel regional, como sucede en los modelos de análisis de riesgo catastrófico con fines de diseño de mecanismos de transferencia del riesgo (Grossi et al., 2005), sino que también es muy relevante la modelación con precisión de ciertos periodos de retorno.

Un caso intermedio es realizar un análisis de escenarios estocásticos de la amenaza, pero tomando únicamente algunos de ellos para la estimación del riesgo extrapolando la curva de excedencia de pérdidas, como sucede en el modelo de riesgo sísmico de HAZUS (FEMA, 2011a). En dicho modelo, a partir de los escenarios probabilísticos de sismo, se emplean únicamente 8 escenarios de pérdidas para estimar la curva de excedencia de pérdidas y la pérdida anual esperada. Para seleccionar los 8 valores de pérdidas, se realizó un análisis de eficiencia versus precisión marginal, lo que permitió establecer que la diferencia en términos de estimación entre utilizar 20 u 8 escenarios de pérdidas de la PAE, era despreciable (FEMA, 2011a).

En todo caso, aunque varios autores coinciden en afirmar que una aproximación totalmente probabilista del análisis de las pérdidas por desastre es el más apropiado para abordar las fuentes de incertidumbre aleatoria que caracterizan los fenómenos naturales (Mahdyiar y Porter, 2005; Michel-Kerjan et al., 2013), también reconocen que este tipo de abordajes presentan alta complejidad técnica (Mahdyiar y Porter, 2005).

En el caso de los movimientos de ladera existen metodologías desarrolladas para el análisis del riesgo de desastres de forma determinista a nivel de sitio, basadas en disciplinas como la geotecnia o la mecánica de suelos, que se fundamentan en la estimación del factor de seguridad y donde sólo se estima un escenario, sin considerar la probabilidad asociada. Las metodologías para el análisis de riesgo a nivel regional (a escalas de planificación territorial entre 1:10.000 a 1:50.000) aún presentan un nivel de desarrollo incipiente, comparado con otras amenazas como sismos, inundaciones o vientos huracanados, debido a las características inherentes de la



amenaza de movimientos de ladera (Crozier y Glade, 2005a; Bonachea Pico, 2006; Guzzetti et al., 2006; Van Westen et al., 2006; Papathoma-Köhle et al., 2011; Corominas et al., 2014). Algunos aspectos técnicos que son requeridos para aplicar un modelo de análisis catastrófico del riesgo, aún no han sido completamente resueltos para los movimientos de ladera, como la modelización probabilista de la amenaza y las funciones de daño (Van Westen et al., 2006; Papathoma-Köhle et al., 2011; Corominas et al., 2014).

#### *1.2.4 Caracterización de la vulnerabilidad*

La vulnerabilidad es uno de los componentes principales del riesgo (Ecuación 1). El concepto de vulnerabilidad es empleado por gran número de disciplinas, existiendo dos enfoques principales (Fuchs et al., 2012), (i) un enfoque social de la vulnerabilidad, donde ésta es caracterizada por factores que condicionan la resiliencia de la población ante los desastres, y (ii) un enfoque técnico científico, donde la vulnerabilidad es una cuantificación de la respuesta de un elemento ante una determinada intensidad. En la presente tesis, dado que se plantea un abordaje cuantitativo del riesgo de desastres, se plantea un enfoque técnico científico, basado en la caracterización de la vulnerabilidad por medio de funciones de fragilidad, daño o vulnerabilidad.

##### *1.2.4.1 Funciones de fragilidad, daño y vulnerabilidad*

Las funciones de fragilidad y daño/vulnerabilidad son un insumo clave para relacionar la intensidad de las amenazas con los daños probables de las estructuras, es decir para caracterizar la vulnerabilidad física en términos cuantitativos (Grossi et al., 2005; FEMA, 2011a; Michel-Kerjan et al., 2013; Yamin et al., 2014). Idealmente, para conocer el daño de una estructura ante una determinada demanda generada por una amenaza natural se requeriría de una evaluación de la respuesta de dicha estructura por parte de un ingeniero estructural (National Research Council, 1989; Grossi et al., 2005). Sin embargo, esto sería inviable si lo que queremos es evaluar la posible respuesta de un grupo de edificios o bienes en una ciudad ante un número muy grande de posibles parámetros de intensidad asociados a las amenazas naturales. Con el fin de facilitar este tipo de análisis de daños de grupos de estructuras ante la intensidad de la amenaza se desarrollaron las funciones de daño/vulnerabilidad y fragilidad (National Research Council, 1989; Grossi et al., 2005).

Estas funciones se estiman con base en datos empíricos de evaluaciones de desastres, criterio experto, una combinación de criterio experto y datos empíricos (National Institute of Building Sciences, 1993) o aplicando modelos físicos (Shinozuka et al., 2000; Fotopoulou y Pitilakis, 2013; Mavrouli et al., 2014; Yamin et al., 2014).

El uso de estas funciones para analizar las relaciones entre la intensidad y el daño a las infraestructuras a escala territorial es una simplificación que lleva asociada diversas fuentes de incertidumbre (FEMA, 2011a): i) la incertidumbre en el límite entre cada estado de daño; ii) la variabilidad en la respuesta de cada modelo de edificio y iii) la incertidumbre debida a la variabilidad del parámetro de intensidad de la amenaza.

Los tipos de funciones más comunes son las funciones de fragilidad y las funciones de daño/vulnerabilidad. Las funciones de fragilidad analizan la respuesta de las infraestructuras a partir de la definición de diversos estados posibles de daño, es decir se genera un grupo de curvas para analizar la respuesta de una infraestructura singular (National Institute of Building Sciences, 1993; FEMA, 2011a, 2011b). Por otro lado, las funciones de daño/vulnerabilidad (Yamin et al., 2014) recogen el valor medio de la pérdida, expresada como la Razón Media del Daño (RMD), que es la relación entre el valor de reposición con relación al valor de reemplazo total de la infraestructura, para un determinado parámetro de intensidad de la amenaza, es decir para representar la respuesta de la infraestructura, se genera una curva única con el valor medio

del daño para diversos valores de intensidad (o dos curvas si se representa gráficamente la varianza).

Las curvas de fragilidad fueron desarrolladas originalmente en los años ochenta en la evaluación probabilista de riesgo de plantas nucleares y facilidades de almacenamiento de residuos peligrosos para estimar la incertidumbre relacionada con la respuesta de grupos de estructuras ante las demandas generada por los peligros naturales (Kennedy y Ravindra, 1984; Grossi et al., 2005). Las curvas de fragilidad relacionan la probabilidad acumulada de alcanzar o exceder un determinado estado de daño de un edificio dado un determinado parámetro de intensidad de la amenaza (por ejemplo, el desplazamiento espectral en el caso de sismos) (Kennedy y Ravindra, 1984; National Research Council, 1989; Grossi et al., 2005; FEMA, 2011a). Los estados de daño son, generalmente: débil, moderado, extensivo y completo. Para construir las curvas se generan o recopilan un conjunto de resultados de respuesta de la estructura considerada, ya sea de forma empírica, con criterio experto o mediante modelaciones, y, a partir de estos datos, se obtienen los parámetros de la media y desviación típica para cada estado de daño (National Research Council, 1989). Con estos parámetros se construyen las curvas de fragilidad, ajustando los valores a una función de probabilidad acumulada, generalmente la función log-normal, aplicando la Ecuación 5 (FEMA, 2011a, 2011b; Mavrouli et al., 2014; Yamin et al., 2014). La Tabla 1 muestra un ejemplo de valores discretos obtenidos, la media y la desviación típica y en la Figura 5 se muestra un ejemplo de las curvas.

Tabla 1. Matriz de estado de daño adaptada de National Research Council (1989) y estimación de la media ( $M$ ) y desviación típica ( $DT$ ) para cada intensidad ( $VI$  a  $X$ ) basada en Yamin et al. (2014).

DAÑO	Frecuencia del daño en porcentaje por IMM y estado de daño							
	RD (%)	FC (%)	fi VI	fi VII	fi VIII	fi IV	fi X	
Débil	0	10	5	1.5	8	16	24	30
Moderado	10	30	20	0.4	2	8	16	26
Extensivo	30	60	45	0.1	1.5	3	10	18
Completo	60	100	80	0	1	2	4	10
			$M (Xi*fi)$	<b>10</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>22</b>	<b>27</b>
			$DT$	<b>10</b>	<b>22</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>24</b>

IMM: intensidad modificada de Mercalli, RD: Rango del estado de daño, FC: Factor central del daño, fi: Frecuencia.

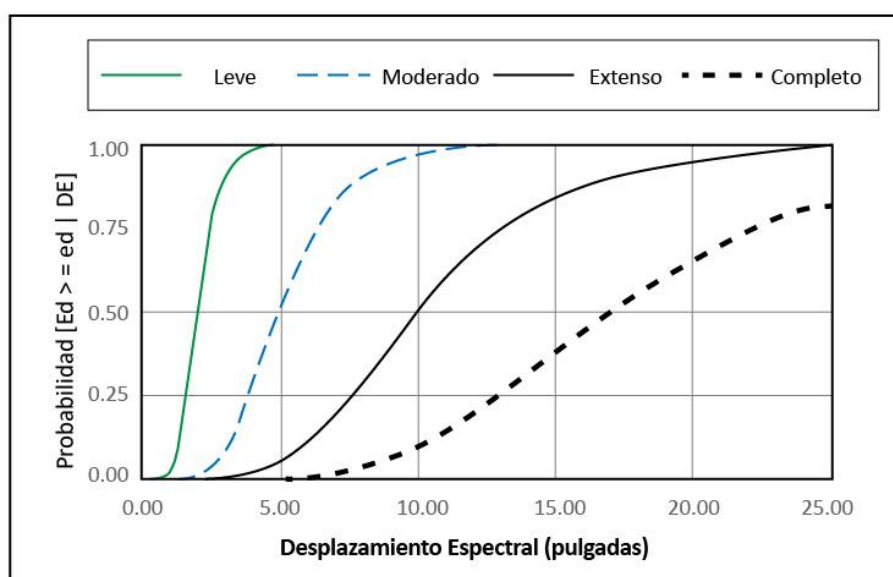


Figura 5. Funciones de fragilidad. Adaptado de FEMA (2011a). En ordenadas se refleja la probabilidad de que se alcance o supere un estado de daño ( $E_d$ ) dada una determinado Desplazamiento Espectral ( $DE$ ).

La probabilidad condicional de estar o superar un determinado estado de daño se define como (FEMA, 2011a; Mavrouli et al., 2014; Yamin et al., 2014):

$$P[ed|De] = \phi \left[ \frac{1}{Bds} \ln \left( \frac{Sd}{\overline{De, ed}} \right) \right]$$

Ecuación 5

Donde:

*ed* es un estado de daño determinado.

*De* es la intensidad del sismo expresada como desplazamiento espectral.

*De, ed* es el valor medio del desplazamiento espectral en el que un edificio alcanza el límite de un determinado estado de daño *ed*.

$\phi$  es la función de distribución normal standard acumulada.

*Bds* es la desviación típica del logaritmo natural para el desplazamiento espectral para un estado de daño *ed*.

El valor medio de *Sd* corresponde al límite de cada estado, y es aquel valor de intensidad con un 50% de probabilidad de exceder el límite de cada estado, mientras la desviación típica *Bds* describe la variabilidad asociada con cada curva de fragilidad (Mavrouli et al., 2014).

Las funciones de daño/vulnerabilidad fueron desarrolladas originalmente por la empresa Oficina de Servicios de Aseguramiento (ISO por sus siglas en inglés<sup>1</sup>) para la industria aseguradora, específicamente para caracterizar el riesgo sísmico en el Estado de California (Algermissen, 1972). Originalmente se basaban en datos empíricos de desastres y criterio experto, expresado en forma de matrices que relacionaban de forma determinista los valores de intensidad con posibles valores de daño expresado por medio de la RMD (National Institute of Building Sciences, 1993). Otro de los estudios precursores de este tipo de matrices fue el reporte “*Applied Technology Council report of Earthquake Damage Evaluation Data for California*” (National Institute of Building Sciences, 1993), donde se establecieron relaciones entre la intensidad del sismo medida por la escala de Mercalli con el porcentaje de daño con base en consultas a un grupo de 78 ingenieros estructurales aplicando el método Delphi.

Recientemente se ha generalizado la aplicación de funciones de daño/vulnerabilidad, que consideran el daño, definido por la RMD, como una variable aleatoria continua caracterizada por la expresión (Cardona et al., 2011; Yamin et al., 2014):

$$\Pr(D \geq d/I) = \int_l^{\infty} Pd/i(D)dD$$

Ecuación 6

---

<sup>1</sup> Insurance Services Office, Inc. (ISO), se formó en 1971 como una organización de asesoramiento y calificación para el sector de seguros de bienes y accidentes para proporcionar servicios estadísticos y actuariales, desarrollar programas de seguros y ayudar a las compañías de seguros a cumplir con los requisitos reglamentarios estatales.

Donde  $d$  es el valor de del daño en el dominio de la variable aleatoria  $D$  (caracterizada como el valor de la RMD),  $I$  el valor de la intensidad de la amenaza,  $Pd/i(D)$  es la distribución de probabilidad del daño, generalmente asumida como una distribución Beta o log-normal.

Este tipo de funciones caracteriza la RMD por medio de la media y varianza para cada valor de intensidad de la amenaza, en una forma que resulta más sencilla para realizar análisis probabilistas del riesgo (Figura 6) (Yamin et al., 2014).

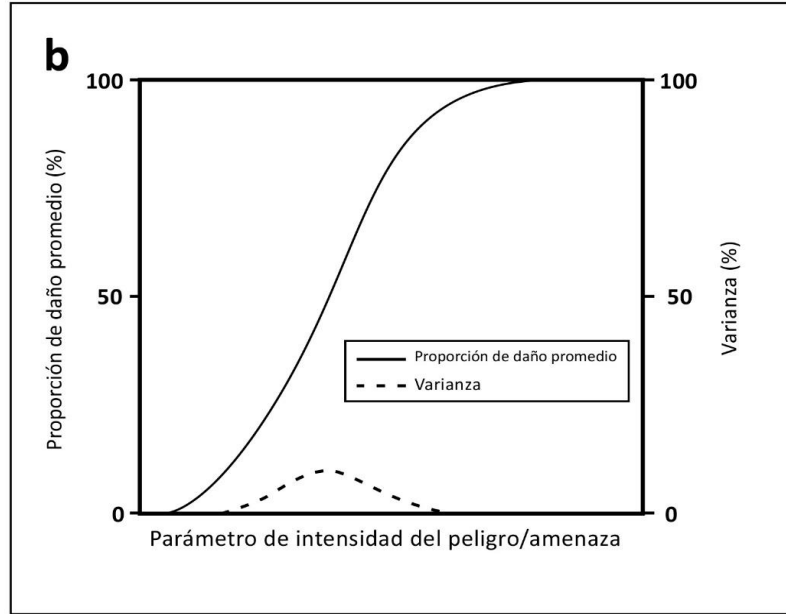


Figura 6. Funciones de vulnerabilidad, adaptado de Yamin et al. (2014).

Aunque las funciones de daño/vulnerabilidad se pueden obtener de forma independiente, también pueden estimarse a partir de las funciones de fragilidad (National Institute of Building Sciences, 1993; Yamin et al., 2014). Para esto se asocia a cada estado de daño un valor de la RMD y se obtiene la media y desviación típica de las frecuencias de los estados de daño y sus RMD asociados para cada valor de intensidad considerando (Yamin et al., 2014). Una vez se obtienen un número de puntos de la curva de vulnerabilidad, esta se completa ajustándola a una función de probabilidad Beta (Cardona et al., 2011; Yamin et al., 2014). Las expresiones para obtener las funciones de daño/vulnerabilidad a partir de las funciones de fragilidad son las siguientes (Cardona et al., 2011; Yamin et al., 2014):

$$\bar{X}(D/I) = \sum_{i=0}^N DiPr(Ed = ed_i/I)$$

Ecuación 7

$$\sigma^2 (D/I) = \sum_{i=0}^N (Di - \bar{X}(D/I))^2 Pr (Ed = ed_i/I)$$

Ecuación 8

Donde  $\bar{X}(D/I)$  es la media del daño y  $\sigma^2 (D/I)$  es la desviación típica del daño dada una intensidad de la amenaza  $I$ ,  $Di$  son los distintos valores que puede tomar la variable daño,  $Pr (Ed=ed_i/I)$  es la probabilidad discreta de alcanzar un estado de daño  $ed_i$  dada una intensidad de la amenaza  $I$ .

Las funciones de vulnerabilidad han sido desarrolladas particularmente como parte de paquetes de modelos de cálculo del riesgo catastrófico como CAPRA ([www.capra.org](http://www.capra.org)) y HAZUS (<https://www.fema.gov/hazus>).

#### 1.2.4.2 Aplicación determinista y probabilista de las funciones de daño y fragilidad

Una vez se obtienen las funciones de fragilidad y daño/vulnerabilidad, estas pueden aplicarse de forma determinista o aplicando métodos para reducir la incertidumbre (Zhang y Ng, 2006).

De forma determinista se pueden utilizar los valores promedio de daño, ya sea a partir de las funciones de fragilidad o daño/vulnerabilidad, para caracterizar la respuesta de una estructura ante un valor de intensidad (Zhang y Ng, 2006).

Aplicando métodos para reducir la incertidumbre. Los valores de relaciones intensidad/daño obtenidas a partir de datos empíricos presentan alta variabilidad (Zhang y Ng, 2006; Fuchs et al., 2007; Akbas et al., 2009), mostrando mayores dispersiones que los valores obtenidos con estudios paramétricos (Negulescu y Foerster, 2010; Mavrouli et al., 2014;) lo que evidencia la incertidumbre asociada a las estimaciones de las funciones de daño/fragilidad/vulnerabilidad (Figura 7). Resulta fundamental por tanto considerar en la construcción de las funciones la aplicación de métodos para reducir la incertidumbre. Los métodos aplicados en la literatura incluyen (Uzielli et al., 2008): (i) la modelación probabilista de un gran número de valores de la curva de forma estocástica (Merz et al., 2004; Cardona et al., 2008, 2011; Mavrouli et al., 2014; Yamin et al., 2014) o (ii) mediante el método FOSM (primero-orden-segundo-momento) (Hammond, 1992; Mora, 2006; Haneberg, 2007).

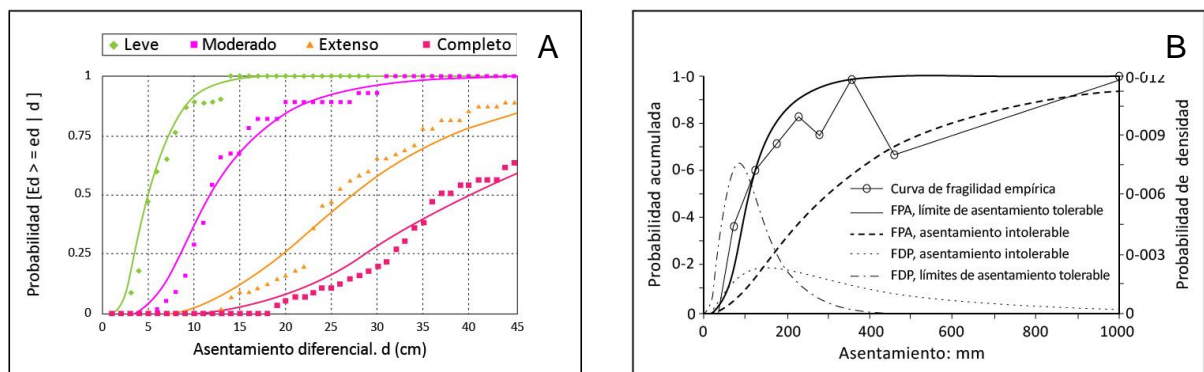


Figura 7. A. Funciones de fragilidad para edificaciones afectadas por asentamientos diferenciales atribuidos a deslizamientos obtenidas mediante modelos paramétricos (Menor LS1, Moderado LS2, Extensivo LS3 y Completo LS4). En ordenadas la probabilidad de que se alcance o supere un estado de daño ( $E_d$ ) dado un valor de asentamiento diferencial ( $d$ ) en cm (adaptado de Negulescu y Foerster (2010)). B. Funciones de fragilidad obtenidas para edificaciones mediante datos empíricos. FPA función de probabilidad acumulada, FDP, función de densidad de probabilidad (adaptado de Zhang y Ng (2006)).

La aplicación modelación probabilista contribuye a reducir la incertidumbre implícita en las propias funciones. En el caso de las funciones de fragilidad para cada valor de intensidad dado y considerando las probabilidades de que este valor de intensidad genere uno u otro estado de daño, se puede realizar un análisis probabilista generando un número de escenarios mediante el uso de números aleatorios para establecer cuál será la respuesta más probable de la estructura (Grossi y Windeler, 2005). De igual forma, en el caso de las curvas de vulnerabilidad se dispone de la RMD y varianza para cada valor de intensidad. Con base en estos dos valores se asume que la relación intensidad/daño para ese valor determinado de intensidad sigue una función de densidad de probabilidad, por ejemplo, una función normal, y se modela con la interacción de Montecarlo un numero de escenarios para establecer cuál es la respuesta más probable de la estructura (Yamin et al., 2014).

### **1.3 Análisis costo/beneficio de las medidas de reducción del riesgo**

El Análisis Costo/Beneficio (ACB) (Pearce, 1983) ha sido el método más aplicado para estimar el beneficio de las inversiones en reducción del riesgo de desastres (Mechler, 2005, 2016). Por ejemplo, en los Estados Unidos el ACB se ha venido aplicando para evaluar la eficiencia de medidas de reducción del riesgo desde los años cincuenta del siglo pasado (Mechler, 2016). Esta metodología consiste en monetizar los beneficios y costos de las medidas, de forma que puedan ser comparados por medio de una serie de indicadores de eficiencia. Algunas características del ACB son que compara la situación con y sin proyecto y que analiza los beneficios como sociedad y no para un grupo de individuos concreto (Mechler, 2005).

En términos generales, el ACB se basa en comparar los beneficios que genera un proyecto o inversión con relación a la situación sin proyecto. En el caso del ACB para inversiones de reducción del riesgo los beneficios son los impactos del desastre evitados en la situación con proyecto con relación a la situación sin proyecto, expresados en valores monetarios. Estos impactos pueden ser principalmente sociales, económicos y ambientales (Mechler, 2005, 2016).

Los impactos sociales pueden ser directos, lo que incluye principalmente las personas heridas o fallecidas, e indirectos como puede ser el incremento de los casos de depresión o enfermedades. Los impactos económicos incluyen: (i) los daños directos, que son las pérdidas de bienes o stock como consecuencia del impacto directo de los desastres, (ii) las pérdidas indirectas, que son las pérdidas en los flujos económicos como consecuencia de los daños directos y que pueden incluir el incremento en los precios por la reducción en la producción o la reducción en los salarios y (iii) el impacto macroeconómico, que es el impacto final que el desastre tiene sobre indicadores como el producto interno bruto, teniendo en cuenta la proyección del esfuerzo económico que se realizará en la rehabilitación y reconstrucción. Por otro lado, los impactos ambientales se refieren principalmente a los bienes y servicios ambientales que provee el medioambiente y otros beneficios intangibles que pueden perderse por efecto de los desastres.

Dado que en el ACB se comparan costos y beneficios que puedan ser monetizados, en el caso de la evaluación de medidas de reducción del riesgo de desastres, la mayor parte de los estudios se centra en cuantificar los beneficios asociados a los daños directos evitados (Mechler, 2016). En el caso de las pérdidas sociales estas no son generalmente cuantificadas en los ACB por las dificultades de naturaleza ética que tiene la cuantificación de una vida humana (Viscusi y Aldy, 2003; Mechler, 2005, 2016). También existen dificultades técnicas para cuantificar las pérdidas indirectas, los efectos macroeconómicos y las pérdidas ambientales.

#### **1.3.1 Indicadores de eficiencia empleados en el ACB**

La comparación de los costos y beneficios en el ACB se realiza estimando el valor presente de los flujos proyectados en la vida útil del proyecto. El concepto de valor presente considera cuál es la tasa de retorno promedio que una inversión tendría en el futuro, para analizar si la inversión considerada supera al menos esta tasa de retorno. En el caso de proyectos de inversión pública generalmente se considera una tasa de descuento social del 12% (Mechler, 2005). La fórmula para estimar el valor presente (VP) es la siguiente (Barandiarán et al., 2019):

$$VP = \frac{S}{(1+r)^t}$$

*Ecuación 9*

Donde  $S$  es el valor futuro,  $r$  es la tasa de descuento y  $t$  el año del periodo de análisis.

Los principales indicadores utilizados para comparar la eficiencia de la situación con y sin proyecto son el Valor Presente Neto (VPN), la relación costo/beneficio y la Tasa Interna de Retorno (TIR) (Mechler, 2005; Mechler, 2016; Barandiarán et al., 2019).

VAN: El Valor Actual Neto es la diferencia entre el Valor Presente de los Beneficios, menos el Valor Presente de los Costos, aplicando a ambos valores una tasa de descuento fija. Si el VAN es mayor de 1 se considera que el proyecto es viable. Cuanto mayor sea el valor del VAN mayor es la eficiencia del proyecto considerado.

La relación Costo/Beneficio es la ratio entre el Valor Presente de los Beneficios y el Valor Presente de los Costos. Si el valor obtenido es 1, los beneficios son iguales a los costos, si es menor de 1 los costos son mayores a los beneficios y si es superior a 1 los beneficios son mayores a los costos.

La TIR estima cual es la tasa de retorno de un proyecto considerado y lo compara con una tasa de retorno social de referencia (ej. 12%). Si la tasa del proyecto es superior a la tasa de referencia se considera viable.

### 1.3.2 Metodología para el ACB de medidas de reducción del riesgo

Los principales pasos para realizar el ACB de un proyecto de reducción de riesgo son los siguientes (Mechler, 2005; Mechler, 2016; Barandiarán et al., 2019):

Análisis del riesgo de desastre sin considerar las medidas de reducción del riesgo. Este análisis implica integrar el análisis de las amenazas, vulnerabilidad y exposición para una serie de escenarios temporales, ya sea con una metodología totalmente probabilista o probabilista simplificada (Barandiarán et al., 2019). Para la realización del ACB y la identificación de la situación sin proyecto, los valores de las pérdidas estimadas para los distintos escenarios se integran en la Pérdida Anual Esperada (PAE), generalmente por medio de la construcción de la curva de excedencia de pérdidas y la estimación del área bajo la curva (Figura 8).

Identificación de medidas de reducción del riesgo y sus costos. El segundo paso es identificar potenciales medidas de reducción del riesgo y sus costos asociados.

Análisis del riesgo evitado por las medidas de reducción del riesgo. En este paso se realiza una estimación del riesgo para la situación con proyecto, incluyendo las pérdidas evitadas como resultado de las medidas de reducción del riesgo. Las pérdidas evitadas se estiman como la PAE sin proyecto menos la PAE con proyecto. Gráficamente las pérdidas evitadas corresponden a la diferencia entre el área bajo la curva de excedencia de pérdidas, para la situación sin medidas de reducción del riesgo y, el área bajo la curva, con medidas de reducción (Figura 8).

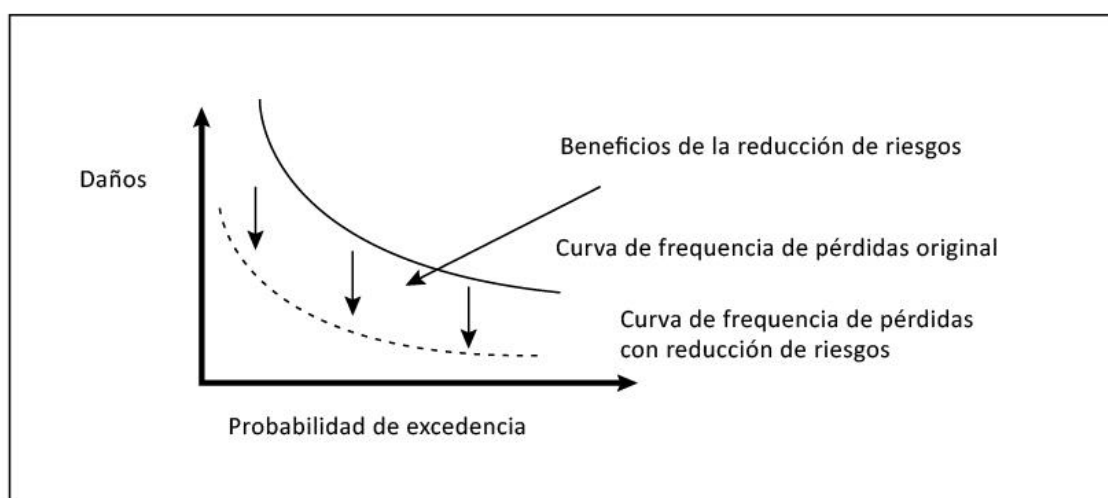


Figura 8. Representación gráfica mediante curvas de excedencia de pérdidas de las pérdidas evitadas con y sin medidas de reducción del riesgo. Adaptado de Mechler (2016).

Cálculo de la eficiencia económica. Los valores de pérdidas evitadas se proyectan durante la vida útil del proyecto, así como los costos de inversión y mantenimiento. Todos los valores son convertidos a valor presente utilizando la tasa de descuento social considerada y se estiman los

indicadores de eficiencia económica para comparar la situación con y sin inversión en reducción del riesgo.

Análisis de sensibilidad. Para comprobar la robustez de los supuestos utilizados para el ACB se realiza una sensibilización de los principales parámetros para comprobar su influencia en el resultado final.

### *1.3.3 Resultados de los ACB de medidas de reducción del riesgo*

Los ACB de medidas de reducción del riesgo son limitados y se enfocan en algunas amenazas, principalmente en inundaciones. Esta escasez de los estudios puede deberse a las dificultades técnicas para la estimación probabilista del riesgo evitado. En la revisión de literatura realizada por Mechler (2016) de 39 estudios, el 54% (21 estudios) correspondía a inundaciones, seguidos por sismos (20%, 8 estudios) y vientos huracanados (18%, 7 estudios), identificándose únicamente 2 estudios de ACB de movimientos de ladera.

Una conclusión de las principales recopilaciones de ACB para medidas de reducción del riesgo es la alta eficiencia de estas acciones, con relaciones costo/beneficio promedio de 4 (Multihazard Mitigation Council, 2005; Moench et al., 2007; Mechler, 2016), independientemente de las amenazas y las medidas específicas consideradas.

## **1.4 Movimientos de ladera y riesgo asociado**

En este apartado se describe el estado del arte del análisis del riesgo con relación a los movimientos de ladera, lo que incluye la clasificación de los movimientos de ladera, la estimación de la amenaza asociada, la estimación cuantitativa de la vulnerabilidad y el riesgo ante los movimientos de ladera y el ACB de las medidas para reducir el riesgo ante estos eventos.

### *1.4.1 Clasificación*

En cada ladera existen fuerzas que favorecen el movimiento del material ladera abajo y fuerzas que tienden a resistir este movimiento (resistencia al cortante). El balance entre ambos conjuntos de fuerzas determina el grado de estabilidad de la ladera (Crozier y Glade, 2005b). En función del grado de estabilidad se pueden definir tres tipos de estados ideales de las laderas: i) laderas que están en un estado estable, es decir con un margen de estabilidad suficiente para resistir las posible fuerzas desestabilizantes; ii) laderas marginalmente estables, que aún no han fallado, pero que son susceptibles de fallar si se alcanza un cierto valor de la fuerza desencadenante y iii) laderas activamente inestables, que son las laderas con un margen de estabilidad próximo a cero y que experimentan procesos continuos o intermitentes de movimientos (Crozier y Glade, 2005a). En este contexto la amenaza de movimientos de ladera viene determinada por la probabilidad de que la ladera alcance un estado activamente inestable, es decir la propensión a que se inicie un movimiento de ladera, y la intensidad (medida por variables como la velocidad o la masa de material que se desplaza) de dicho proceso de inestabilidad (Crozier y Glade, 2005b).

Existen distintas clasificaciones basadas en diversos criterios que han sido utilizados para estudiar los movimientos de ladera, como el tipo de movimiento, la clase de material, la velocidad de movimiento, la causas, el estado de actividad, la edad, el grado de deformación del material desplazado, etc. (Sharpe, 1938; Carson y Kirkby, 1972; Varnes, 1978; Shelby, 1980). En la presente investigación se ha utilizado la clasificación de Varnes (Varnes, 1978), que ha sido ampliamente adoptada a nivel internacional y que se basa principalmente en dos criterios: tipo de movimientos y tipo de material. Con base en esta clasificación, los principales movimientos de ladera son las caídas de rocas y derrumbes, los vuelcos, los deslizamientos



(traslaciones y rotacionales) y los flujos de lodo y detritos. A continuación, se describen brevemente los que se consideran de mayor interés para el área de estudio del presente trabajo.

Deslizamientos. Son movimientos del terreno que se caracterizan por que el material se desplaza sin deformarse, presentando una o varias superficies definidas de rotura, que pueden ser planas, en el caso de los deslizamientos traslacionales, o curvas con la concavidad hacia arriba, en los deslizamientos rotacionales (Figura 9).

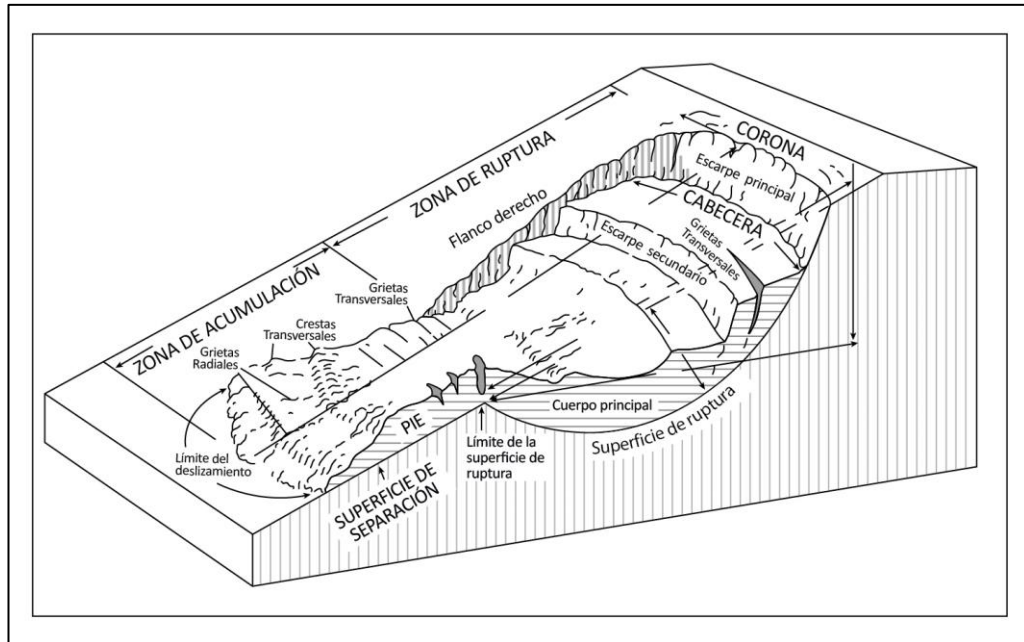


Figura 9. Principales elementos de un deslizamiento rotacional. Adaptado de Highland (2004).

Flujos. Son movimientos del terreno en los que el desplazamiento del material se produce sin cohesión, es decir, con deformación interna. Se clasifican en función de la proporción entre distintos tamaños de material. Cuando la proporción del material fino es mayor del 50%, se denomina flujo de lodo y, cuando supera este valor, flujo de detritos (Ayala Carcedo et al., 1991). En la clasificación de Varnes (1978) se incluye la categoría de flujos de suelo, que corresponde a flujos de materiales finos, pero donde se conserva en alguna medida la estructura del suelo, sin haber llegado a la fluidez de los flujos de lodo. Un factor que determina el impacto de un movimiento de ladera es la velocidad del movimiento que, por otro lado, puede variar a lo largo del tiempo, siendo esta velocidad una de las variables principales para determinar la forma más apropiada de gestión de un movimiento de ladera (Crozier y Glade, 2005b). La Tabla 2 resume la clasificación de los movimientos con base en su velocidad.

Tabla 2. Clasificación de los movimientos del terreno en función de su velocidad y los posibles impactos que pueden ocasionar. Adaptado de Crozier y Glade, 2005b.

Descripción	Velocidad (m/s)	Evaluación del impacto
Extremadamente lento	$< 5 \times 10^{-7}$	Algunas estructuras permanentes pueden permanecer sin daño dado que se trata de movimientos imperceptibles sin instrumentos, es posible construir con precauciones.
Muy lento-lento	$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-3}$	Se pueden mantener las estructuras con reparaciones si el movimiento total no es prolongado durante las fases de aceleración.
Moderado	$5 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-1}$	Algunas estructuras menos sensibles pueden mantenerse temporalmente
Rápido	$5 \times 10^{-1}$	La evacuación es posible. Las estructuras, posesiones y equipo son destruidas.
Muy rápido	$5 \times 10^1$	Algunas vías se pierden. La velocidad es demasiado grande para permitir escapar a todas las personas.

Extremadamente rápido	$5 \times 10^3$	Desastres de mayor violencia. Edificios destruidos por el impacto del material desplazado. Improbable escape.
-----------------------	-----------------	---

### 1.4.2 Amenaza

Matemáticamente la amenaza de movimientos de ladera se puede caracterizar por la fórmula (adaptado de Corominas et al., 2014):

$$A = \sum P(Mi) P(Xj|Mi)$$

*Ecuación 10*

Donde  $P(Mi)$  es la probabilidad de que se produzca un movimiento de ladera con magnitud  $i$  y  $PXj/Mi$  es la probabilidad de que el movimiento de ladera de magnitud  $i$  alcance un punto a una distancia  $X$  del movimiento con una intensidad  $j$ .

El término  $P(Mi)$  involucra dos estimaciones, una es la probabilidad “temporal” de que se produzca el evento disparador del movimiento de ladera y una probabilidad “espacial” de que en la ladera considerada se produzca un movimiento de una determinada magnitud (Van Westen et al., 2006). El término  $PXj/Mi$  se refiere a la probabilidad de la intensidad en un punto considerado, es decir a la probabilidad de que en un punto considerado por efecto del movimiento de ladera se produzca una intensidad determinada  $i$ , siendo la intensidad caracterizada por: i) la energía cinética, en el caso de caídas de bloques, ii) la velocidad, descarga pico y profundidad en el caso de flujos y iii) el desplazamiento para deslizamientos (Corominas et al., 2014). Esta estimación de la intensidad es particularmente relevante en movimientos en los que existe un desplazamiento importante de material, como las caídas de rocas o los flujos, en los que, para caracterizar la amenaza, se requiere no sólo estimar la probabilidad de que se inicie el movimiento, sino modelar el desplazamiento del material y la energía asociada (Corominas et al., 2014). En algunos casos, debido a la dificultad para caracterizar su intensidad, o bien porque se trata de movimientos confinados espacialmente, se ha optado por usar el tamaño/volumen como un valor proxy de la intensidad (Guzzetti et al., 2005; Corominas et al., 2014).

Considerando las carencias de información hidrogeológica y geotécnica (profundidades de suelos y roca, propiedades geotécnicas) a escala regional (que permitirían caracterizar con precisión la probabilidad espacial) así como la carencia de inventarios de movimientos de ladera completos a lo largo del tiempo (que permitirían estimar con precisión la probabilidad temporal), se han desarrollado un conjunto de metodologías para aproximarse a la caracterización de la amenaza de movimientos de ladera, que permiten obtener resultados parciales en un contexto de información limitada (Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014).

Estas metodologías aproximadas se pueden agrupar en cuatro tipologías principales, en función de la probabilidad que permiten estimar e incluyen metodologías para estimar la probabilidad (Figura 10) (Crozier y Glade, 2005b; Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014) : i) espacial de los movimientos de ladera, lo que se conoce como susceptibilidad, ii) temporal de los movimientos de ladera, iii) de la magnitud de los movimientos y (iv) espacial y temporal de la intensidad del movimiento, es decir la amenaza o peligrosidad por movimientos de ladera.

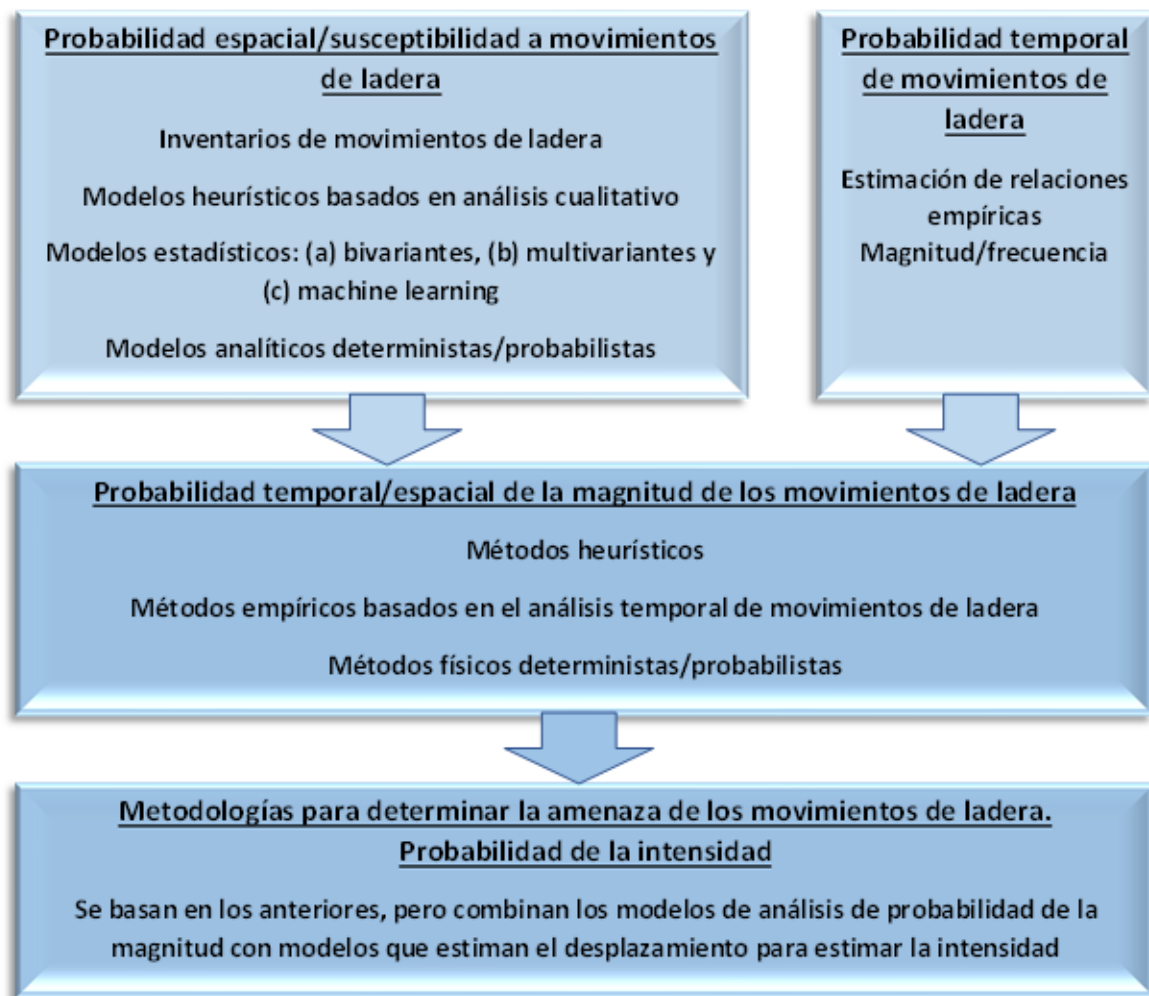


Figura 10. Metodologías para el análisis de susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera. Fuente: elaboración propia.

### 1.4.3 Probabilidad espacial

La determinación de la susceptibilidad del terreno ante movimientos de ladera consiste en identificar la mayor o menor propensión del terreno a que se produzcan movimientos del terreno, mediante el análisis de los factores que condicionan y determinan dichos movimientos (Ayala Carcedo y Corominas, 2002). El análisis de susceptibilidad constituye una aproximación cartográfica-estadística (Brabb Earl, 1985; Chica Olmo y Luque Espinar, 2002), que permite determinar la probabilidad espacial de los movimientos principalmente con fines de zonificación territorial (Van Westen et al., 2006). Representa un paso previo a la aplicación de métodos de análisis de amenaza por movimientos de ladera.

Los principales modelos de análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera son los siguientes (Irigaray y Chacon, 2002; Crozier y Glade, 2005b; Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014; Reichenbach et al., 2018):

a) Inventarios de movimientos de ladera. Los inventarios de movimientos de ladera combinan el trabajo de campo con la fotografía aérea y la interpretación con criterio experto geomorfológico (Van Westen et al., 2003; Van Westen et al., 2006; Guzzetti et al., 2012; Corominas et al., 2014). Los inventarios de movimientos de ladera, además de ser una aproximación a la caracterización de la amenaza de movimientos de ladera, son un insumo básico para los métodos estadísticos de análisis de susceptibilidad (Van Westen et al., 2003; Van Westen et al., 2006; Guzzetti et al., 2012; Corominas et al., 2014). Se pueden clasificar en:

(i) geomorfológicos (históricos), (ii) de evento, cuando incluyen movimientos de ladera asociados a un evento detonante singular y (iii) estacionales y multitemporales, cuando reflejan los cambios temporales de los movimientos de ladera (Guzzetti et al., 2012). Actualmente la interpretación de un experto geomorfólogo sigue siendo el método más confiable para realizar los inventarios, aunque nuevas técnicas como el LIDAR y la imagen 3D son herramientas valiosas que facilitan esta interpretación (Guzzetti et al., 2012; Fiorucci et al., 2018). Las técnicas semiautomáticas para la identificación de movimientos de ladera a partir de análisis de imágenes de muy alta resolución (VHR-Very High Resolution) aún representan retos para su generalización como una alternativa al criterio experto (Guzzetti et al., 2012). Por otro lado, la Interferometría Sintética de Apertura de Radar (DInSAR por sus siglas en inglés, Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar), que utiliza microondas para detectar deformaciones del terreno de escalas centimétricas a milimétricas, en el momento presente sólo permiten detectar un número limitado de movimientos, particularmente los de mayor tamaño y menor velocidad, que han generado cambios de cobertura del suelo (Guzzetti et al., 2012) y con reflectores adecuados, lo que representa en torno al 3% de los movimientos inventariados en un caso de estudio (Lauknes et al., 2010), aunque es previsible que este porcentaje se pueda mejorar con el uso de nuevos algoritmos y precisión de los sensores (Guzzetti et al., 2012).

b) Método geomorfológico. Consiste en la identificación de zonas propensas a los movimientos de ladera, con base en el criterio experto del geomorfólogo basado en trabajo de campo y análisis de fotografía aérea (Irigaray y Chacon, 2002).

c) Modelos heurísticos basados en análisis cualitativo. En este método se dan pesos a distintas variables teniendo en cuenta el criterio experto según la importancia que pueden tener en la generación de los movimientos de ladera. Estas variables se integran en un valor numérico aplicando un método de análisis multicriterio y se dividen en rangos de susceptibilidad (Glade y Crozier, 2005; Van Westen et al., 2006; Blandón Sandino, 2007; Corominas et al., 2014; Reichenbach et al., 2018; Morante et al., 2019; Carrión-Mero et al., 2021a; Carrión-Mero et al., 2021b).

d) Modelos estadísticos. Los modelos estadísticos usan como insumo fundamental los inventarios de movimientos de ladera y se fundamentan en el principio del actualismo, es decir asumen que los nuevos movimientos de ladera serán el resultado de la misma combinación de factores que produjeron los movimientos históricos (Van Westen et al., 2006). Dentro de los modelos estadísticos tenemos los métodos bivariantes, multivariantes (Irigaray y Chacon, 2002; Van Westen et al., 2006; Crozier y Glade, 2005b; Corominas et al., 2014) y los métodos de “machine learning” (Reichenbach et al., 2018). Los métodos bivariantes se basan en estimar por separado el peso de cada uno de los factores para explicar la localización de los movimientos de ladera y obtener un valor de susceptibilidad mediante la adición de estos pesos (Eugster, 2002; Crozier y Glade, 2005b). Los métodos multivariantes se fundamentan en producir nuevas variables a partir de combinaciones numéricas de los factores originales para, a continuación, analizar con test estadísticos, como regresiones múltiples y análisis discriminante, estas nuevas variables e identificar qué combinación y qué valores de la nueva variable explican mejor la distribución espacial de los movimientos de ladera (Glade y Crozier, 2005; Van Westen et al., 2006; Domínguez-Cuesta et al., 2007, 2010; Chung y Fabbri, 2012). En años recientes se ha incrementado el número de artículos que aplican metodologías basadas en algoritmos “machine learning” (Reichenbach et al., 2018; Briones-Bitar et al., 2020). De igual forma que las técnicas estadísticas “tradicionales” estas metodologías se basan en utilizar los inventarios de los datos para clasificar las zonas susceptibles a movimientos de ladera. Para realizar esta clasificación, los algoritmos ejecutan gran número de interacciones, cuyos resultados van comparando hasta alcanzar una solución óptima (Marjanović et al., 2011; Yan et al., 2019). Los algoritmos más empleados en el análisis de susceptibilidad de movimientos de ladera son “support vector machine” y “random forest” (Yan et al., 2019).

Algunos de los métodos bivariantes más empleados (Reichenbach et al., 2018) son el método del valor de la información (Yin y Yan, 1988) y el método de la matriz (Degraff y Romesburg, 1980; Irigaray y Chacon, 2002; Irigaray et al., 2007).

El método del valor de la información (Yin y Yan, 1988) emplea la siguiente formula:

$$\ln W_i = \ln \left[ \frac{Densclas}{Densmap} \right] = \ln \left( \frac{\frac{Npix(Si)}{Npix(Ni)}}{\frac{\sum Npix(Si)}{\sum Npix(Ni)}} \right)$$

Ecuación 11

Donde:

$W_i$  es el peso para el mapa de susceptibilidad que se da a cierta clase dentro de una capa (por ejemplo, pendiente de 1 a 10 grados en la capa de pendiente).

$Densclas$  es la densidad de los deslizamientos dentro de esa clase.

$Densmap$  es la densidad de los deslizamientos en toda la capa.

$Npix(Si)$  es el número de píxeles que contienen deslizamientos en una clase determinada.

$Npix(Ni)$  es el número total de píxeles de una clase determinada.

El método de la matriz se basa en definir todas las posibles combinaciones entre las categorías de las capas utilizadas para el análisis de susceptibilidad (definidas como Unidades con Condiciones Únicas-UCU). Para cada una de esas UCU se estima el valor de la Matriz de Susceptibilidad a Deslizamientos (MSD) como:

$$MSD_{UCU} = \frac{\text{número de celdas de deslizamientos en la UCU}}{\text{número total de celdas en la UCU}} * 100$$

Ecuación 12

Estos valores de la susceptibilidad (expresada como MSD) para todas las UCU son luego divididos en clases (muy alta, alta, media y baja), usando métodos como el de las divisiones naturales (Irigaray et al., 2007; García-Urquía y Yamagishi, 2017).

e) Modelos analíticos deterministas y probabilistas. Estos métodos tienen una base física. Los dos tipos principales de métodos son los de cálculo de deformaciones y los de equilibrio límite. Dentro de los métodos del equilibrio límite están los exactos y los no exactos. Estos últimos precisan de simplificaciones para poder ser resueltos. El método más utilizado para análisis regionales es el método del talud infinito (Dietrich y Montgomery, 1998; Harp et al., 2002b; Van Westen et al., 2006). Por otro lado, en el caso de los flujos de lodos y detritos uno de los métodos más empleados es el de la Hidrodinámica de la Partícula Suavizada, SPH por sus siglas en inglés (Carrión-Mero et al., 2021c). A nivel regional, la principal limitación de estos modelos es la carencia de datos de las propiedades mecánicas de los suelos y de las profundidades de estos. Algunos autores han tratado de resolver esta falta de datos de profundidad correlacionado la profundidad con otras variables primarias de forma del terreno (pendiente, aspecto, elevación) usando métodos geoestadísticos (Penížek y Borůvka, 2006) o con fórmulas empíricas (DeRose, 1996; Salciarini et al., 2006).

Una mejora de los métodos basados en el del talud infinito consiste en aplicar metodologías para reducir las incertidumbres asociadas a los parámetros de entrada (Van Westen et al., 2006), mediante la modelación de escenarios estocásticos aplicando la simulación de Montecarlo

(Hammond, 1992) o el método de análisis de la incertidumbre FOSM (Mora, 2006; Haneberg, 2007).

En el apartado 3.3.1. se describen en mayor detalle las aplicaciones probabilistas del método del talud infinito, dado que en estas metodologías se fundamenta el análisis realizado en la presente tesis doctoral.

#### 1.4.3.1 El modelo del talud infinito

El modelo de talud infinito es un modelo de análisis de estabilidad de taludes basado en el método del equilibrio límite, resuelto de forma no exacta (Ayala Carcedo et al., 1991). Como se mencionó en el apartado anterior es el método analítico más aplicado para el análisis a nivel regional de la probabilidad espacial de movimientos de ladera. El modelo asume que existe una capa de material no cohesivo o cohesivo de poca profundidad sobre una capa de material más resistente. Su principal aplicación es para el análisis de estabilidad de deslizamientos traslacionales superficiales (Cadenas del Llano, 1998; Hammond, 1992).

La fórmula del talud infinito es la siguiente (Haneberg, 2007):

$$FS = \frac{c_r + c_s + [q_t + Y_m D + (Y_{sat} - Y_w - Y_m) H_w D] \cos^2 \beta \tan \emptyset}{[q_t + Y_m D + (Y_{sat} - Y_w) H_w D] \sin \beta \cos \beta}$$

Ecuación 13

Donde:

$FS$  es el factor de seguridad.

$c_r$  es la fuerza cohesiva de las raíces de los árboles (fuerza/área).

$c_s$  es la fuerza cohesiva del suelo (fuerza/área).

$q_t$  es la carga uniforme debida a el peso de la vegetación (fuerza/área).

$Y_m$  es el peso unitario del suelo húmedo sobre la superficie freática (peso/volumen).

$Y_{sat}$  es el peso unitario del suelo saturado por debajo del nivel freático (peso/volumen).

$Y_w$  es el peso unitario del agua.

$D$  es la potencia del suelo por encima de la superficie de rotura (longitud).

$H_w$  es la altura del nivel freático sobre la superficie de rotura normalizada por el grosor del suelo (adimensional).

$\beta$  es la pendiente (grados).

$\emptyset$  es el ángulo de rozamiento interno (grados).

Mientras la mayor parte de las variables de la ecuación no dependen del tiempo, la variable  $H_w$  si es dependiente del tiempo, pues variará con las modificaciones del nivel freático (Haneberg, 2007; Raia et al., 2013).

Los análisis determinísticos de estabilidad de taludes basados en el método del equilibrio límite calculan un valor del factor de seguridad con base en una serie de parámetros de entrada (Ayala Carcedo et al., 1991). En la práctica existen muchas incertidumbres en la estimación de las variables de entrada al modelo. Las incertidumbres en los parámetros de resistencia al corte son debidas a las variaciones de las propiedades del suelo en la zona de estudio y a errores en las medidas de campo y de laboratorio. Por otro lado, los niveles freáticos varían espacial y temporalmente. Todas estas variaciones generan incertidumbre en los cálculos del factor de seguridad y obligan a aplicar márgenes de seguridad, aplicando factores que van de 1.2 a 1.5.

De forma resumida las simplificaciones que asume el modelo del talud infinito son las siguientes (Hammond, 1992; Haneberg, 2004): (i) el plano de falla es paralelo a la superficie del terreno, (ii) existe una barrera de drenaje paralela a la superficie del terreno, constituida por el sustrato rocoso o un suelo más denso, (iii) existe un gran contraste de conductividad hidráulica entre el suelo y la barrera de drenaje lo que produce que el flujo del agua subterránea sea aproximadamente paralelo a la barrera de drenaje y a la superficie del terreno, (iv) se asume que el plano de falla se extiende hasta el infinito, (v) se considera sólo una capa de suelo, aunque se pueden realizar algunos ajustes para modelar situaciones con varias capas, promediando los parámetros de cada capa con base al espesor y (vi) el análisis se realiza en dos dimensiones. Esto es especialmente aplicable a situaciones en las que la resistencia a lo largo de los planos de falla lateral sea despreciable respecto a la resistencia a lo largo de la base y por tanto sea la resistencia de la base la que determina la estabilidad de todo el bloque.

#### 1.4.3.2 *Determinación de los parámetros de resistencia al corte de suelos*

Uno de los aspectos fundamentales para el análisis con métodos físicos de la amenaza de movimientos de ladera asociada a deslizamientos o flujos, en los cuales los materiales predominantes son suelos, es la definición de las propiedades de resistencia al corte de los suelos (Ayala Carcedo et al., 1991). Los suelos presentan dos tipos de comportamientos, el comportamiento friccional, determinado por el ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ) y el comportamiento cohesivo determinado por la cohesión ( $c$ ). La cohesión es independiente del estado tensional, mientras que el componente friccional se incrementa con la presión de confinamiento (Ayala Carcedo et al., 1991; Saleh y Wright, 1997; González de Vallejo et al., 2002), como expresa la ley de Coulomb:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

*Ecuación 14*

Donde  $\tau$  es la resistencia al corte,  $c'$  es la cohesión considerando presiones efectivas,  $\sigma'$  es la tensión normal al plano que se considere y  $\phi'$  es el ángulo de rozamiento considerando presiones efectivas.

Las presiones efectivas se refieren a las presiones que actúan sobre un plano por unidad de superficie menos la presión intersticial absorbida por el agua y es la presión que determina la resistencia al esfuerzo cortante.

Para definir las pruebas más apropiadas con el fin de determinar la resistencia al esfuerzo cortante, dada una condición particular de un suelo, se debe considerar: (i) el tipo de prueba a realizar, (ii) el tipo de muestra a obtener, (iii) las condiciones del ensayo y (iv) los parámetros más adecuados para caracterizar el suelo analizado.

Tipos de pruebas a realizar. Para la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante se aplican ensayos de laboratorio y pruebas de campo. Dentro de las pruebas de laboratorio existen pruebas como el molinete, el ensayo de penetración estándar y el ensayo de corte directo.

Características de las muestras. Los principales tipos de muestras son: (i) las muestras inalteradas, extraídas de forma que se conserven la estructura y condiciones de humedad del suelo y (ii) las muestras remoldeadas, que han sido retrabajadas en el laboratorio.

Las condiciones del ensayo, que pueden ser sin drenaje o con drenaje. Las condiciones sin drenaje en el caso de un talud natural reflejan el estado de corto plazo, cuando el talud acaba de conformarse. Las condiciones con drenaje reflejan una situación de más largo plazo, donde el talud o la ladera ha sido sometido a ciclos de saturación y drenado.

Los parámetros obtenidos de los ensayos pueden ser representativos de la resistencia pico o la resistencia residual. La resistencia pico es aquella a la que se produce la rotura de una muestra

sometida a condiciones de tensión crecientes y refleja las condiciones de taludes o laderas que no han estado expuestos por periodos prolongados a cambios ambientales y que no han sufrido deslizamientos previos. La resistencia residual es la que presenta la muestra una vez fallada, que es una condición donde la influencia de la cohesión es mínima y donde el comportamiento es principalmente friccional, lo que refleja las condiciones de una ladera o talud donde ya se ha producido un deslizamiento. En el caso de las arcillas de alta plasticidad existe un tercer estado, que es el estado completamente suavizado y que refleja las condiciones de las arcillas que han sido sometidas a las condiciones ambientales por largos periodos y en que han experimentado constantes ciclos de saturación y drenaje.

A continuación, se describen cuáles podrían ser los ensayos adecuados para distintas condiciones de los suelos:

Para taludes artificiales que han estado poco expuestos a las condiciones ambientales el ensayo de compresión triaxial es el más apropiado pues permite modelar condiciones de resistencia al corte sin drenaje, que representa el estado del talud en el corto plazo (Ayala Carcedo et al., 1991).

Para laderas naturales que no han deslizado el ensayo triaxial drenado o el ensayo de corte directo, ambos con muestras inalteradas pueden ser apropiados. En el caso de arcillas de alta plasticidad que han estado expuestas a las condiciones ambientales, los ensayos triaxiales drenados para estimar las propiedades como suelos completamente suavizados permiten obtener resultados más representativos del comportamiento de estos materiales. En este tipo de ensayos las muestras se humedecen hasta constituir un lodo y luego se remoldean (Saleh y Wright, 1997).

Para laderas naturales en materiales deslizados el ensayo de corte directo drenado es una buena aproximación. En el caso de suelos arcillosos los valores de resistencia al corte obtenidos de muestras remoldeadas se considera que puede representar de forma adecuada esta resistencia residual (Ayala Carcedo et al., 1991).

### 1.4.3.3 Aplicaciones probabilistas del método del talud infinito

Los modelos probabilísticos basados en el método del talud infinito permiten estimar la probabilidad espacial de que se produzca un movimiento de ladera, mediante la estimación de gran número de cálculos de factor de seguridad por punto, con el fin de cuantificar la incertidumbre y variabilidad asociada con la predicción de la probabilidad espacial (Hammond, 1992).

Para el análisis probabilístico cada parámetro de entrada a la fórmula se introduce mediante distribuciones de probabilidad, en lugar de utilizar valores únicos (Hammond, 1992; Haneberg, 2004, 2007). La distribución de probabilidad es una función discreta o continua que define la probabilidad de que una variable aleatoria tome un valor dentro en un determinado intervalo o que se encuentre por debajo de un valor de referencia. Hay dos tipos de funciones de distribución de probabilidad: funciones de distribución acumulada y funciones de densidad de probabilidad (Aparicio, 2009). Los programas de análisis probabilístico de estabilidad de talud emplean funciones de densidad de probabilidad que son de la forma:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$

*Ecuación 15*

Se trata de una función no negativa, tal que la probabilidad de que la función tome un valor  $x$  entre  $x_2$  y  $x_3$  es igual al área por debajo de la curva de la función entre  $x_2$  y  $x_3$  (Figura 11).



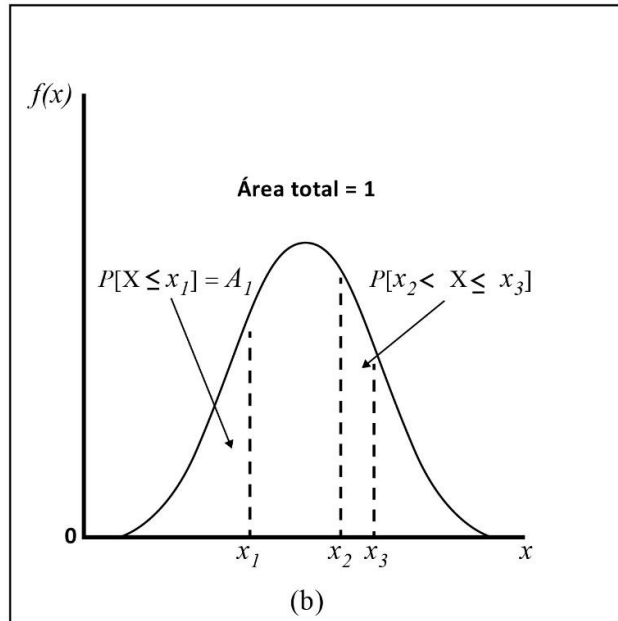


Figura 11. Esquema de función de densidad de probabilidad. Adaptada de Hammond (1992).

Para realizar el análisis probabilístico de estabilidad se debe definir una función de probabilidad para cada una de las variables necesarias para el análisis de estabilidad mediante el método del talud infinito.

El programa de análisis probabilístico LISA (Level I Stability Analysis), desarrollado por el Servicio Forestal de Estados Unidos realiza un número de interacciones del método de análisis de estabilidad del talud infinito empleando la simulación de Monte Carlo, que es un método para la selección aleatoria de los valores de cada variable (Hammond, 1992). En el programa LISA se obtienen 1000 cálculos del factor de seguridad en cada punto de cálculo (normalmente en cada píxel o en cada forma del terreno). La probabilidad espacial de movimientos de ladera se calcula como la frecuencia relativa de los factores de seguridad menores o iguales a 1 con respecto al número total de iteraciones.

El programa PISA-m (Probabilistic Infinite Slope Analysis), utiliza el método FOSM (Haneberg, 2004). Este es un método para evaluar la incertidumbre cuando se desconoce el valor exacto para los parámetros de entrada a una ecuación (Hidalgo y Pacheco, 2011) y es ampliamente utilizado en los campos de geología, hidrología y geografía (Haneberg, 2004). Mediante este método se puede estimar la probabilidad de falla del Factor de Seguridad (FS), es decir la probabilidad de que el FS tome un valor menor de 1. Las ecuaciones utilizadas para dicha estimación son las siguientes (Haneberg, 2004):

$$\overline{FS} = FS(\bar{x})$$

Ecuación 16

Siendo  $\overline{FS}$  el valor medio del Factor de Seguridad, estimado con los valores promedio ( $\bar{x}$ ) de todas las variables independientes que componen el cálculo del FS (Ecuación 13).

$$\sigma_F^2 = \sum_i \left( \frac{\partial FS}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}}^2$$

Ecuación 17

Donde  $\sigma_F^2$  es la varianza de  $FS$ , el término  $\frac{\partial FS}{\partial x_i}$  son las derivadas parciales del  $FS$  para cada variable independiente, considerando el valor medio del  $FS$  y los valores medios de las distintas variables independientes.

Una vez obtenidos los valores del promedio y la varianza para el  $FS$  se obtiene la probabilidad de que el  $FS < 1$ . Para esto se asume que el  $FS$  sigue una distribución de probabilidad log normal (Haneberg, 2004) y se obtiene el valor de probabilidad correspondiente para esta función de distribución de probabilidad:

$$Prob \{FS \leq 1\} = CDF(1)$$

*Ecuación 18*

Donde  $CDF(1)$  es la función de distribución de probabilidad acumulada, en este caso la función log normal, evaluada para el valor límite de 1.

Una vez se obtienen los valores de probabilidad estos se pueden agrupar en rangos. Hammond, 1992 plantea la siguiente distribución:

*Tabla 3. Rangos de probabilidad relativa de deslizamiento según Hammond (1992).*

<b>Rangos de probabilidad</b>	<b>Probabilidad relativa de deslizamiento</b>
0 - 0.03	Muy baja
0.03 - 0.08	Baja
0.08 - 0.160	Moderada
0.160 - 0.25	Alta
> 0.250	Muy alta

Las funciones de distribución de probabilidad a aplicar para cada variable dependen de los datos disponibles en la zona de estudio. De forma general Hammond, 1992 en el caso de  $c'$  y  $\phi'$  recomiendan usar la distribución uniforme, triangular o un histograma de frecuencias relativas si no se tienen datos de laboratorio y desarrollar estudios de detalle del comportamiento de las variables para poder orientar mejor sobre cuáles son las funciones de probabilidad más apropiadas para caracterizarlas. Cuando la probabilidad se estima con el método FOSM resulta recomendable utilizar función de distribución de probabilidad normales, dado que el supuesto de normalidad de las variables independientes es una de las condiciones del método (Hidalgo y Pacheco, 2011).

#### *1.4.4 Limitaciones de las metodologías de análisis de probabilidad espacial*

Con relación a las limitaciones de las distintas metodologías, Van Westen et al. (2003) hacen una distinción entre “métodos directos”, refiriéndose a los inventarios de movimientos de ladera y al método geomorfológico y “métodos indirectos” refiriéndose a los métodos heurísticos, estadísticos y analíticos. A la hora de valorar cuales son los métodos más apropiados para el mapeo de susceptibilidad a nivel regional se puede decir que existen dos escuelas del pensamiento: mientras alguno autores consideran los métodos estadísticos como los más objetivos y, por tanto, los más apropiados (Chung y Fabbri, 2003; Crozier y Glade, 2005a), otros, aunque reconocen la dificultad de convertir los métodos directos en reglas de decisión objetivas que puedan generalizarse, consideran que la objetividad no siempre se traduce en resultados más precisos, por lo que plantean que una combinación entre métodos directos e indirectos puede ser la metodología más apropiada (Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014). En los métodos indirectos diversos autores (Chung y Fabbri, 2003; Van Westen et al.,

2003; Corominas et al., 2014 y Reichenbach et al., 2018) identifican debilidades como: (i) la sobre simplificación de los datos de entrada, al emplear para el análisis únicamente las variables explicativas que son más sencillas de obtener, como la litología y la pendiente, (ii) la excesiva generalización, al asumir que los mismos factores explicativos permiten modelar la susceptibilidad en toda el área de estudio, (iii) el manejo pobre de los datos categóricos/continuos, (iv) la tendencia a analizar de forma conjunta la susceptibilidad a distintos tipos de movimientos de ladera, cuando los factores explicativos varían de un tipo a otro, (v) el desconocimiento de las simplificaciones implícitas en los modelos de predicción y (vi) la falta de validación de los resultados predictivos. Con relación a los modelos deterministas de estabilidad de talud o ladera, aunque son analíticamente más rigurosos y permiten evitar las limitaciones de la aplicación del principio del actualismo, pues modelan escenarios basadas en modelos físicos, que son independientes de la distribución espacial de eventos históricos, presentan la limitación de la carencia de datos a escala regional (Hammond, 1992; Montgomery y Dietrich, 1994; Haneberg, 2004; Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014).

### 1.4.5 Probabilidad temporal

Los métodos de análisis de la probabilidad temporal de los movimientos de ladera son métodos parciales de análisis de la amenaza de movimientos de ladera, pues únicamente permiten determinar la probabilidad temporal de los movimientos, generalmente con base en el análisis temporal de los inventarios. Se identifican dos aproximaciones principales: (i) análisis de probabilidad de excedencia de movimientos de ladera y (ii) construcción de funciones de magnitud/frecuencia.

i) Análisis de probabilidad de excedencia de movimientos de ladera. A partir del análisis temporal de los inventarios y la frecuencia de los movimientos se estima la probabilidad de excedencia de nuevos movimientos (la probabilidad de que se produzca uno o más movimientos) por medio de distribuciones de probabilidad, principalmente las funciones de distribución de probabilidad de Poisson y binomial, elaborando mapas de probabilidad a partir de los valores puntuales de la función (Coe et al., 2004; Guzzetti et al., 2005).

(ii) Construcción de funciones de magnitud/frecuencia. Se analizan los inventarios de movimientos de ladera y se generan formulas empíricas que relacionan la magnitud de los movimientos (expresada por el área como  $A_L$ ) y su frecuencia, generando las relaciones magnitud-frecuencia (Guzzetti et al., 2002, Malamud et al., 2004), que son un insumo para el análisis de la amenaza de flujos y caídas de rocas (Corominas et al., 2014) y deslizamientos (Guzzetti et al., 2005; Jaiswal et al., 2010; Ghosh et al., 2012). En el caso de los deslizamientos, la mayor parte de los estudios de inventarios plantean que la relación magnitud frecuencia sigue distribuciones de probabilidad tipo doble Pareto o Gamma Inversa (Guzzetti et al., 2002; Malamud et al., 2004; Guzzetti et al., 2005; Galli et al., 2008; Jaiswal et al., 2010; Ghosh et al., 2012). A partir de estas funciones de distribución de probabilidad algunos autores han elaborado “leyes de potencia”, similar a la ley de Gutenberg-Richter aplicada para sismos, para explicar la relación magnitud-frecuencia. Algunos ejemplos de estas leyes son:

Guzzetti et al., 2002:

$$N_L = C' A_L^\beta$$

*Ecuación 19*

Donde  $N_L$  es el número no acumulado de movimientos de ladera con magnitudes mayores a  $A_L$ ,  $A_L$  es la magnitud de los movimientos de ladera (expresado en volumen o área) y  $C'$  y  $\beta$  son constantes.

Malamud et al., 2004:

$$\log N(V) = N_0 + b \cdot \log V$$

*Ecuación 20*

Donde  $N(V)$  es la frecuencia anual acumulada de caídas de roca que exceden un volumen dado,  $N_0$  es el número total de eventos de caída de roca y  $b$  es el exponente de la ley de potencia.

La exactitud de estas relaciones magnitud-frecuencia está limitada por las propias limitaciones de los inventarios de movimientos de ladera, que no son completos y que pueden tener sesgos, sobre todo hacia los movimientos de mayor tamaño, existiendo un subregistro de eventos menores (Corominas et al., 2014).

#### *1.4.6 Probabilidad de la magnitud*

Estas metodologías permiten estimar el término  $\sum P(M_i)$  de la Ecuación 10. Dentro de las metodologías que estiman la probabilidad de la magnitud de los movimientos de ladera están los modelos a) heurísticos, b) modelos estadísticos basados en el análisis de inventarios de movimientos de ladera, c) los modelos físicos distribuidos deterministas, d) modelos físicos distribuidos probabilistas y e) modelos probabilistas que integran la probabilidad espacial y temporal. El análisis de la probabilidad de la magnitud de los movimientos de ladera se puede considerar que es un proxy aceptable de la amenaza de movimientos de ladera (es decir  $\sum P(M_i) \simeq A$ ) cuando el desplazamiento del material es lento o se trata de deslizamientos bien delimitados espacialmente, pero si este desplazamiento es importante el análisis de la probabilidad de la magnitud se debe combinar con modelos que estiman el desplazamiento del material para obtener el valor de la intensidad en cada punto de análisis (Corominas et al., 2014).

##### *1.4.6.1 Métodos heurísticos*

Una de las formas de aplicar estos métodos es por medio de árboles de eventos, donde cada nodo representa cada uno de los elementos del análisis de probabilidad (ejemplo se produce la lluvia disparadora, el movimiento se activa, etc.) y las ramas representan los posibles resultados de cada evento con sus probabilidades asociadas (Corominas et al., 2014), estimadas a partir de juicio de experto o eventos históricos (Budetta, 2002), obteniéndose la probabilidad de una posible combinación de ramas a partir de la multiplicación de la probabilidad de la probabilidad de cada rama, al considerarse la probabilidad de los resultados como independiente. Su aplicación principal es para analizar eventos independientes.

##### *1.4.6.2 Modelos estadísticos basados en inventarios de movimientos de ladera*

Para lograr estimar la probabilidad de la magnitud estos modelos combinan el análisis de susceptibilidad por medio de métodos estadísticos, con el análisis de la probabilidad de que se produzca un deslizamiento y con la probabilidad de que el deslizamiento supere un determinado área/volumen, asumiendo que las tres probabilidades son independientes y combinándolas espacialmente (Guzzetti et al., 2005, 2006; Jaiswal et al., 2010; Ghosh et al., 2012). La amenaza de movimiento de ladera se estima como la probabilidad conjunta de la probabilidad de la magnitud, el disparo y la probabilidad espacial, aplicando la siguiente fórmula:

$$A_m = P_m \cdot P_t \cdot P_e$$

*Ecuación 21*

Donde  $A_m$  es la amenaza de un determinado tipo de movimiento de ladera,  $P_m$  es la probabilidad de la magnitud, entendida como la probabilidad de que el movimiento de ladera tenga un determinado tamaño,  $P_t$  la probabilidad temporal, expresada como la probabilidad de excedencia anual de los eventos disparadores de movimientos de ladera,  $P_e$  es la probabilidad

espacial, entendida como la probabilidad espacial de que se produzca un movimientos de un determinado tipo.

Esta metodología ha sido ampliamente difundida para la estimación de la amenaza de movimientos de ladera lentos, principalmente deslizamientos rotacionales y traslacionales, a partir del manuscrito de Guzzetti et al., 2005.

La probabilidad espacial ( $P_e$ ) se estima a partir de un modelo de análisis a la susceptibilidad de movimientos de ladera, utilizando las curvas de predicción para atribuir a cada clase de susceptibilidad un poder predictivo expresado en términos de porcentaje (Guzzetti et al., 2005; P. Jaiswal et al., 2010). Para estimar la probabilidad de la magnitud se analizan los inventarios de ladera para establecer la probabilidad del área del movimiento de ladera, asumiendo que el área es un proxy de la magnitud de los movimientos de ladera y que las relaciones magnitud-frecuencia siguen funciones de distribución de probabilidad de tipo doble Pareto o Gamma inversa (Guzzetti et al., 2005; Jaiswal et al., 2010; Ghosh et al., 2012). Por otro lado, la probabilidad de disparo se estima a partir de inventarios multitemporales o datos de eventos históricos de deslizamientos y se establece la probabilidad de excedencia, definida como la probabilidad de tener uno o más deslizamientos, asumiendo que esta probabilidad de excedencia sigue una distribución de probabilidad de Poisson o binomial, cuyos valores se estiman para distintos periodos de observación (25 años, 50 años, etc.) (Guzzetti et al., 2005; Jaiswal et al., 2010; Ghosh et al., 2012).

Aunque este enfoque de utilizar probabilidades condicionadas permite estimar el cálculo de la probabilidad de la magnitud (asumiendo que el área y volumen del movimiento representan la magnitud) para movimientos de ladera lentos, presenta algunas limitaciones importantes. Una limitación es el uso de la relación del proxy área/magnitud del movimiento de ladera, relación que está poco sustentada en estudios empíricos. Otra limitación indicada por los autores (Guzzetti et al., 2005) es el hecho de que como producto final se generan distintos mapas de probabilidad de excedencia para distintas áreas de movimientos para cada periodo de retorno de análisis. Es decir, para el periodo de retorno de 25 años tendremos un mapa de probabilidad movimientos de ladera mayores de 10,000 m<sup>2</sup>, un mapa de probabilidad para movimientos de ladera superiores a 50,000 m<sup>2</sup>, etc. Esta circunstancia de la multiplicidad de posibles mapas dificulta su utilización para la toma de decisiones y para realizar estimaciones del riesgo de movimientos de ladera.

Partiendo del mismo enfoque conceptual de analizar la amenaza como el resultado de la probabilidad condicional de la probabilidad de la intensidad, la probabilidad temporal y la probabilidad espacial, Zêzere et al. (2004) desarrollaron una metodología que permite resolver varias de las limitaciones identificadas. De igual forma que en los estudios anteriores la probabilidad espacial se estima a partir del análisis de susceptibilidad, a cuyas clases se asigna un poder predictivo utilizando los valores de las curvas de predicción. La probabilidad temporal se obtiene de eventos históricos de deslizamientos, para cada uno de los cuales se estima su periodo de retorno, a partir de los periodos de retorno de distintos parámetros de lluvia antecedente (1 día, 5, 10, 15, 40, etc.) atribuyendo al evento de deslizamiento el mayor periodo de retorno que arrojan los distintos parámetros de lluvia antecedente. El periodo de retorno de la lluvia antecedente se obtiene utilizando la función de distribución de probabilidad de Gumbel. Finalmente, la probabilidad condicionada a nivel de pixel de tener un movimiento de ladera para un determinado escenario se obtiene aplicando la siguiente fórmula (Zêzere et al., 2004):

$$P = 1 - \left( 1 - \frac{T_{afectada}}{T_y} \right)^{predy}$$

Donde  $P$  es la probabilidad condicional a nivel de pixel de tener un movimiento de ladera,  $T_{afectada}$  es el área total afectada por movimientos de ladera para el escenario considerado (basado en datos históricos),  $T_y$  es el área total de la clase de susceptibilidad donde se localiza el pixel y  $predy$  es el poder predictivo de la clase de susceptibilidad.

Esta metodología, al no utilizar la probabilidad del área, evita que se obtenga como resultado multiplicidad de mapas para un mismo periodo de retorno. Por otro lado, al no emplear la probabilidad de excedencia de tener uno o más deslizamientos, sino la probabilidad de tener un número de deslizamientos determinado resulta un método más robusto al asociar la probabilidad temporal a la probabilidad espacial. Sin embargo, al utilizar un gran número de indicadores de lluvia antecedente y considerar el mayor periodo de retorno como la probabilidad del evento histórico considerado, puede suceder que dos eventos con distinto número de deslizamientos presenten el mismo periodo de retorno (Zêzere et al., 2004).

### 1.4.6.3 Métodos físicos distribuidos deterministas

Estos modelos combinan los métodos analíticos deterministas de estimación de la probabilidad espacial/susceptibilidad con modelos hidrológicos para analizar el efecto de la precipitación en la estabilidad de taludes.

Algunos de los modelos más difundidos son el Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability analysis (TRIGRS) (Baum et al., 2002) y el modelo simplificado Shallow Slope Stability Model (SHALSTAB) (Montgomery y Dietrich, 1994; Dietrich y Montgomery, 1998).

El TRIGRS combina un análisis hidrogeológico distribuido<sup>2</sup> basado en la ecuación de Richards (Ecuación 23), con el método del talud infinito (Baum et al., 2002; Crosta y Frattini, 2003; Savage et al., 2004).

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ kl(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ kl(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ Kl(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right]$$

*Ecuación 23*

Donde  $x$ ,  $y$ ,  $z$  son los ejes de referencias del sistema de coordenadas, con  $z$  normal al talud,  $\psi$  es la cabeza de presión del agua subterránea,  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua,  $t$  es el tiempo,  $\alpha$  es el ángulo del talud, y  $Kl$  y  $Kz$  son las conductividades hidráulicas en las direcciones lateral y normal respectivamente.

Dado que el modelo SHALSTAB se utilizará en el desarrollo de la presente tesis, a continuación se describe en mayor detalle. Dicho modelo fue desarrollado por Montgomery y Dietrich, 1994 y se basa en el supuesto de que la escorrentía superficial determina la presión de poro de los suelos durante las tormentas. El modelo combina un modelo hidrológico simplificado que estima la saturación del suelo a partir de una lluvia permanente, derivado del modelo TOPOG (O'Loughlin, 1986) y una versión simplificada del modelo del talud infinito. Esta combinación permite incorporar en el análisis el efecto de la topografía en la saturación del suelo, lo que no sería considerado si se aplicara únicamente el método del talud infinito (Montgomery y Dietrich, 1994). SHALSTAB aplica dos algoritmos, uno para suelos donde la cohesión es asumida como cero (Dietrich et al., 1998):

<sup>2</sup> Los modelos hidrológicos distribuidos tienen en cuenta la variabilidad espacial de los insumos meteorológicos y otros insumos como la forma del terreno, los suelos, la vegetación y el uso de la tierra. En modelos hidrológicos distribuidos, la escorrentía es calculada en cada celda de análisis y "transportada" aguas abajo usando la dirección de drenaje local de cada celda.

$$\frac{q}{T} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \frac{b}{a} \sin \theta$$

Ecuación 24

Y otro algoritmo para suelos con cohesión (Dietrich et al., 1998; Reginatto et al., 2012):

$$\log \frac{q}{T} = \frac{\sin \theta}{\frac{a}{b}} \left[ \frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \right]$$

Ecuación 25

Donde:

$q$  es la Precipitación en m/día.

$T$  es la Transmisividad del suelo en m<sup>2</sup>/día.

$\rho_s$  es el peso específico del suelo en N/m<sup>2</sup>.

$\rho_w$  es el peso específico del agua en N/m<sup>2</sup>.

$\theta$  es la pendiente en grados.

$\phi$  es el ángulo de rozamiento interno en grados.

$b$  es el ancho del píxel del modelo digital del terreno en metros.

$a$  es el área que drena hacia un píxel determinado, medida en m<sup>2</sup>.

$c$  es la cohesión.

$z$  es la profundidad del suelo.

$g$  es la aceleración de la gravedad.

El modelo SHALTAB no estima el factor de seguridad, sino que emplea los valores del logaritmo de la relación  $q/T$  para caracterizar zonas como potencialmente inestables. A partir de la experiencia de diversas aplicaciones del modelo y su calibración con inventarios de movimientos de ladera los autores estimaron que valores de  $\log q/T$  por debajo de -3.1 a -2.8 corresponden a laderas potencialmente inestables (Dietrich et al., 1998).

Recientemente se han desarrollado modelos más complejos que TRIGRS y SHALSTAB, los cuales aplican análisis hidrogeológico en tres dimensiones y análisis multidimensional del equilibrio límite (Anagnostopoulos et al., 2015). Aunque conceptualmente podría decirse que estos modelos físicos serían los más apropiados para caracterizar la amenaza de movimientos de ladera para movimientos delimitados espacialmente (Van Westen et al., 2006), la principal dificultad para aplicar estos modelos hidrogeológicos y de estabilidad combinados estriba en la limitación de datos tanto para caracterizar las propiedades mecánicas como el comportamiento hidrogeológico de los materiales (Coe et al., 2004; Van Westen et al., 2006; Raia et al., 2013; Fatchi et al., 2016;), lo que se suma a las ya indicadas simplificaciones asociadas al método del talud infinito (Hammond, 1992; Van Westen et al., 2006). Otra limitación de estos modelos es que se han aplicado principalmente con enfoques deterministas modelando escenarios históricos de precipitación, pero sin estimar la probabilidad de dicha precipitación (Montgomery y Dietrich, 1994; Baum et al., 2002; Crosta y Frattini, 2003; Savage et al., 2004). Frente a esta debilidad algunos autores plantean combinar el modelo del talud infinito e hidrogeológico con el análisis de probabilidad de excedencia de la lluvia disparadora usando una función de probabilidad, generalmente una distribución del grupo de valor extremo generalizado (Miller, 1988; Salciarini et al., 2008).

#### 1.4.6.4 Métodos físicos distribuidos probabilistas

El uso de métodos probabilistas de simulación permite reducir la incertidumbre de los parámetros de entrada a los modelos físicos (Fatichi et al., 2016). Recientemente se han desarrollado aplicaciones que permiten analizar de forma probabilista los modelos que combinan hidrogeología con análisis de estabilidad de taludes, como el TRIGRS, logrando una mejora en la capacidad de predicción. Por medio del desarrollo de un nuevo software que permite integrar un enfoque probabilista en el TRIGRS (denominado TRIGRS-p), Raia et al., 2013 lograron mejoras en la capacidad de predicción de hasta el 16%. Otros autores han propuesto el uso del TRIGRS con parámetros deterministas, pero modelando la distribución espacial de los eventos de precipitación de forma probabilista, para caracterizar la relevancia de la distribución espacial de la precipitación en la generación de los deslizamientos (Peres y Cancelliere, 2014).

#### 1.4.6.5 Modelos físicos que integran la probabilidad espacial y temporal

Otra opción para integrar la variable temporal a los modelos de analíticos de estabilidad de taludes que aplican el método del talud infinito, alternativa a los modelos hidrogeológicos distribuidos, es analizar la variación de la altura del nivel freático a partir de datos empíricos ajustados a funciones distribución de probabilidad del tipo valor extremo generalizado para caracterizar la probabilidad temporal de los deslizamientos (Miller, 1988). Este tipo de análisis de la probabilidad temporal del factor de seguridad ha sido aplicado para modelar la velocidad de los deslizamientos utilizando datos empíricos de la variación con el tiempo del nivel freático, aplicando una versión modificada de la fórmula del talud infinito (Ecuación 26) (Vulliet y Hutter, 1988; Van Asch et al., 2007; Schulz et al., 2009; Conte y Troncone, 2011):

$$FS = \frac{c_r + c_s + [q_t + Y_m D + (Y_{sat} - Y_w - Y_m) H_w(t) D] \cos^2 \beta \tan \emptyset}{[q_t + Y_m D + (Y_{sat} - Y_m) H_w(t) D] \sin \beta \cos \beta}$$

Ecuación 26

Donde:

$FS$  es el factor de seguridad.

$c_r$  es la fuerza cohesiva de las raíces de los árboles (fuerza/área).

$c_s$  es la fuerza cohesiva del suelo (fuerza/área).

$q_t$  es la carga uniforme debida a el peso de la vegetación (fuerza/área).

$Y_m$  es el peso unitario del suelo sobre la superficie freática (peso/volumen).

$Y_{sat}$  es el peso unitario del suelo saturado por debajo del nivel freático (peso/volumen)

$Y_w$  es el peso unitario del agua.

$H_w(t)$  corresponde a la variación con el tiempo de la altura del nivel freático de partida sobre la superficie de rotura.

$D$  es la potencia del suelo por encima de la superficie de rotura (longitud).

$\beta$  es la pendiente (grados).

$\emptyset$  es el ángulo de rozamiento interno (grados).

Estos métodos han sido aplicados únicamente para movimientos de ladera singulares, y no a escala regional (cuenca o ciudad), dadas las limitaciones para obtener series de datos de niveles freáticos representativos.



### 1.4.7 Probabilidad de la intensidad

Estos métodos permiten estimar la amenaza de movimientos de ladera (Ecuación 10), cuando existe un desplazamiento importante del material. Los principales ejemplos identificados se aplican a procesos rápidos donde el desplazamiento es muy repentino y significativo, flujos y caída de rocas, y siguen dos pasos principales: (i) estimación de la probabilidad de ocurrencia del evento y (ii) modelación del desplazamiento del movimiento y la intensidad del evento. La estimación de la probabilidad de ocurrencia se realiza por medio del análisis de los eventos históricos y la definición de relaciones magnitud-frecuencia, pasando posteriormente a modelar el desplazamiento y la intensidad asociada para un número de eventos representativos de los eventos posibles por medio de modelos empíricos, analíticos o numéricos (Corominas et al., 2005; Hürlimann et al., 2006; Agliardi et al., 2009). Dicha modelación de la intensidad puede ser determinista, pero también existen estudios donde se ha aplicado de forma probabilista (Agliardi et al., 2009; Lari et al., 2014).

En el caso de los deslizamientos lentos no se han identificado estudios a escala de cuenca o ciudad para caracterizar la amenaza de forma estricta, es decir caracterizando la probabilidad de la intensidad, considerando parámetros de intensidad como la velocidad del desplazamiento. Como metodología aproximada a una caracterización estricta de la amenaza de movimientos de ladera, diversos estudios de movimientos singulares han aplicado fórmulas empíricas basadas en la ecuación de Bingham (Bingham, 1917) para caracterizar la velocidad de los movimientos, comparando dicha velocidad estimada con las velocidades reales medidas (Vulliet y Hutter, 1988; Schulz et al., 2009; Van Asch et al., 2007; Conte y Troncone, 2011).

Vulliet y Hutter, 1988 y Van Asch et al., 2007 plantean que a siguiente fórmula es la que mejor caracteriza la velocidad de los deslizamientos:

$$v = \frac{h_m}{\eta_0} (\tau - \tau_0)^b$$

*Ecuación 27*

Donde  $(\tau - \tau_0)$  es la variación del esfuerzo cortante con el tiempo,  $b$  es la variación de la viscosidad con el esfuerzo cortante y  $\eta_0$  es la viscosidad intrínseca del material.

### 1.4.8 Limitaciones de los modelos para estimar la amenaza

De la revisión de literatura se puede concluir que, para los modelos de análisis tanto de la magnitud como de la intensidad de los movimientos de ladera, la disponibilidad de datos es un factor que limita su aplicación a nivel regional. En este contexto, los modelos probabilistas pueden ser una opción promisoriosa para reducir la incertidumbre aleatoria de los datos de entrada, combinándolos con metodologías para reducir la incertidumbre epistemológica (Raia et al., 2013; Corominas et al., 2014). Para reducir esta incertidumbre epistemológica el criterio experto sigue siendo un insumo fundamental para interpretar los fenómenos y seleccionar el modelo más apropiado (Corominas et al., 2014; Reichenbach et al., 2018). Por ejemplo, los modelos de análisis de la intensidad de la caída de rocas, que desde un punto de vista conceptual aplican estrictamente el marco de análisis para la amenaza de movimientos de ladera (Corominas et al., 2005; Hürlimann et al., 2006; Agliardi et al., 2009; Lari et al., 2014) (Ecuación 10), requieren de simplificaciones muy importantes para su aplicación, como asumir que las relaciones magnitud-frecuencia a nivel de regional pueden aplicarse a laderas específicas (Lari et al., 2014).

La complejidad óptima de los modelos predictivos se relaciona con los datos disponibles. El gráfico anexo (Figura 12) ilustra este concepto (Grayson et al., 2002). Partiendo de una disponibilidad de datos determinada al incrementar la complejidad del modelo se obtiene un

mejor resultado predictivo hasta alcanzar un nivel óptimo, representando por el parteaguas del gráfico. A partir de este nivel óptimo al incrementar la complejidad del modelo sin aumentar la disponibilidad de datos la capacidad predictiva se reduce. Esto es un resultado del incremento de la incertidumbre epistemológica asociada al modelo, al incrementar las variables y las relaciones que se analizan, pero sin contar con mayor cantidad y calidad de datos (Grayson et al., 2002; Glade y Crozier, 2005). Esta es una tendencia que se identifica en el análisis realizado de los modelos para estimar la amenaza de los movimientos de ladera, donde se aprecia recientemente un incremento en la complejidad de los modelos, con el uso por ejemplo de modelos hidrogeológicos distribuidos combinados con modelos de estabilidad, pero donde la calidad de datos de entrada no se ha mejorado sustancialmente, con lo que se podría perder capacidad predictiva (Reichenbach et al., 2018).

Por otro lado se identifica que existe una gran abundancia de metodologías, pero una falta de estandarización que dificulta la comparación entre diferentes métodos y prácticas (Chung y Fabbri, 2003; Reichenbach et al., 2018).

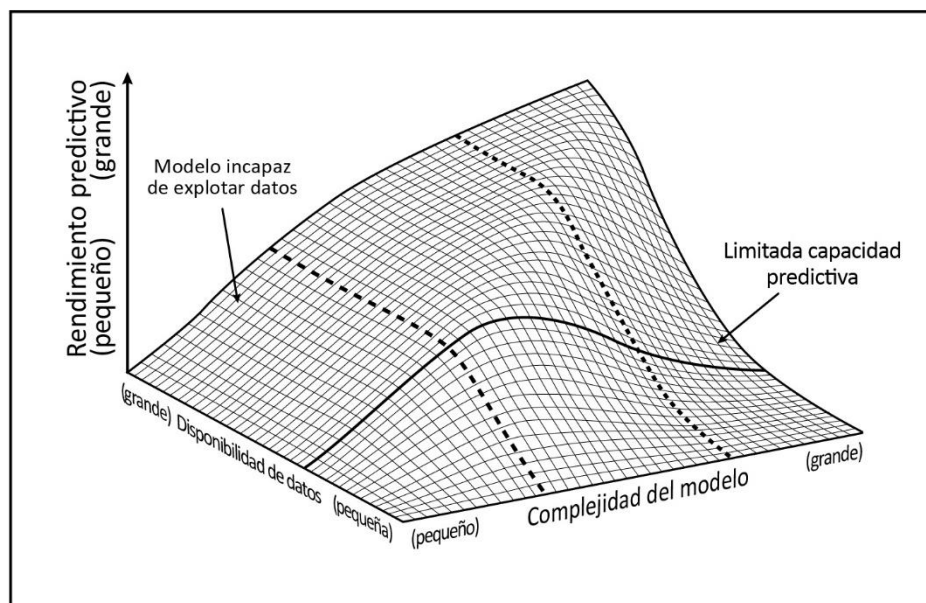


Figura 12. Complejidad óptima de los modelos predictivos. El parteaguas en la figura tridimensional corresponde al nivel óptimo de complejidad del modelo. Adaptado de Grayson et al. (2002).

#### 1.4.9 Precisión de los modelos de probabilidad

Como se plantea en el apartado 1.4.4 en lo referente a los análisis de la probabilidad espacial de los movimientos de ladera y se desarrolla en los apartados 1.4.5, 1.4.6 y 1.4.7 en lo relativo los distintos componentes de la estimación de la amenaza, dos de las principales limitaciones de los modelos son (Chung y Fabbri, 2003, 2012; Reichenbach et al., 2018): (i) la sobre-simplificación de los datos de entrada, al emplear para el análisis únicamente las variables explicativas que son más fáciles de obtener, como la litología y la pendiente y (ii) la falta de validación de los resultados predictivos.

El uso de modelos basados en variables con poca capacidad explicativa es una problemática generalizada. Progresivamente los modelos de análisis se han ido refinando gracias al aumento en las capacidades de procesamiento y creación de nuevos softwares de procesamiento de datos, incluyendo recientemente la aplicación de técnicas de “*machine learning*” (Reichenbach et al., 2018). Sin embargo, el poder explicativo de cualquier modelo será siempre limitado si las variables consideradas no son las que caracterizan con mejor precisión el fenómeno a analizar (Chung y Fabbri, 2012; Reichenbach et al., 2018). En este contexto, una apropiada validación de los resultados es fundamental para evaluar la pertinencia de introducir nuevas variables o

nuevos modelos de análisis, así como para poder comunicar la precisión de los resultados (Beguería, 2006).

#### 1.4.9.1 Técnicas para comparar inventarios de movimientos de ladera

Los inventarios de movimientos de ladera son la base principal para la aplicación de los métodos estadísticos de análisis de susceptibilidad a los movimientos de ladera, así como para la validación de todos los métodos de estimación de la amenaza a los movimientos de ladera (Guzzetti et al., 2012). Sin embargo, a pesar de ser un insumo fundamental para el análisis de la amenaza y el riesgo a estos eventos no existen estándares para evaluar su precisión. Algunos de los factores que condicionan la precisión de los inventarios son (Guzzetti et al., 2012; Fiorucci et al., 2018): (i) la escala y calidad de las fotos aéreas o imágenes satelitales, (ii) el tipo, escala y calidad del mapa topográfico o modelo digital de elevaciones usados como base, (iii) las herramientas como lo estereoscopios usados para el análisis y (iv) las habilidades y experiencia del geomorfólogo.

Los métodos para comparar mapas de inventarios de movimientos de ladera pueden clasificarse en métodos *directos* e *indirectos* (Gorum et al., 2011). Los métodos de comparación *directa* se basan en una evaluación de la coincidencia cartográfica entre pares de inventarios (Galli et al., 2008; Gorum et al., 2011) e incluyen: (i) El cálculo del error de mapeo general, utilizando la metodología propuesta por Carrara et al., 1992 y (ii) la estimación del número de deslizamientos que coinciden entre inventarios (Galli et al., 2008; Rosi et al., 2018). Los enfoques de comparación *indirecta* incluyen la comparación de densidades de deslizamientos entre inventarios (Galli et al., 2008; Gorum et al., 2011; Rosi et al., 2018), los análisis estadísticos de área y frecuencia (Galli et al., 2008; Malamud et al., 2004; Fiorucci et al., 2011) y la comparación de la capacidad explicativas de mapas de susceptibilidad elaborados con la misma técnica, pero empleando como base diferentes inventarios (Galli et al., 2008).

La estimación del error general de mapeo (Carrara et al., 1992) es una de las técnicas más utilizadas para la comparación entre pares de movimientos de ladera (Galli et al., 2008; Fiorucci et al., 2011; Mondini et al., 2014). Dicha metodología se basa en la siguiente ecuación:

$$Error = \{(A \cup B - A \cap B) / A \cup B\} \times 100$$

Ecuación 28

Donde  $A \cup B$  es la unión entre los dos inventarios que son comparados y  $A \cap B$  es la intersección entre los dos inventarios.

Diversos estudios que han realizado comparaciones del error de mapeo entre inventarios de movimientos de ladera realizados en las mismas zonas han encontrado diferencias muy significativas entre los distintos inventarios, con valores de error en el rango de 66-81% (Carrara et al., 1992; Galli et al., 2008; Fiorucci et al., 2011; Mondini et al., 2014). La subjetividad implícita en la identificación de los movimientos de ladera activos ha sido identificada por algunos estudios como una de las principales causas de estas diferencias (Carrara et al., 1992; Van Westen et al., 2008).

#### 1.4.9.2 Análisis de la capacidad explicativa de las variables

El análisis de la capacidad explicativa de las variables permite seleccionar las más adecuadas para los análisis de la probabilidad espacial de los movimientos de ladera. Uno de los métodos empleados con mayor frecuencia para este propósito, cuando se trata de variables categóricas, es el método del peso de la evidencia (Bonham-Carter, 1994; Lee et al., 2002; Van Westen et al., 2003; Reichenbach et al., 2018; Yan et al., 2019).

Este método permite estimar la importancia de cada variable categórica para explicar la distribución espacial de los movimientos de ladera.

Para realizar este análisis el método plantea estimar dos factores  $W_i^+$  y  $W_i^-$ .

$W_i^+$  representa la importancia de una categoría (por ejemplo, un tipo de litología en una capa de geología) para explicar la existencia de movimientos de ladera y  $W_i^-$  representa la importancia de esa categoría para explicar la ausencia de movimientos de ladera. Cuanto mayor es el valor positivo de estos factores mayor es su capacidad para explicar la existencia o ausencia de movimientos.

Para estimar estos factores se construye una matriz de confusión (Beguería, 2006) con los valores del número de píxeles ( $Npix$ ) para cada una de las posibles combinaciones entre cada categoría de una capa temática y la capa de movimientos de ladera (Tabla 4).

Tabla 4. Posibles combinaciones de una categoría de una capa temática y el inventario de movimientos de ladera.  $Npix_n$  es número de píxeles (Van Westen et al., 2003)

		Categoría capa temática	
		Presente	Ausente
Capa de deslizamientos	Presente	$Npix_1$	$Npix_2$
	Ausente	$Npix_3$	$Npix_4$

A partir de las estimaciones de estos valores del número de píxeles se obtienen los factores  $W_i^+$  y  $W_i^-$ , con las siguientes ecuaciones:

$$W_i^+ = \log_e \frac{\frac{Npix_1}{Npix_1+Npix_2}}{\frac{Npix_3+Npix_4}{Npix_3+Npix_4}} \quad W_i^- = \log_e \frac{\frac{Npix_2}{Npix_1+Npix_2}}{\frac{Npix_3+Npix_4}{Npix_3+Npix_4}}$$

Ecuación 29

Para obtener un valor único que permitiera valorar la capacidad explicativa de cada categoría Van Westen et al. (2003) plantean sumar el valor  $W_i^+$  de una determinada categoría (ejemplo una litología dentro de una capa de geología) con el resto de valores  $W_i^-$  de toda la capa, dado que la presencia de esta categoría implica la ausencia de las otras categorías en el mismo mapa.

### 1.4.9.3 Análisis del poder explicativo de los mapas de susceptibilidad

Una de las metodologías que se aplica con más frecuencia para analizar el poder predictivo de los mapas de susceptibilidad son las matrices de confusión. Dentro de una revisión de literatura reciente de análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera (Reichenbach et al., 2018) es clasificado como el segundo método más utilizado para evaluar los resultados predictivos de los mapas de susceptibilidad. Dicho método se basa en construir una matriz de este tipo (Beguería, 2006):

Tabla 5. Matriz de contingencia para deslizamientos. Adaptado de Beguería (2006).

Predicho	Observado	
	Deslizamiento	Sin deslizamiento
Deslizamiento	$a$	$b$
Sin deslizamiento	$c$	$d$

En esta matriz “a” corresponde a verdaderos positivos, “b” a píxeles con error tipo I, es decir falsos positivos, “c” corresponde a error tipo II, falsos negativos, y “d” a verdaderos negativos. A partir de estas combinaciones se obtienen una serie de variables estadísticas que se emplean para analizar la precisión del modelo.

Tabla 6. Medidas de precisión obtenidas de la matriz de confusión. Adaptado de Beguería (2006).

Medida	Fórmula	Descripción
--------	---------	-------------

Eficiencia	$(a+d)/N$	Proporción de observaciones clasificadas correctamente
Ratio de clasificación errada	$(b+c)/N$	Proporción de observaciones clasificadas incorrectamente
Ratio de posibilidad	$(a+d)/(b+c)$	Ratio entre casos clasificados correcta e incorrectamente
Poder predictivo positivo	$a/(a+b)$	Proporción de verdaderos positivos en el total de las predicciones positivas
Poder predictivo negativo	$d/(c+d)$	Proporción de verdaderos negativos en el total de las predicciones negativas

Para poder aplicar estas matrices se requiere segmentar los valores de susceptibilidad, definiendo un umbral, para comparar los resultados entre las áreas consideradas de alta y baja susceptibilidad. La definición de estos umbrales puede llevar a errores importantes, dado que no existe una metodología óptima para hacerlo (Beguería, 2006). Algunos autores recomiendan aplicar modelos de validación continuos para evitar errores inducidos por la segmentación, como el método de la curva de la ratio de predicción y el método ROC (Relative Operative Characteristics) (Beguería, 2006).

Método de la curva de ratio de éxito/predicción. El método más utilizado para medir el significado de los resultados predictivos de los mapas de susceptibilidad (Reichenbach et al., 2018) es el método de la curva de ratio de éxito/predicción (Chung y Fabbri, 2003). Este método consiste en construir curvas acumuladas que relacionan la proporción del área de deslizamientos con el área del modelo de susceptibilidad, acumulado de mayor valor del modelo (mayor probabilidad de deslizamientos) a menor probabilidad (Lee et al., 2002; Remondo et al., 2003; Jaiswal et al., 2010; García-Urquía y Yamagishi, 2017). El principio en que se basan dichas curvas es que si acumulara aleatoriamente la superficie predictiva un 10% del área explicaría un 10% de los deslizamientos, es decir la pendiente de la curva sería 1. Cuanto mayor sea la pendiente de la curva, mayor es la capacidad predictiva del modelo en ese tramo. De igual forma cuanto mayor es el área bajo la curva mayor es la capacidad predictiva del modelo (conocida como AUC, por sus siglas en inglés, Area Under the Curve). Esta técnica permite analizar para un mapa de susceptibilidad cuales son los rangos de valores de susceptibilidad que concentran la capacidad explicativa del modelo (en función de la pendiente de la curva) y también permite comparar distintos modelos. Una variación de esta técnica es la construcción de la curva de ratio de predicción, donde se construye una curva idéntica a la curva de éxito, pero para medir la bondad del ajuste con un grupo de deslizamientos que no fueron utilizados en la construcción de la curva (Chung y Fabbri, 2003).

Método ROC. El método ROC (Beguería, 2006; Jaiswal et al., 2010; Yan et al., 2019) es un método similar al método de la curva de la ratio de éxito/predicción. Este método es el tercero más utilizado para comparar la capacidad predictiva de mapas de susceptibilidad a deslizamientos (Reichenbach et al., 2018). El método consiste en construir curvas que relacionan el porcentaje de verdaderos positivos en el eje de ordenadas (lo que se conoce como especificidad) con el porcentaje de verdaderos negativos en el eje de abscisas (o 1 menos el valor de los falsos positivos), acumulados de mayor a menor valor del modelo. El área bajo la curva se utiliza como parámetro para comparar la bondad de las distintas clasificaciones.

#### 1.4.9.4 *Análisis de sensibilidad*

El análisis de sensibilidad permite establecer cómo la incertidumbre en los resultados de un modelo (numérica o de otro tipo) se relacionan con la incertidumbre de las variables de entrada del modelo (Saltelli et al., 2008).

Estos análisis se realizan manteniendo algunas de las variables del modelo como fijas y modificando de forma aleatoria una o varias variables de interés, que se considera que son relevantes para explicar los resultados del modelo. El número de variables a modificar debe ser

limitado, pues si se varía un número demasiado grande de variables la propia dispersión de los resultados dificulta su interpretación (Saltelli et al., 2008). Para poder modificar los valores de la variable de forma aleatoria se aplica generalmente la simulación de Montecarlo.

Una de las formas de interpretar los resultados de estos análisis de sensibilidad son los gráficos de dispersión, que permiten comparar de forma visual la importancia de distintas variables para los resultados del modelo. Otras metodologías para interpretar los resultados son los coeficientes de correlación y los métodos basados en el análisis de la varianza (Saltelli et al., 2008).

#### *1.4.10 Caracterización de la vulnerabilidad*

El desarrollo de las funciones de fragilidad/daño/vulnerabilidad para movimientos de ladera ha sido muy limitado (Papathoma-Köhle et al., 2011; Zêzere et al., 2008; Guillard-Goncalves et al., 2016). En este contexto de limitados avances, en la literatura se identifican un mayor número de estudios que han desarrollado funciones de fragilidad y daño/vulnerabilidad para flujos de detritos y caída de rocas comparativamente con los estudios para deslizamientos traslacionales y rotacionales (Papathoma-Köhle et al., 2011), que son los tipos de movimientos de ladera en que se enfoca el presente trabajo de investigación. Dentro de las limitaciones para el desarrollo de funciones de fragilidad y daño/vulnerabilidad se identifica, por un lado, la dificultad para caracterizar la intensidad, analizada en el apartado referente a las amenazas y, por otro, la escasez de datos empíricos de los daños generados por los deslizamientos (Bonachea Pico, 2006; Zêzere et al., 2008; Corominas et al., 2014; Guillard-Goncalves et al., 2016).

##### *1.4.10.1 Funciones de daño para flujos de detritos*

Existen diversos estudios que han desarrollado funciones de daño para flujos de detritos, a partir de datos empíricos de eventos. En la mayor parte de estos estudios los valores de la RMD promedio para cada valor de intensidad, caracterizada por la altura del depósito del flujo de detritos, se obtienen a partir de datos empíricos de eventos y se realiza el ajuste a una curva (Fuchs et al., 2007; Akbas et al., 2009; Lo et al., 2012; Ciurean et al., 2017). En otros estudios el valor de la vulnerabilidad física ante flujos de detritos se ha estimado siguiendo criterio experto (Künzler et al., 2012; Ciurean et al., 2017).

##### *1.4.10.2 Estimación de la vulnerabilidad física por caída de rocas*

Los estudios de análisis de la vulnerabilidad física de la caída de rocas aplican dos tipos de enfoques principales: (i) elaboración de matrices de daño con base en datos empíricos y criterio experto (Corominas et al., 2005; Agliardi et al., 2009) y (ii) desarrollo de funciones de fragilidad construidas con modelos paramétricos que analizan la energía cinética como la variable para estimar la intensidad (Mavrouli y Corominas, 2010a, 2010b; Mavrouli et al., 2014).

##### *1.4.10.3 Funciones de fragilidad/daño y vulnerabilidad para deslizamientos*

El desarrollo de funciones de fragilidad/daño y vulnerabilidad para deslizamientos ha sido muy limitado. Se describen a continuación algunos ejemplos.

Funciones de fragilidad para desplazamientos del terreno desarrolladas siguiendo criterio experto y datos empíricos. Aunque no son propiamente funciones de fragilidad para movimientos de ladera, las funciones de fragilidad desarrolladas por HAZUS con criterio experto para relacionar el desplazamiento permanente del terreno con el estado de daño de edificaciones (FEMA, 2011a) y las curvas empíricas de fragilidad de edificaciones ante desplazamientos del terreno (Zhang y Ng, 2006), han sido utilizadas como referencias de curvas de fragilidad para deslizamientos (Negulescu y Foerster, 2010).

Funciones de daño empíricas para deslizamientos. La disponibilidad de datos empíricos que sustentan la construcción de funciones de daños para deslizamientos es muy limitada (Guzzetti

et al., 2006; Papathoma-Köhle et al., 2011; Galve et al., 2016; Guillard-Goncalves et al., 2016; Pereira et al., 2017). Una simplificación que se aplica en algunos estudios es que todas las estructuras que se encuentran sobre un deslizamiento van a colapsar, sin embargo, los estudios empíricos demuestran que esta simplificación es excesiva (Galli y Guzzetti, 2007). Uno de los pocos estudios de funciones de daño empíricas para deslizamientos es el estudio de Galli y Guzzetti, 2007, que desarrolló funciones de daño a partir de datos empíricos, utilizando el área de los movimientos como un aproximación para caracterizar la intensidad del movimiento. Mansour et al. (2011), recopilaron estudios que caracterizan la velocidad desplazamiento de los deslizamientos y la relacionan con los daños a distintos tipos de estructuras. En la mayor parte de los estudios de riesgo por deslizamientos no se construyen funciones de daño, sino que se utilizan valores promedio del daño para cada infraestructura expuesta, definidos según una combinación de datos empíricos y conocimiento experto (Zêzere et al., 2008; Galve et al., 2016; Pereira et al., 2017).

Funciones de fragilidad para deslizamientos basadas en modelos físicos. Con base en métodos para construcción de funciones de fragilidad para la amenaza sísmica se han elaborado funciones de fragilidad para deslizamientos utilizando modelos físicos (Negulescu y Foerster, 2010; Mavrouli et al., 2014). Dichos modelos construyen las curvas de fragilidad a partir de la modelación del estado de daño asociado con diferentes valores de desplazamiento horizontal para una tipología particular de edificación (Negulescu y Foerster, 2010). La modelación se realiza aplicando métodos de análisis desarrollados para caracterizar el daño asociado a asentamientos diferenciales usando software para modelación de respuesta no lineal de estructuras a sismos (Negulescu y Foerster, 2010; Mavrouli et al., 2014). Los resultados obtenidos de las modelaciones se ajustan a una función estadística acumulada de tipo log-normal aplicando la Ecuación 5 (Negulescu y Foerster, 2010; Mavrouli et al., 2014).

#### 1.4.11 Caracterización del riesgo

El riesgo (expresado en términos de pérdidas probables) asociado a un escenario de movimientos de ladera específico se expresa como (Corominas et al., 2014):

$$R = P(M_i)P(X_j|M_i) P(T|X_j)V_{ij}C$$

*Ecuación 30*

Donde  $R$  son las pérdidas probables ocasionadas por el movimiento de ladera considerado,  $P(M_i)$  es la probabilidad de que se produzca el deslizamiento de magnitud  $M_i$ ,  $P(X_j|M_i)$  es la probabilidad de que el deslizamiento de magnitud  $M_i$  alcance el punto  $X$  con una intensidad  $j$ ,  $P(T|X_j)$  es la probabilidad de que un elementos considerado esté en el punto  $X$  en el momento de ocurrencia del movimientos de ladera,  $V_{ij}$  es la vulnerabilidad el elemento al deslizamiento de magnitud  $i$  e intensidad  $j$  y  $C$  es el valor del elemento en riesgo.

Considerando que el presente trabajo de investigación se enfoca en la estimación del riesgo asociado a deslizamientos traslaciones y rotaciones en la zona de estudio, este apartado se enfoca en el estado del arte de la estimación de este tipo de riesgo.

##### 1.4.11.1 Riesgo asociado a deslizamientos traslaciones y rotacionales

Como se ha desarrollado en los capítulos referentes a la amenaza y vulnerabilidad a los movimientos de ladera, en el caso de los deslizamientos rotaciones y traslacionales los distintos componentes de la estimación del riesgo se caracterizan por incertidumbres epistemológicas y aleatorias que dificultan su estimación (Ciurena et al., 2013; Guillard-Gonçalves et al., 2016).

Dentro de las incertidumbres epistemológicas se encuentran las relacionadas con las simplificaciones realizadas para caracterizar la intensidad/magnitud de los movimientos o los modelos empleados para caracterizar la respuesta a las estructuras.

Las incertidumbres aleatorias se relacionan con la variabilidad: (i) asociada a la intensidad/magnitud del movimiento y (ii) a la respuesta de las infraestructuras que se localizan sobre los deslizamientos.

La variabilidad asociada a la intensidad/magnitud del movimiento es particularmente notable en deslizamientos lentos. Aunque el deslizamiento en su conjunto se esté desplazando, la velocidad puede ser diferente dependiendo de las distintas zonas del mismo (Crozier y Glade, 2005b; Guillard-Goncalves et al., 2016) (Figura 9).

La variabilidad en la respuesta de las infraestructuras que se localizan sobre los deslizamientos. Las infraestructuras que se localizan sobre un deslizamiento pueden sufrir diferentes daños dependiendo de su localización en el movimiento y de la profundidad de este (Crozier y Glade, 2005b; Van Westen et al., 2006; Guillard-Gonçalves et al., 2016). Si el movimiento se produce a una profundidad menor que los cimientos de la estructura pueden generar el colapso y desplazamiento de esta. En el caso de que la estructura intersecte una zona de cizalla del terreno se puede producir un desplazamiento relativo de la misma y eventualmente su colapso. Por otro lado, si el deslizamiento se produce en bloques prácticamente sin deformación, la estructura se puede desplazar, pero sin daños.

En los estudios de análisis de riesgo de deslizamientos identificados no se emplean funciones de daño o fragilidad/vulnerabilidad, sino valores promedio de daño por tipo de infraestructura (Zêzere et al., 2008; Galve et al., 2016; Guillard-Gonçalves et al., 2016; Pereira et al., 2017). Por otro lado, no se realiza un tratamiento de la incertidumbre asociada a la respuesta de las infraestructuras y, aunque se realizan cálculos para escenarios de amenaza específicos, pero no se construyen curvas de excedencia de pérdida ni se estiman parámetros como la Pérdida Anual Esperada. Se concluye que el estado del arte de la estimación del riesgo por deslizamientos aún está en una etapa de desarrollo incipiente, debido en gran medida a las dificultades implícitas para la estimación de la intensidad y la carencia de datos empíricos de daños (Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014; Galve et al., 2016; Pereira et al., 2017), aspectos que se han analizado con detalle en los apartados 1.4.6, 1.4.7 y 1.4.10.3.

#### *1.4.12 ACB de las medidas de reducción del riesgo*

Los estudios de ACB para movimientos de ladera son particularmente escasos en la literatura, lo que se vincula con las dificultades e incertidumbres inherentes a la modelación del riesgo asociado a los movimientos de ladera (Van Westen et al., 2006; Anderson et al., 2011; Holcombe et al., 2011; Papathoma-Köhle et al., 2011; Corominas et al., 2014; Galve et al., 2016). El estudio de Holcombe et al. (2011) analiza diversos escenarios de pérdidas asociadas a movimientos de ladera y los beneficios asociados a medidas de reducción del riesgo empleando el programa CHASM (Combined Hydrology And Stability Model) y realiza un ACB, obteniendo relaciones beneficio costo del orden de 2.7. Sin embargo, los supuestos para definir los efectos de las medidas se basan en criterio experto, lo que dificulta su generalización. En el estudio de Galve et al. (2016) se realiza el ACB de medidas para estabilizar las laderas por medio de terrazas y reforestación en una cuenca de 5,7 km<sup>2</sup> en el Noroeste de Italia, encontrando que la reforestación es la única medida costo/eficiente en términos de reducir el riesgo de movimientos de ladera. Este estudio muestra la necesidad de definir un número importante de supuestos para poder subsanar las incertidumbres asociadas a la estimación del riesgo a movimientos de ladera.

Los estudios de evidencia empírica de los beneficios de las intervenciones en reducción del riesgo de movimientos de ladera, que son uno de los insumos para los ACB, son escasos



(Mechler, 2016). Un estudio particularmente relevante es el de Anderson et al. (2011). Dicho estudio documenta la evidencia empírica del beneficio de medidas de estabilización de ladera en asentamientos informales en Dominica y Santa Lucía. Las medidas consisten en sistemas de drenaje que capturan las aguas de lluvia y aguas grises y evitan que infiltren en zonas propensas a deslizamientos. La evidencia empírica muestra que los sistemas evitaron por completo que se produjeran movimientos de ladera asociados con lluvias con periodos de retorno en torno a 5 años y, para periodos de retorno de unos 50 años, evitaron la mayor parte de los movimientos.

## **1.5 Motivación y objetivos**

La motivación que ha propiciado la realización de esta tesis doctoral es que, a pesar de la frecuente ocurrencia en el MDC de inestabilidades del terreno que ocasionan pérdidas significativas de vidas humanas, lesiones, y destrucción de viviendas, el municipio no cuenta con un dimensionamiento y análisis de la distribución espacial de las pérdidas probables por movimientos de ladera que permita identificar las acciones más eficientes para la reducción de este riesgo. Así, las principales preguntas de investigación son:

¿Cuáles son las variables con mayor capacidad explicativa de la distribución espacial de los movimientos de ladera en el MDC?

¿Cuáles son las metodologías aplicables para modelar los movimientos de ladera en el MDC?

¿Cuáles son las funciones de vulnerabilidad que permiten correlacionar las variables de intensidad de los movimientos de ladera en el MDC y los daños a las estructuras y cuál es su incertidumbre?

¿Cuál es el valor de las pérdidas económicas probables asociadas a movimientos de ladera en el MDC y donde se concentran?

¿Cuáles son las acciones más eficientes para reducir el riesgo de movimientos de ladera en el MDC?

### **1.5.1 Objetivo General**

Elaborar una cartografía que recoja la distribución espacial de las pérdidas probables ocasionadas por movimientos de ladera y que permita identificar acciones eficientes para la reducción de este riesgo en el MDC de Honduras.

### **1.5.2 Objetivo Específicos**

- i) Identificar los depósitos de coluvión presentes en el MDC, caracterizando su relación con los movimientos de ladera.
- ii) Evaluar la probabilidad de ocurrencia de movimientos de ladera en el MDC.
- iii) Cuantificar y representar espacialmente las pérdidas económicas probables asociadas a movimientos de ladera en el MDC.
- iv) Desarrollar y evaluar la incertidumbre de funciones de vulnerabilidad para viviendas ante movimientos de ladera.
- v) Proponer acciones eficientes para reducir el riesgo de movimientos de ladera en el MDC.

## **1.6 Zona de estudio**

### **1.6.1 Descripción geográfica**

El MDC está ubicado en el centro de Honduras, en un altiplano, con una altitud que oscila entre los 900 y los 1.240 m sobre el nivel del mar. El municipio se caracteriza por pendientes pronunciadas, con un 62% del área caracterizada por pendientes superiores al 20% (BID, 2015). El área de estudio cubre 260 km<sup>2</sup> e incluye toda la mancha urbana del MDC.

Dicho municipio se caracteriza por presentar un clima tropical templado con temperaturas y precipitaciones medias de 22° y 870 mm (BID, 2015). La precipitación se concentra en una sola estación lluviosa entre mayo y octubre (Argeñal, 2010; García-Urquía, 2016), con un periodo de disminución de la precipitación entre julio-agosto, conocido como la canícula (Argeñal, 2010). El 82% de la zona de estudio está prácticamente desprovista de vegetación, caracterizándose por una cobertura que combina áreas urbanas (33%), zonas agropecuarias con vegetación muy escasa (22%), bosques de pinos ralos (19%), matorrales (8%) y zonas agroindustriales (1%) (ICF, 2018). El restante 18.4% del área de la zona de estudio por una combinación de bosques de pino (17.8%) y mixtos y latifoliados (0.6%), bosques que se sitúan en la periferia de la zona.

Tiene una población de 1,240,000 habitantes en un área de 200 km<sup>2</sup>, con una densidad de población de 6,200 habitantes/km<sup>2</sup> (BID, 2015). El 49% de la población vive en asentamientos informales en áreas con fuertes pendientes propensas a movimientos de ladera (BID, 2015). La ciudad se caracteriza por niveles significativos de inseguridad ciudadana, con altas tasas de homicidios y robos (BID, 2015), que hacen que el trabajo de campo sea extremadamente difícil. El área urbana del MCD ha experimentado un crecimiento acelerado en los últimos años, especialmente en los barrios marginales ubicados en las laderas de la periferia de la expansión urbana.

### 1.6.2 Viviendas en el MDC

En el presente estudio, el análisis del riesgo de desastre asociado a los movimientos de ladera se centrará en las viviendas, por lo que se incluye una caracterización de sus principales características a continuación.

Sistema constructivo en la zona de estudio. En el MDC, predominan las viviendas de un solo piso, la construcción de vivienda en varios niveles es aún muy escasa (BID, 2015). Se cuenta con datos censales a nivel del material de las paredes para todo el MDC correspondientes al censo nacional del año 2001 (INE, 2001). Con base en dicho censo (Tabla 7) se aprecia que el material predominante de las paredes de las viviendas es el ladrillo (57%), seguido de madera (18%), bloque (17%) y otros materiales (8%), que engloban adobe y otras técnicas de construcción con tierra, así como construcciones precarias con materiales como lámina de zinc.

Tabla 7. Materiales de las viviendas en el MDC. Datos obtenidos de los resultados a nivel de aldea para el censo 2001. Fuente: INE (2001).

	Materiales de las paredes				Total
	Ladrillo	Bloque	Madera	Otros materiales	
Número de viviendas	105.483	31.852	34.027	15,278	186.640
%	57%	17%	18%	8%	100%

La clase social. Como parte del estudio de BID (2015) se realizó una zonificación del MDC en unidades homogéneas. Las unidades incluyen elementos como el tipo de uso (áreas residenciales, áreas de servicios o usos mixtos), la morfología del terreno, la estructura vial y el tipo del barrio en función de la calidad de la vivienda, definiendo cuatro categorías: residencial, clase media, popular y precaria. El estudio asocia estos tipos de barrios con datos censales del número de viviendas para el año 2001 y proyectados para 2014, con porcentaje de área construida y con valores económicos por m<sup>2</sup> de construcción (Tabla 8). Adicionalmente, el estudio describe barrios tipo para cada una de las categorías y establece los porcentajes de área construida y el tamaño de los lotes y las viviendas para estos barrios tipo (Tabla 8). Se aprecia que las viviendas precarias y populares representan la mayor parte de la ciudad, un 82% y 76% para el censo 2001 y la proyección 2014, respectivamente. Por otro lado, destaca la diferencia significativa entre el valor económico del m<sup>2</sup> de las viviendas precarias y residenciales, siendo

casi 20 veces mayor el valor del m<sup>2</sup> en barrios residenciales que en las precarias. Se puede apreciar visualmente que los barrios donde predominan las viviendas precarias se localizan en la periferia de la mancha urbana (Figura 13).

Tabla 8. Indicadores de las vivienda por tipo de barrio. Fuente: BID (2015).

Tipo de barrio según calidad de vivienda	Viviendas censo 2001		Viviendas proyectadas a 2014		Tamaño promedio vivienda (m <sup>2</sup> )	Valor m <sup>2</sup> (Lps* 2014)
	Nº	%	Nº	%		
<b>Residencial</b>	11.589	6	18.638	9	> 250	28.106
<b>Clase media</b>	22.186	12	32.183	15	150	14.900
<b>Popular</b>	97.898	53	110.305	50	100	8.500
<b>Precaria</b>	52.706	29	57.391	26	40	1.450
<b>Total</b>	184.379	100	218.517	100		

(\*) Lps: Lempiras.

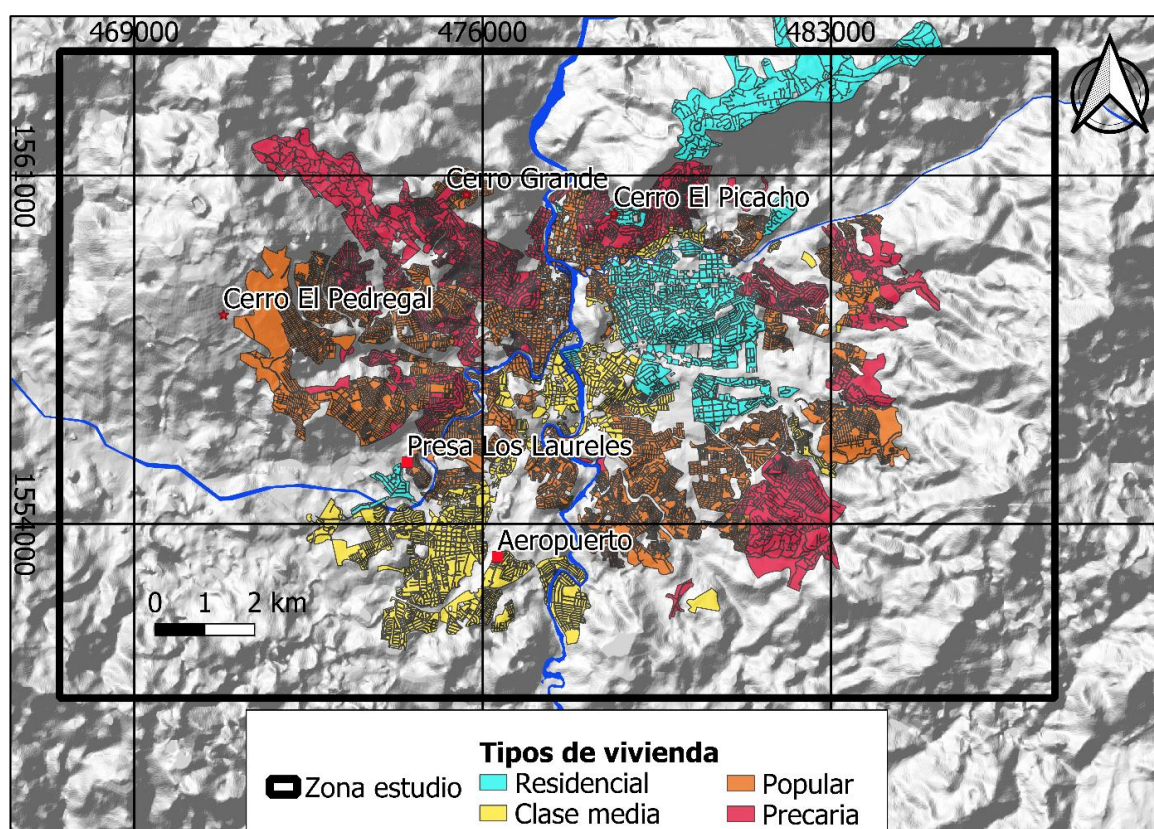


Figura 13. Tipos de barrios de la zona de estudio, según su calidad constructiva. Fuente BID (2015).

Adicionalmente el estudio del BID (2015) incluye una descripción de las características de las viviendas por tipo de barrio (Tabla 9).

Tabla 9. Descripción de las características de las viviendas por tipo de barrio. Fuente BID (2015).

Tipo de barrio	Características de las edificaciones
<b>Residencial</b>	Con piso (es decir el suelo de la vivienda), techo y paredes de materiales resistentes. Suelen construirse siguiendo el código de construcción
<b>Clase media</b>	Con materiales permanentes, resistentes y acabados de buena calidad
<b>Popular</b>	Edificaciones realizadas con materiales de construcción básicos, diseños sencillos y de escasa calidad, aunque se realizan con materiales permanentes en techos y paredes (en algunos casos autoconstruidas)
<b>Precario</b>	Materiales frágiles y de desecho en muros y/o techos y piso de tierra. Siempre producto de la autoconstrucción

Se concluye que en la zona de estudio predominan las viviendas precarias y populares y que, en general, los sistemas constructivos son relativamente homogéneos, predominando la construcción de viviendas de un solo piso, con mayor o menor calidad dependiendo de los barrios.

Datos de los daños causados por los deslizamientos a las viviendas en la zona de estudio. La ONG GOAL entre noviembre del año 2010 y marzo del 2011, realizó una encuesta en el MDC que incluye en sus variables los materiales de las viviendas y los daños. Dicha encuesta se desarrolló en 14 barrios de la ciudad para identificar viviendas que presentasen daños asociados a movimientos del terreno, con el fin de identificar familias que, dada la extensión del daño, pudieran precisar ser reubicadas.

### *1.6.3 Descripción geológica*

#### *1.6.3.1 Historia geológica*

Desde el punto de vista tectónico el MDC se encuentra localizado en la placa del Caribe, en lo que se conoce como el bloque Chortís, en concreto, en la zona denominada como terreno Sur del Bloque Chortís (Rogers, 2003). El núcleo del bloque Chortís lo constituye un fragmento de placa que se desprendió del sur de México al final del periodo Cretácico e inicio del Paleógeno, desplazándose unos 1.100 kilómetros, al tiempo que experimentaba una rotación en el sentido contrario al reloj, hasta alcanzar su posición actual. Sobre dicho bloque se sitúa el actual Arco Volcánico de Centroamérica. El bloque está dividido en 5 terrenos (Mann et al., 2007): (i) el terreno central cuyo basamento está constituido por terrenos de corteza precámbricos de edad Grenville, (ii) el terreno este, con basamento constituido por sedimentos jurásicos, (iii) el terreno Siuna, constituido por la acreción al bloque Chortís en el Cretácico tardío de rocas asociadas con el arco oceánico Guerrero-Caribe, (iv) el terreno Norte constituido por la sobreposición de rocas magmáticas y (v) el terreno Sur donde se sitúa el MDC, cuyo basamento está constituido por la acreción al terreno Central en el Cretácico tardío de un arco de isla. Aunque el basamento no aflora en ningún punto, debido la geoquímica del vulcanismo cuaternario que caracteriza al terreno Sur, que no presenta elementos que corresponden a la fusión de la corteza continental, se interpreta que este arco de isla representa un fragmento del terreno de Guerrero en México (Mann et al., 2007) .

El proceso de traslación del bloque Chortís y la tectónica regional se relacionan de forma directa con la geología y tectónica presente en el área de estudio. En relación al área de estudio consideramos particularmente relevantes los siguientes momentos:

#### *Jurásico Medio (165 MA)*

En esta etapa el bloque Chortís se encontraba en su posición original y se produce la subducción en dirección este de la placa Mezcalera hacia Centroamérica (Mann et al., 2007) (Figura 14). Asociada a dicha subducción se produjo un proceso orogénico de los materiales jurásicos, que se evidencia por la fuerte deformación de los sedimentos del grupo Honduras de edad Jurásica (que no afloran en la zona de estudio), y la inconformidad con los sedimentos Cretácicos tardíos del grupo Valle de Ángeles, que presentan un nivel menor de deformación (Viland et al., 1996).

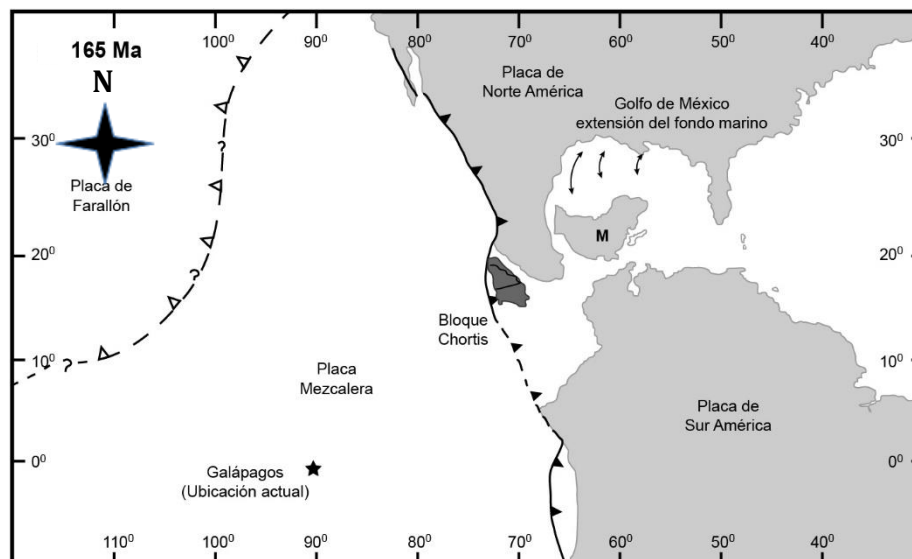


Figura 14. Situación de la cordillera oeste y el Caribe en el Jurásico tardío. Adaptado de Mann et al. (2007).

### Cretácico Inferior (144 MA)

En este momento se produce la apertura de un rift creando el proto-océano Caribe, mientras la placa de Farallón y el arco Caribe-Guerrero se desplazan hacia el este, colisionando de forma diacrónica con la placa de Norte América. Se crean zonas de deposición en los límites del bloque Chortís y en la placa de Mezcalera, donde se depositan durante el Cretácico Medio carbonatos (Mann et al., 2007).

### Cretácico Inferior (90 MA)

En esta etapa la placa de Farallón ha continuado su avance hasta el este y la zona de subducción se dispone con orientación NW-SE. La orogenia de edad Laramide, asociada con el desplazamiento de la zona de subducción y la acreción del arco Caribe-Guerrero al oeste de México y el margen oeste del bloque Chortís, generó la inversión de las cuencas intra-arco creando los 4 alineamientos que actualmente se reconocen en la deformación de las rocas sedimentarias cretácicas de Honduras (Mann et al., 2007). Simultáneamente a la colisión se produjo la deposición de los conglomerados y materiales detríticos rojos cretácicos de la formación Valle de Ángeles existentes en el área de estudio.

### 22 MA – presente

Las tensiones generan la rotura de la placa de farallón en las placas de Cocos y Nazca. La placa de Cocos subduce bajo el bloque Chortís y se detiene el desplazamiento al este del bloque Chortís (Figura 15). En este periodo Centroamérica se incorpora a la placa del Caribe y se forman una serie de fallas de strike-slip importantes en el límite entre el bloque Chortís y el bloque Maya (Jocotán-Chamelecón, Polochic, Motagua). Entre 14-10 Ma, asociado al proceso de subducción, se produce el vulcanismo explosivo que genera las ignimbritas y tobas de la formación Padre Miguel, localizadas en la zona de estudio. Posteriormente entre los 10-4 Ma se genera la fragmentación de la sección de la placa de Cocos que subduce bajo Centroamérica (Mann et al., 2007). La fragmentación y hundimiento de la placa, produciría el ascenso de material del manto generando un levantamiento epirogénico de la corteza que explicaría la existencia de una planicie con elevaciones mayores a 1000 metros a 400 km de la zona de subducción (Rogers et al., 2002), así como la existencia de vulcanismo basáltico cuaternario en Tegucigalpa inducido por la descompresión asociada al ascenso del material del manto (Carr et al., 2004). A partir de 3.8 Ma la parte superior de la placa de Cocos empezaría a subducir, iniciándose el proceso de subducción existente en la actualidad.

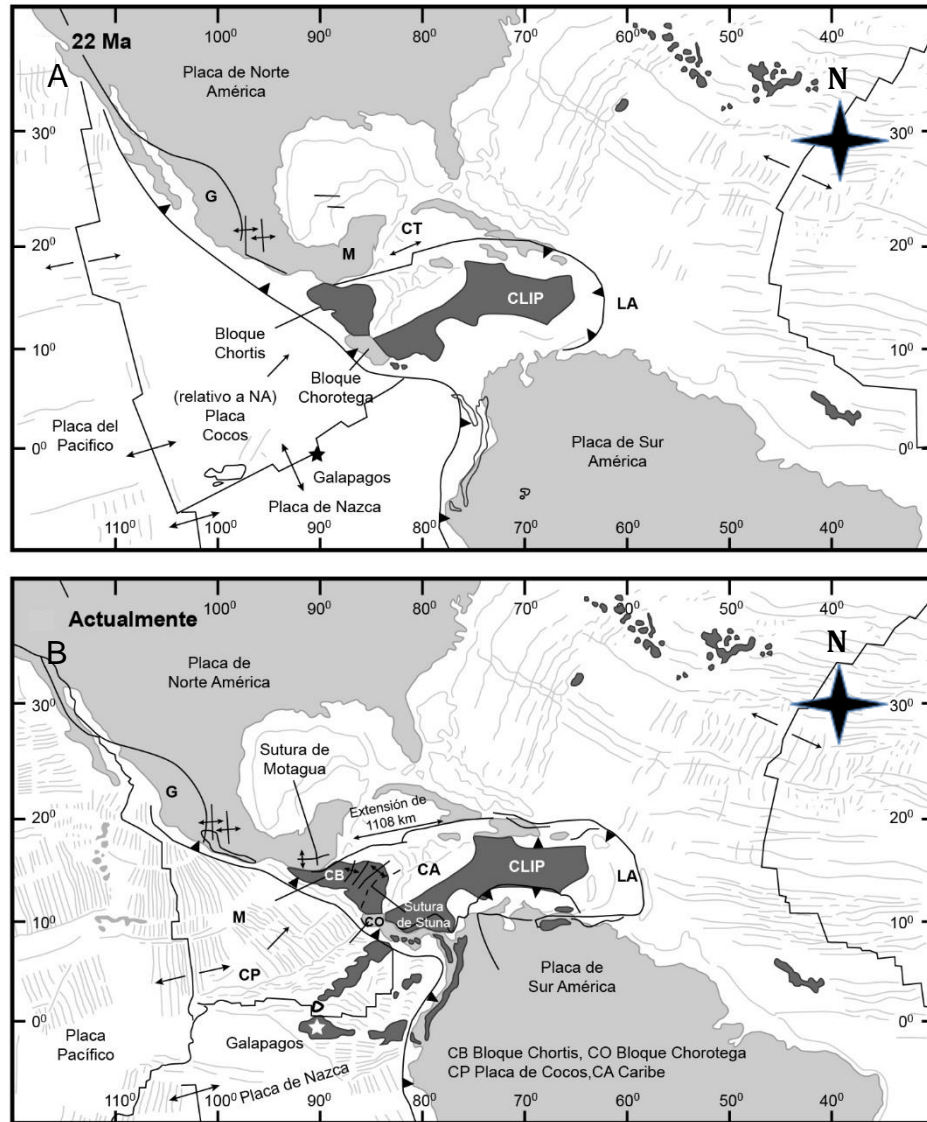


Figura 15. Evolución de la cordillera oeste y el Caribe desde hace 22MA (A) al presente (B). Adaptado de Mann et al. (2007).

Un elemento importante del contexto geológico de Tegucigalpa se relaciona con el vulcanismo cuaternario. Según Carr et al (2004), existen tres zonas dentro del vulcanismo del actual arco volcánico de Centroamérica: (i) el frente volcánico, (ii) la segunda línea y (iii) la zona tras el frente volcánico (*BVF* por sus siglas en inglés, *Behind Volcanic Front*), donde se sitúa Tegucigalpa (Figura 16). La zona frontal y la segunda línea presentan un vulcanismo asociado con la fusión de la placa subducente y ascenso del magma, con una geoquímica característica de este tipo de procesos, condicionada por los fluidos silícicos generados por la fusión de los sedimentos situados en la placa subducente, y con presencia de vulcanismo piroclástico explosivo. Por otro lado, la formación de la zona BVF se asocia con procesos de descompresión, con un magmatismo de tipo subcalcalino con presencia de andesitas y basaltos.

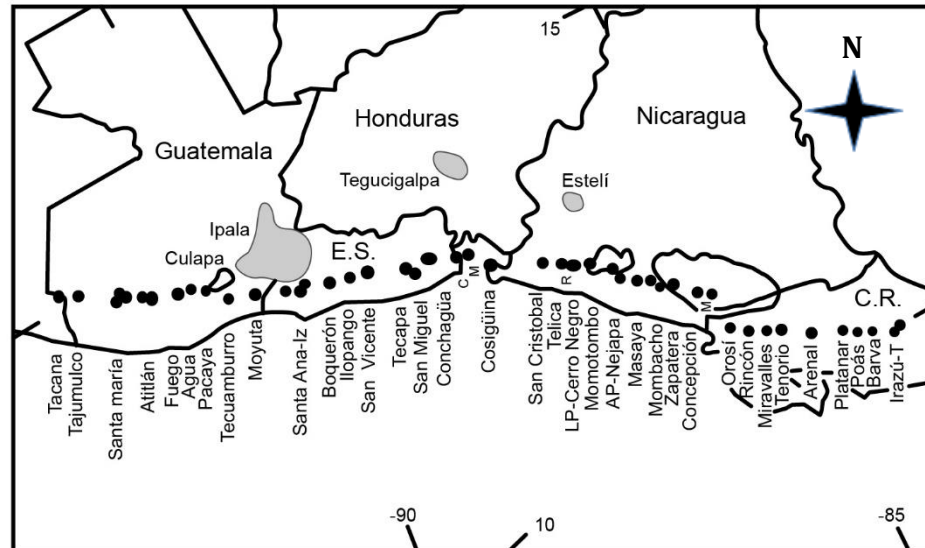


Figura 16. Localización de los centros volcánicos y los campos situados tras el frente volcánico. E.S.: El Salvador, C.R.: Costa Rica. En El Salvador, C: Conchagua, M: Meanguera. En Nicaragua R: Rota, M: Maderas. En Costa Rica, T: Turrialba. Las zonas grises corresponden a las extensiones aproximadas de los campos tras el frente volcánico con alta presencia de Titanio. Adaptado de Carr et al. (2004).

### 1.6.3.2 Estratigrafía

El estudio de la geología del MDC ha sido limitado. Dentro de los estudios existentes destaca el mapeo geológico a escala 1:25.000 realizado por la empresa Lotti y asociados (Lotti, 1986) para el Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillado (SANAA). Para el presente estudio se ha podido contar con el mapa en formato de imagen y vectorial, pero no se pudo obtener el reporte original. Posteriormente, en el marco de la elaboración de parte de las hojas geológicas de Honduras, Rogers y O’Conner (1993) elaboraron la hoja geológica de Tegucigalpa a escala 50.000. Como parte del estudio de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) de deslizamientos (JICA, 2002a, 2002b) se realizaron trabajos de campo de mapeo de los movimientos de ladera y una actualización de la descripción de la geología. En estudios posteriores principalmente se sintetizó la información geológica existente (Martínez, 2011b; BID, 2015). Durante la realización del presente trabajo de investigación se pudo constatar que los mapas de Rogers y O’Conner (1993), de JICA (2002b), así como las síntesis posteriores, coinciden por completo con el mapa de Lotti (1986), por lo que puede afirmarse que este último continúa siendo el mapa base para la geología del MDC.

De forma sintética la geología del área de estudio se puede describir como constituida por cuatro unidades principales (Lotti, 1986) (Figura 17):

El basamento sedimentario constituido por areniscas, lutitas y conglomerados rojos del Grupo Valle de Ángeles, depositados en ambientes de abanicos aluviales y con más de 1.000 metros de espesor. No existen dataciones de esta formación, aunque diversos autores (Fakundiny, 1970; Lotti, 1986; Viland et al., 1996) coinciden en clasificarla como de edad Cretácica. Viland et al. (1996) indican que la edad podría ser Cretácico Alto (depositadas entre 96-65 Ma). Otros autores plantean que estas capas corresponden a flujos de detritos (Rogers y O’Conner, 1993) generados por la erosión de las estructuras resultantes de la orogénesis Cretácica Tardía (Rogers et al., 2007), que fueron depositados en una fase de tectónica extensiva determinada por cuencas de pull-apart. El Grupo Valle de Ángeles cuenta con dos formaciones: La formación Villa Nueva, constituida por conglomerados rojos y la formación Río Chiquito, constituida por lutitas, limonitas, areniscas rojas, y algunas capas de conglomerado de cuarzo.

Las unidades volcánicas terciarias del Grupo Padre Miguel, compuesto principalmente (Garza et al., 2012) por depósitos de tobas e ignimbritas, con una geoquímica característica de una zona

de subducción con importante influencia de la corteza continental. La edad estimada de esta unidad (Garza et al., 2012) es Mioceno Medio (14-16 Ma), lo que evidencia la existencia de un importante hiato sedimentario con el basamento Cretácico. Este vulcanismo de naturaleza explosiva forma parte de un importante episodio de edad Mioceno a nivel regional (Sigurdsson et al., 2000).

El vulcanismo basáltico y andesítico. No se han identificado dataciones precisas de dicho vulcanismo. En la leyenda del mapa de Lotti (1986) y en Robert y O’Conner (1993) aparece identificado como Cuaternario. Estudios regionales (Carr et al., 2004) datan este vulcanismo cuaternario como de edad Holoceno, por lo que, ante la carencia de dataciones precisas consideramos esta referencia de edad Holoceno como las más confiable.

Los sedimentos cuaternarios que incluyen depósitos aluviales, coluviones y depósitos de movimientos en masa, principalmente deslizamientos y flujos.

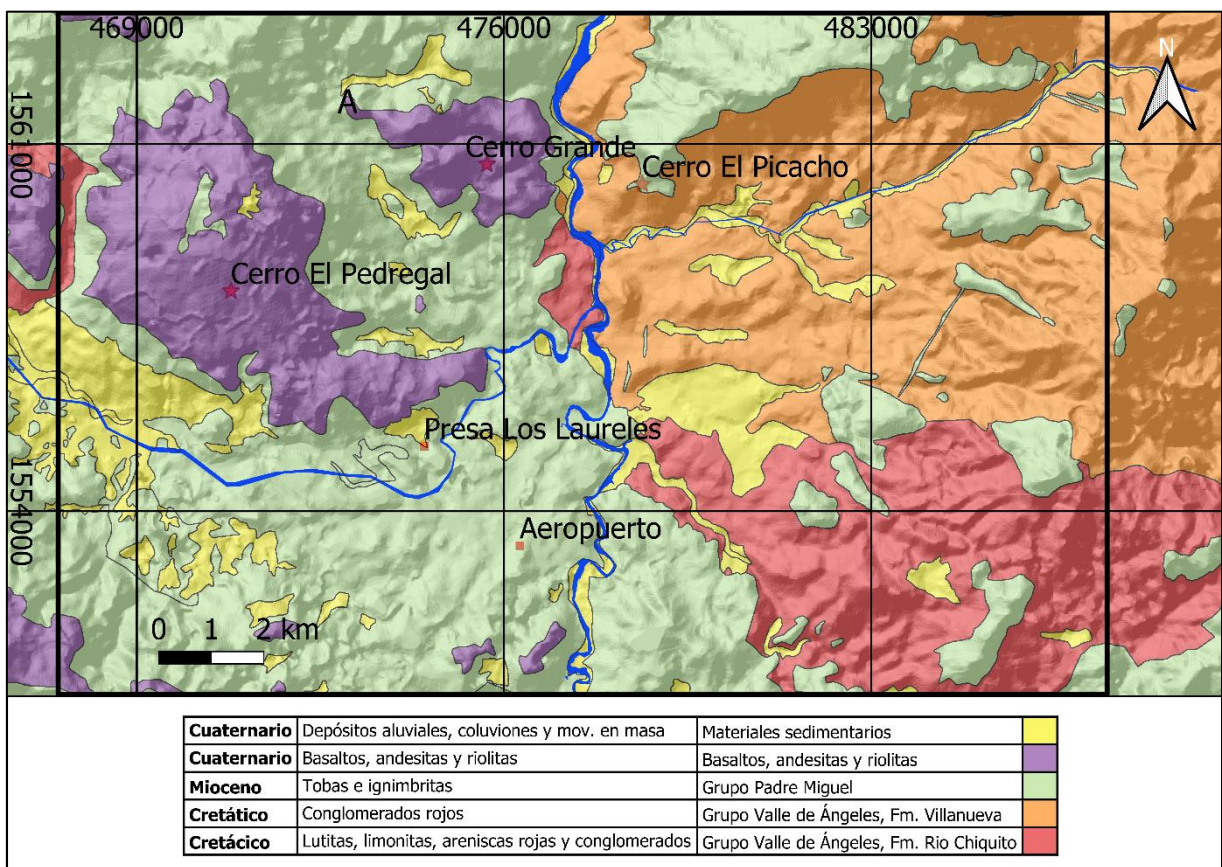


Figura 17. El rectángulo negro limita la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de la síntesis geológica de BID (2015).

### 1.6.3.3 Tectónica

En la recopilación bibliográfica no se identificaron estudios detallados de la tectónica del MDC. Se considera que el estudio de Fakundiny (1970), realizado en el municipio cercano de Comayagua (situado a unos 60 km al norte del MDC) aporta algunos elementos que pueden orientar la interpretación de la tectónica del MDC. Esto debido a que corresponde a la misma zona desde el punto de vista estructural, conocida como depresión central de Honduras (Rogers, 2003), y a que afloran las mismas litologías que en el MDC. En términos estructurales y afectando a los materiales que afloran en la zona de estudio, dicho estudio identifica las siguientes etapas de deformación:

Orogenia de Edad Cretácico Superior. Se trata de la orogenia de edad Larámide. Dicha orogenia afectó a los materiales de la formación Valle de Ángeles. Esta deformación produjo un cinturón



de deformación con orientación N60W, fallas inversas con altos ángulos y pliegues con orientación este.

Depósito de las ignimbritas y tobas de la formación Padre Miguel y los materiales sedimentarios asociados, que rellenaron el paisaje ocultando la expresión en superficie de las estructuras anteriores.

Tras el depósito de la formación Padre Miguel o de forma casi simultánea se produciría una fase de levantamiento con la generación de cuencas tipo “graven”.

#### 1.6.3.4 Antecedentes de estudios de movimientos de ladera

Actualmente en el MDC se dispone de datos del número de eventos históricos de movimientos de ladera acontecidos y sus efectos, inventarios de movimientos de ladera, así como diversos análisis del área susceptible a movimientos de ladera

##### Número de desastres históricos por movimientos de ladera

La base de datos de desinventar incluye la siguiente información: *número de serie, tipo de evento, día de inicio, municipio, lugar, fuente, observaciones sobre los efectos, muertes, desaparecidos, heridos, enfermos, víctimas, afectados, evacuados, relocalizados, casas destruidas, casas afectadas, cultivos y bosques (hectáreas), rutas afectadas, centros educativos, centros de salud, ganado, pérdidas económicas en Lempiras, pérdidas económicas dólares americanos y otras pérdidas*. Con relación a los movimientos de ladera la base de datos sólo considera la categoría de deslizamiento. La base de datos nacional de desinventar para Honduras no incluye el huracán Mitch, dado que había sido generado como una base de datos independiente previamente. Dicha base de datos del evento Mitch para Honduras sólo contiene 301 registros a nivel nacional, agrupados a nivel de municipio y sin detalle por tipo de evento, por lo que no se utilizó para el presente estudio.

Para el análisis realizado en la presente investigación se descargó la base completa para Honduras en abril del año 216. Dicha base de datos cuenta con un total de 12.194 registros para el periodo 1966-2016, de los cuales 5.396 corresponden a desastres naturales. Los movimientos de ladera constituyen un 12% de los registros de desastres naturales (657 registros). El 36% (237) del total de estos movimientos de ladera, se localizan en el MDC. El siguiente municipio que concentra más movimientos de ladera es San Pedro Sula, que concentra un 3% (17) de los registros. Este dato pone de manifiesto la gran concentración de movimientos de ladera en el MDC.

Los 237 movimientos de ladera registrados en desinventar para el MDC durante el periodo 1966-2016, han afectado a 13.644 personas, produciendo 55 víctimas y destruyendo totalmente 875 viviendas. Con relación al huracán Mitch, este evento impactó al MDC en los últimos días de octubre de 1998, con una precipitación máxima registrada de 289 mm en dos días (JICA, 2002a), que activó gran número de movimientos de ladera (Harp et al., 2002a). El periodo de retorno de la precipitación de dos días asociada al huracán Mitch fue estimado por un estudio de JICA en 500 años (JICA, 2002a). Aunque durante el huracán Mitch se activaron gran número de flujos de pequeño tamaño, fueron los deslizamientos (rotacionales y traslacionales) los que concentraron la mayor parte de las pérdidas humanas y económicas en el área de estudio (Harp et al., 2002a).

##### Inventarios de movimientos de ladera

En el MDC existen diversos inventarios de movimientos de ladera. El primer inventario fue realizado como parte del mapa geológico del MDC desarrollado por la empresa Lotti (1986) en el marco de un estudio de recursos hidrogeológicos de la ciudad (BID, 2015). Tras el huracán Mitch se desarrolló un inventario generado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) (Harp et al., 2002a), referido como USGS (2002), y un inventario

geomorfológico financiado por la Agencia de Cooperación Japonesa para el Desarrollo (JICA) (JICA, 2002a), referido como JICA (2002). Posteriormente con recursos del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) se inventariaron y evaluaron nuevos movimientos de ladera (asociados principalmente a las lluvias de los años 2010 y 2011) y se realizó una síntesis de los inventarios previos (inédito). Entre los años 2012 y 2014, la Universidad Politécnica de Ingeniería (UPI) de Honduras realizó un inventario como parte del proyecto “Geología de las Amenazas” centrada en deslizamientos en Tegucigalpa, con el apoyo técnico y financiamiento de JICA (Moncada y Yamagishi, 2016), referido como UPI-JICA (2014). Finalmente, con recursos del BID, en el periodo 2014-2015 se realizó una nueva síntesis y se verificaron varios de los movimientos de ladera del inventario (BID, 2015). En el Figura 18 se localizan los principales inventarios y a continuación se detallan sus características.

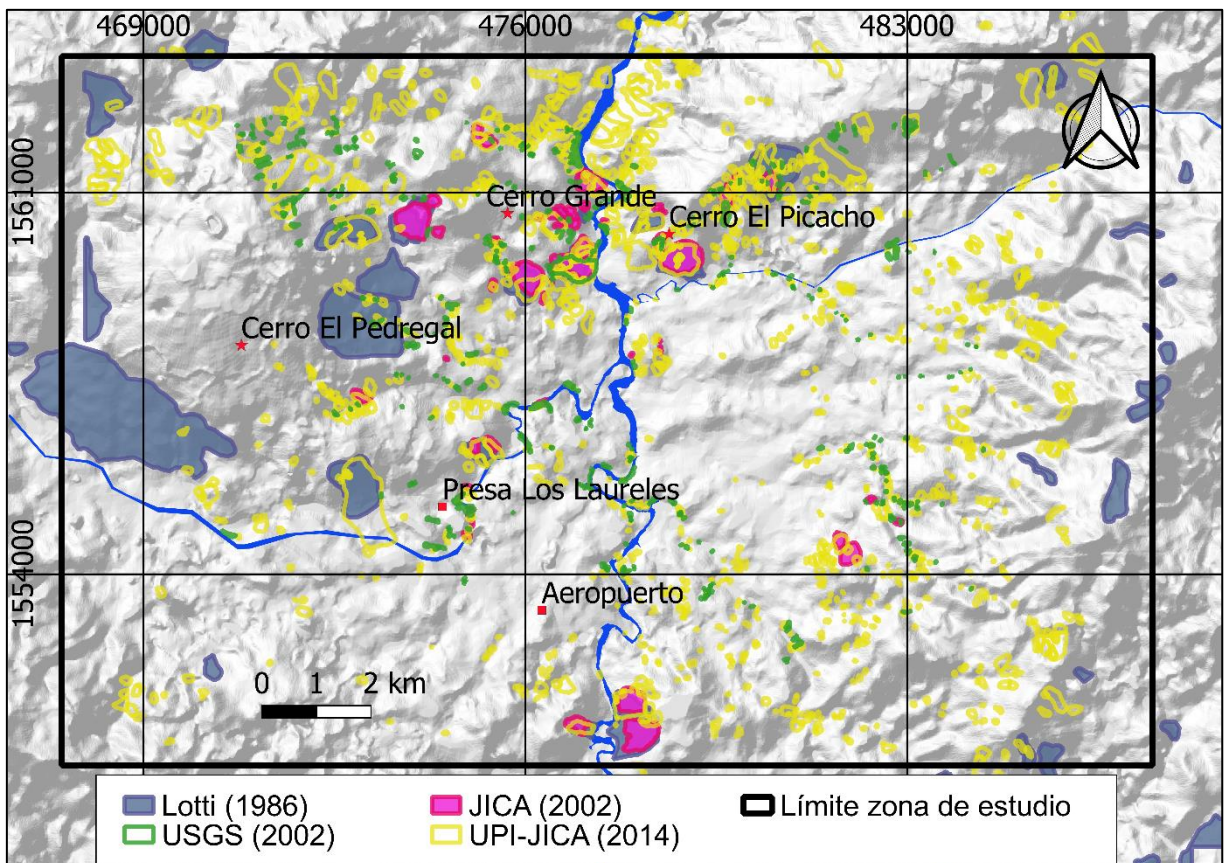


Figura 18. Inventarios de movimientos de ladera previos existentes en la zona de estudio.

**Inventario de Lotti (1986).** Es el único de los inventarios realizado antes del huracán Mitch. Este inventario es de tipo geomorfológico y forma parte del mapa geológico elaborado como parte del plan maestro de abastecimiento de agua de la ciudad. La escala es 1:25.000. El objetivo primordial de este inventario no era cartografiar movimientos de ladera, sino servir de base para la caracterización hidrogeológica de los materiales geológicos. En total, se registraron 43 movimientos de ladera en un área total del inventario de 15.633.355 m<sup>2</sup>. Los polígonos mapeados son de gran tamaño con una media de 363.000 m<sup>2</sup>, presentando la mayor parte de ellos (28) un área mayor de 100.000 m<sup>2</sup>. Aunque no se dispone del documento base de dicho mapa geológico, dado el gran tamaño de los polígonos se deduce que la mayor parte del mapeo fue realizado a partir de fotointerpretación y aplicando el método geomorfológico, pero con limitada verificación de campo. El inventario original se encontraba en un formato analógico y fue digitalizado y georreferenciado por técnicos del PNUD en el año 2010.

**Inventario del USGS (2002).** Este inventario, de tipo evento, fue elaborado a partir de fotointerpretación de fotografías aéreas a escala 1:40.000 y 1:20.000 tomadas en Marzo de 1999, inmediatamente después del huracán Mitch (Harp et al., 2002a). El inventario cuenta con 567

movimientos de ladera, con un área promedio de 1.587 m<sup>2</sup> y un área total de 900.183 m<sup>2</sup>, presentando la mayor parte de los polígonos (358) un área entre 100 y 1000 m<sup>2</sup>. Un 75% de los movimientos inventariados son flujos de detritos de poca profundidad (Harp et al., 2002a). Los resultados del inventario se trasladaron a una hoja cartográfica 1:10.000 mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Inventario de JICA (2002)). Se trata de un inventario de tipo geomorfológico que fue realizado a partir del inventario del USGS y el mapa geológico de Lotti, realizándose trabajo de campo y fotointerpretación (JICA, 2002a). En total el inventario identifica 61 movimientos de ladera, con un área promedio de 49.500 m<sup>2</sup> y un área total de 988.876 m<sup>2</sup>.

Inventario de UPI-JICA (2014). Este inventario de tipo geomorfológico cuenta con 1.528 deslizamientos. El área promedio de los movimientos es de 11.886 m<sup>2</sup> y el área total 18.162.000 m<sup>2</sup>. Fue desarrollado por alumnos de la UPI como parte de un proceso de capacitación con el apoyo de la Sociedad Japonesa de Promoción de la Ciencia en el marco del proyecto de “Geología de las Amenazas” de JICA (Moncada y Yamagishi, 2016). El inventario fue realizado mediante fotointerpretación de fotos aéreas del año 2013 a escala 1:10.000 generadas por este proyecto.

La Tabla 10 muestra las diferencias en tamaño, número de movimientos, tipo de inventario y tipo de movimientos de ladera mapeados. La caracterización del tipo de movimientos de ladera en los inventarios de Lotti (1986), USGS (2002), JICA (2002) y UPI-JICA (2014) se basó en referencias bibliográficas, ya que ninguno de estos inventarios incluye una clasificación de cada evento mapeado. En el caso del inventario de UPI-JICA (2014) la clasificación de los movimientos de ladera está incluida en la tabla de atributos de la capa vectorial.

Tabla 10. Resumen de los parámetros principales de los inventarios existentes en la zona de estudio. Todos los inventarios se encuentran en formato vectorial.

	Inventario			
	Lotti	USGS	JICA	UPI-JICA
<b>Año</b>	1986	2002	2002	2014
<b>Tipo inventario</b>	Geomorfológico	Evento	Geomorfológico	Geomorfológico
<b>Escala foto aérea</b>	Desconocida	1:40.000 y 1:20.000	1:10.000	1:10.000
<b>Área de estudio (km<sup>2</sup>)</b>	343	139	132	325
<b>N.º inestabilidades</b>	43	567	61	1.528
<b>Área afectada (km<sup>2</sup>)</b>	15.633.355	900.183	988.876	18.162.000
<b>% área afectada</b>	4	0,6	2	5,5
<b>Área promedio (m<sup>2</sup>)</b>	363.000	1.587	49.500	11.886
<b>Tipo de movimiento</b>	Deslizamientos	75% Flujos de detritos	Deslizamientos	Deslizamientos

Con relación al tamaño de los movimientos de ladera mapeados por cada inventario (Figura 19), se aprecia que existen diferencias notables. El 75% de los movimientos de ladera del inventario de USGS (2002) corresponden a la categoría de tamaño *pequeños*, el 64% de los movimientos de ladera del inventario de Lotti (1986) se localizan en la categoría de tamaño *macro*, el 65% de los movimientos del inventario de UPI-JICA (2014) se localiza en la categoría *mediano* y el 48% de los movimientos del inventario de JICA (2002) se localizan en la categoría *grande*.

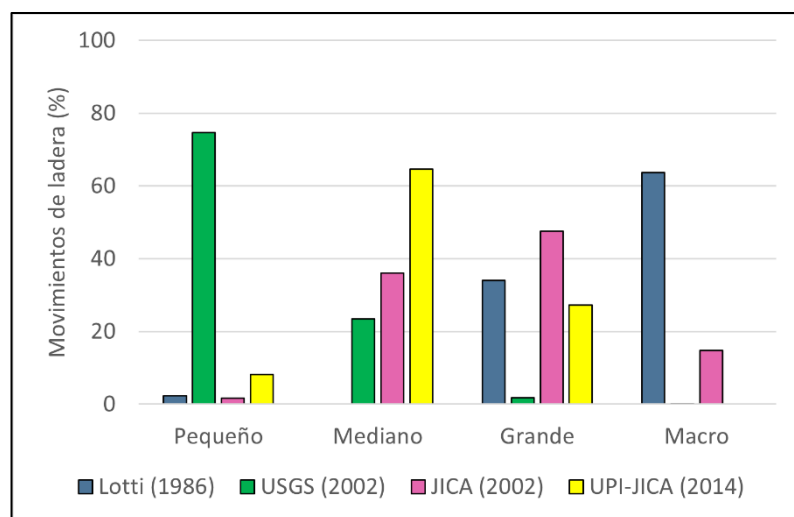


Figura 19. Distribución de movimientos de ladera de cada inventario según su tamaño. El tamaño Pequeño corresponde al rango de 1 a 1.000 m<sup>2</sup>, Mediano de 1.001 a 10.000 m<sup>2</sup>, Grande de 10.001 a 100.000 m<sup>2</sup> y Macro >100.000 m<sup>2</sup>.

### Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera

Recientemente se han desarrollado cinco estudios de susceptibilidad ante movimientos de ladera en el MDC (Tabla 11):

Cuatro estudios que aplicaron el modelo estadístico bivalente: (i) el estudio de Eugster (2002), (ii) un estudio de la Universidad Nacional Autónoma (UNAH) y el PNUD (UNAH/PNUD, 2010), (iii) un estudio financiado por el BID (BID, 2015) y (iv) el estudio de García-Urquía y Yamagishi (2017).

Un estudio que aplicó un análisis determinista de susceptibilidad realizado por el USGS (Harp et al., 2002b).

El estudio de Eugster (2002) cubre un área aproximada de 10 Km<sup>2</sup> en la parte norte de la zona de estudio. La escala es 1:20.000. El método utilizado fue el método del valor de la información (Yin y Yan, 1988). Como parámetros se emplearon la litología, la distancia a los contactos geológicos, la distancia a fallas, las principales unidades geomorfológicas, la pendiente, la curvatura, el uso del suelo, la distancia a las carreteras y la pendiente acumulada ladera abajo. El autor elaboró su propio inventario de movimientos de ladera para su área de estudio. El estudio concluye que la variable distancia a los contactos geológicos era la que presentaba mayor correlación con los movimientos de ladera.

El estudio de UNAH/PNUD (2010) cubre un área de 354 km<sup>2</sup>. El mapa resultante combina un análisis de susceptibilidad y un inventario de movimientos de ladera, pues el inventario está integrado directamente en el mapa de susceptibilidad como parte de la clase de mayor susceptibilidad. Como inventario de deslizamientos se empleó una combinación del inventario de Lotti (1986), JICA (2002), USGS (2002) y algunos deslizamientos mapeados por PNUD. Las variables consideradas para el análisis de susceptibilidad fueron la litología (se empleó el mapa geológico de Lotti (1986), lo que determina el área del análisis), la pendiente (dividida en intervalos de 10 grados), la curvatura, distancia a las fallas (se consideraron las fallas del mapa geológico de Lotti aplicando un buffer de 1.000 metros, dividido en tramos de 10 metros), cercanía al contacto entre la formación Padre Miguel y Valle de Ángeles (se utilizó un buffer de 1.000 metros dividido en tramos de 100 metros) y la presencia de vegetación (se empleó el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado obtenido de imagen Landsat). El método utilizado para el análisis de la susceptibilidad fue el del análisis de la densidad (Van Westen, 1993), estimando el porcentaje del área total de deslizamientos que concentra cada clase. A partir de ese análisis se establecieron pesos para cada capa, se realizó una suma de estos pesos

y se reclasificaron los valores obtenidos en 3 categorías de susceptibilidad (alta, media y baja) utilizando intervalos iguales.

El estudio de BID (2015) presenta dos áreas de análisis: un área donde se construyó el modelo y un área donde se extrapolaron los resultados. El área donde se construyó el modelo fue de 135 km<sup>2</sup>, y fue seleccionada porque concentra los movimientos de ladera activos en el MDC. Este modelo después fue generalizado a un área de 406 km<sup>2</sup>, que es el área de cobertura de todos los inventarios de movimientos de ladera considerados, es decir es el área total en la que aparece algún deslizamiento identificado por los inventarios de Lotti (1986), JICA (2002) y USGS (2002). El inventario utilizado incluye 19 deslizamientos verificados en el campo en el área de 135 km<sup>2</sup>. Las variables consideradas fueron pendiente, litología (se empleó un mapa generado a partir de la unión de las hojas geológicas de Agalteca, Lepaterique, San Juan Flores, Talanga, Tegucigalpa y Zambrano), proximidad a cauces (se aplicó un buffer de 250 metros a cada lado de los cauces), proximidad a lo contacto con los basaltos (se empleó un buffer de 500 metros) y proximidad al contacto con el miembro Rio Chiquito de la formación Valle de Ángeles (se empleó un buffer de 250 metros a cada lado de este contacto). El método utilizado fue el método bivariante del valor de la información y la reclasificación de los pesos obtenidos en tres niveles de susceptibilidad, alto, medio y bajo. La escala de análisis se estima en 1:50.000, que es la escala del mapa geológico.

El estudio de García-Urquía y Yamagishi (2017). Presenta un área de análisis de unos 100 km<sup>2</sup>. Como inventario de deslizamientos se empleó un subconjunto del inventario de UPI-JICA (2014) de 847 deslizamientos (55% del total del inventario). Las variables explicativas seleccionadas fueron la litología, distancia a ríos y riachuelos (se generó un buffer de 200 metros dividido en tramos de 50 metros) y la pendiente expresada en grados. El método utilizado el análisis de susceptibilidad fue el método bivariante de la matriz (Degraff y Romesburg, 1980; Irigaray y Chacon, 2002; Irigaray et al., 2007). Una vez elaborado el mapa de susceptibilidad su poder predictivo se verificó aplicando el método de la curva de predicción (Chung y Fabbri, 2003).

El estudio determinista de susceptibilidad elaborado por USGS (Harp et al., 2002b) aplicó el método del talud infinito de forma determinista. Dado que la mayor parte de los movimientos de laderas que se generaron por causa del huracán Mitch se produjeron en coluviones o suelos de alteración poco profundos, los autores consideraron que el método del talud infinito podría ser adecuado para caracterizarlos (Harp, et al., 2002b). A partir de esta hipótesis el equipo del USGS realizó un análisis determinista empleando el modelo del talud infinito para poder determinar la probabilidad de movimientos de ladera en los 30 km<sup>2</sup> en los que se disponía de un modelo digital del terreno de alta precisión, con curvas de nivel espaciadas un metro (Harp et al., 2002b). Los parámetros geotécnicos para poder aplicar el modelo se definieron siguiendo criterio experto, al no identificarse ensayos geotécnicos en las distintas formaciones. Por otro lado, no se contó con un mapa de suelo y se utilizó el mapa de litología para definir la distribución espacial de los parámetros geotécnicos. El mapa resultante se validó utilizando el inventario de movimientos de ladera de USGS (2002) (Harp et al., 2002b). Aunque la mayor parte de los píxeles de los movimientos de ladera inventariados coincidía con la categoría de muy alta y alta probabilidad de movimientos de ladera definida en el mapa, sin embargo, la capacidad de clasificación del mapa fue baja, con un valor muy elevado de falsos positivos, pues la categoría de muy alta probabilidad de movimiento de ladera incluía un 99% de píxeles que no habían sido inventariados como movimientos. El estudio concluye que la baja capacidad de clasificación del modelo se debió principalmente a la carencia de un mapa de suelos, con la profundidad y los parámetros geotécnicos asociados (Harp et al., 2002b).

Tabla 11. Resumen de los estudios de susceptibilidad previamente existentes en el área de estudio.

Referencia	VARIABLES explicativas	Método	Área de cobertura (km <sup>2</sup> )	Validación
Eugster 2002	Litología Distancia a contactos geológicos Distancia a fallas Principales unidades geomorfológicas Pendiente Curvatura Usos del suelo Distancia a las carreteras	Valor de la información (Yin y Yan, 1988)	10	NO
Harp et al., 2002b	Litología Pendiente Curvatura Distancia a fallas, Cercanía al contacto entre las formaciones grupo Padre Miguel y grupo Valle de Ángeles Presencia de vegetación		30	SÍ
UNAH/PNUD 2010	Litología Distancia a ríos y riachuelos Pendiente expresada en grados	Análisis de la densidad (Van Westen, 1993)	354	NO
BID, 2015	Pendiente Litología Proximidad a cauces Proximidad al contacto con los basaltos y al contacto con el miembro Río Chiquito de la formación Valle de Ángeles	Valor de la información (Yin y Yan, 1988)	406	NO
García-Urquía y Yamagishi 2017	Litología Distancia a ríos y riachuelos Pendiente	Método bivariante de la matriz (Degraff y Romesburg, 1980; Irigaray y Chacon, 2002; Irigaray et al., 2007)	100	SÍ

#### Análisis de precipitaciones desencadenates de movimientos de ladera

El estudio de García-Urquía y Axelsson (2015) analizó 19 indicadores de lluvia antecedente para la zona de estudio, entre 1 y 60 días, para identificar los aquellos que mejor explicaban la ocurrencia de los movimientos de ladera en el periodo 1980-2005. La estación pluviométrica utilizada fue la del aeropuerto del MDC, Toncontín. La principal conclusión de este estudio fue que la lluvia antecedente de 7 días era la que mejor permitía discriminar entre los días con y sin movimientos de ladera. En un estudio posterior, García-Urquía (2016), aplicó una metodología gráfica y únicamente los indicadores de lluvia antecedente de 1 a 6 días, así como el indicador de la precipitación del día del evento. Con estos dos indicadores se definieron dos límites, superior e inferior, de forma que por encima del límite superior se producen la mayor parte de los eventos de movimientos de ladera y por debajo del límite inferior estos eventos eran poco frecuentes.



## 2 METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este trabajo ha supuesto la realización de las siguientes tareas principales: (i) recopilación de información existente y su gestión mediante Sistema de Información Geográfico (SIG), (ii) comparación de inventarios históricos de movimientos de ladera, (iii) elaboración de un inventario de movimientos de ladera validado y de un mapa de coluviones y suelos residuales, (iv) caracterización de las propiedades mecánicas de los coluviones y suelos residuales, (v) comparación de la capacidad explicativa del mapa de susceptibilidad basado en la cobertura de coluviones y suelos residuales con respecto a mapas previos, (vi) validación del método del talud infinito en una muestra de deslizamientos de la zona de estudio, (vii) estimación probabilista del factor de seguridad para la cobertura coluviones y suelos residuales, (viii) elaboración de funciones de daño ante deslizamientos, (ix) estimación de la probabilidad temporal y de la amenaza y el riesgo ante los deslizamientos en la zona de estudio, (x) conceptualización de medidas de reducción de riesgos ante deslizamientos y (xi) estimación de su costo-beneficio. Dichas tareas se describen a continuación en detalle.

### 2.1 *Recopilación de información existente*

Se recopilaron 23 capas de información geoespacial de la zona de estudio. La descripción de esta información, con sus principales características, incluyendo el formato de las capas y su escala, se resume en el [anexo 1](#). Estos datos geoespaciales corresponden principalmente a información base de la zona de estudio, topografía, información sobre la vivienda, información de la geología, zonas propensas a inundaciones y movimientos de ladera, e incluyen:

La información de base corresponde a información del censo 2001 de los barrios y colonias de Tegucigalpa (Instituto Nacional de Estadística de Honduras-INE), ortofotos de escala 1:10.000 de toda la zona de estudio generadas por el proyecto “Geología de las Amenazas” en el año 2013 (Moncada y Yamagishi, 2016) y el mapa de cobertura forestal de escala 1:25.000 del año 2018 del Instituto de Conservación Forestal (ICF) (ICF, 2018).

La topografía comprende las curvas de nivel espaciadas cada 10 metros derivadas de foto aérea del INE para el año 2009.

La información de viviendas incluye la capa con la clasificación de barrios del MDC en unidades homogéneas (BID, 2015) y los puntos de las encuestas de los daños a viviendas en el MDC realizadas por la ONG GOAL, entre noviembre del año 2010 y marzo del 2011.

La geología considera el mapa geológico a escala 1:25.000 elaborado por Lotti (1986), las hojas geológicas escala 1:50.000 elaboradas como parte de una colaboración del Instituto Geográfico Nacional (IGN), la secretaria de Comunicaciones, Obras Públicas y Transporte, el Cuerpo de Paz y el Ministerio de Recursos Naturales en el año 1990 y la síntesis geológica elaborada como parte del estudio de BID (2015).

La información de movimientos de ladera incluye inventarios de movimientos de ladera (de las fuentes Lotti, 1986; USGS, 2002; JICA, 2002; PNUD, 2011 y UPI y JICA, 2014) y mapas de susceptibilidad (de las fuentes UNAH/PNUD, 2010 y BID, 2015).

La información espacial digital se encuentra en dos formatos: vectorial y raster. La información en formato vectorial está constituida por una serie de elementos discretos, puntos, líneas o polígonos, cada uno de los cuales está referenciado geográficamente por sus coordenadas cartesianas. El raster está constituido por una retícula regular de píxeles georeferenciados de 10 x10 m, cada uno de los cuales tiene asociados valores de una o varias variables. En el presente estudio todas las capas estaban disponibles en formato vectorial a excepción de las capas de geología, susceptibilidad de BID (2015) y las ortofotos, que se encontraban en formato raster.



Adicionalmente a la información geoespacial se recopiló información de bases de datos e informes de estudios de suelos y movimientos de ladera. Las bases de datos incluyeron los datos históricos de movimientos de ladera en el MDC recogidos en desinventar para el periodo 1966 a 2016 y datos de precipitación diaria de la estación pluviométrica de la UNAH para el periodo 1980-2019.

Los estudios de suelos incluyeron:

Estudios realizados en el año 2010 que fueron financiados por PNUD. Éstos incluyen informes de perforaciones y ensayos de corte directo de 2 muestras en la colonia Guillen (GEOCONSULT, 2010), ensayos de corte directo de 2 muestras de la colonia El Dorado (INGEO, 2010b) y de 2 muestras en la colonia Obrera (INGEO, 2010a) y sísmica de refracción de la colonia Guillen (Rodríguez, 2010b) y la colonia Obrera (Rodríguez, 2010a).

Estudios financiados por la AMDC en el año 2018. Éstos incluyen perforaciones y ensayos de corte directo en movimientos de ladera en las colonias La Ulloa y José Arturo Duarte, la colonia Guillén, la colonia La Obrera y la colonia Canaan (GEOCONSULT, 2018).

Los informes de estudios de movimientos de ladera incluyen los realizados entre los años 2010 y 2011 y financiados por PNUD (Martínez, 2010, 2011b, 2011a; Suárez y Mora, 2010) y el estudio de GEOCONSULT (2018) financiado por la AMDC.

## **2.2 Gestión de la información mediante SIG**

El SIG ha sido la principal herramienta de análisis utilizada durante la investigación. El SIG se puede definir como “un conjunto de herramientas para reunir, computerizar, almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto particular de objetivos” (Burrough, 1986). Para los análisis se utilizó principalmente el programa libre QGIS, en sus versiones 3.16 y 3.18 (<https://qgis.org/en/site/>). Adicionalmente para algunos procesos con raster se empleó el programa *ArcView 3.2*. Toda la información recopilada y generada se almacenó en una base de datos en un repositorio en la aplicación onedrive y se elaboró una tabla en Excel conteniendo las propiedades y localización de las capas. Como sistema de coordenadas para toda la información espacial se utilizó el sistema Universal Transversal Mercator (UTM) World Geodetic System (WGS) Zona 16 Norte, que es el empleado actualmente por las instituciones públicas de Honduras.

### **2.2.1 Elaboración de modelos digitales del terreno**

Como principales variables para caracterizar la forma del terreno se consideraron la altitud y pendiente. Se elaboró un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con tamaño de celda de 10 x 10 metros, a partir del mapa vectorial de curvas de nivel, con espaciado de 10 metros. Para generar el MDE se realizó una interpolación empleando el método de Red Irregular Triangular (TIN por sus siglas en inglés: Triangulated Irregular Network). A partir del MDE, mediante el programa *ArcView 3.2* y la extensión *Gridanalysis*, se elaboró un Modelo Digital de Pendientes (MDP) estimando la pendiente en grados con el método Horn (Horn, 1981) y el Modelo Digital de Orientaciones (MDO), que se empleó para evidenciar el relieve en los mapas elaborados. También a partir del MDE se generó una capa de ríos y riachuelos empleando el programa *Arcview 3.2* y la extensión *DRN hydrological*, que permitió generar un MDE sin depresiones, estimar las direcciones de acumulación de flujo en el MDE, definir la acumulación de flujo y delinear los cauces existentes en el área de estudio.

### **2.2.2 Elaboración del mapa de número de eventos de inestabilidad por barrio**

El número de eventos de movimientos de ladera correspondientes al MDC en la base de datos de desinventar para Honduras (237 registros) fueron geolocalizados espacialmente, vinculándolos al barrio que aparece descrito en la base de datos de desinventar en el campo

“lugar”. Las fechas de cada evento fueron trasladadas a la tabla del mapa georreferenciado de barrios del MDC en formato vectorial y se estimó el número total de eventos por barrio.

Dado que esta base no incluye un detalle del número de eventos por barrios correspondientes al huracán Mitch, con este fin se empleó el inventario tipo evento de USGS (2002). Dicho inventario incluye principalmente flujos de detritos, que representan un 75% del total de movimientos del inventario, y deslizamientos traslacionales y rotacionales (Harp et al., 2002a). Dado que el inventario no cuenta con un campo de clasificación del tipo de movimientos se realizó una selección, analizando la morfología de los polígonos según criterio experto, para identificar el número de deslizamientos traslacionales y rotacionales (que constituyen el enfoque del presente estudio) producidos por el huracán Mitch en la cobertura de coluviones y suelos residuales.

### *2.2.3 Análisis mediante SIG*

A continuación se describen los principales procesos de análisis realizados mediante SIG:

Se comparó la coincidencia espacial de los movimientos de ladera mapeados por los distintos inventarios. Se emplearon los inventarios en formato vectorial y se aplicaron las herramientas del SIG para estimar las áreas de intersección y unión.

Los resultados de la fotointerpretación de movimientos de ladera y tipos de suelo se trasladaron al SIG empleando la ortofoto georeferenciada correspondiente. Asimismo, todos los puntos obtenidos durante el trabajo de campo fueron georeferenciados y trasladados al SIG para su análisis.

Algunas de las variables explicativas de la distribución de los movimientos de ladera, como los ríos y quebradas, fueron generados mediante herramientas del SIG. Así mismo los indicadores requeridos para evaluar la capacidad explicativa de las variables y obtener las curvas de éxito se obtuvieron por medio del SIG.

Los resultados de los análisis de estabilidad de taludes fueron transferidos al SIG, donde se generaron índices para evaluar la precisión de dichos análisis de estabilidad.

El cálculo de las pérdidas probables para los distintos periodos de retorno se obtuvo empleando álgebra de mapas en el SIG como el producto de la probabilidad espacial de deslizamientos, la probabilidad temporal, el valor expuesto y su vulnerabilidad.

El SIG se empleó para la delimitación de las cuencas y el trazado y medición de la red de drenaje como parte de la conceptualización de las obras de reducción del riesgo.

## **2.3 Comparación de inventarios**

Para la comparación entre los inventarios se aplicaron método directos e indirectos (Gorum et al., 2011). Como metodologías de comparación directa se emplearon la estimación del error general de mapeo (Carrara et al., 1992) y la estimación del número de deslizamientos coincidentes entre los inventarios. La estimación del error de mapeo se realizó aplicando la Ecuación 28.

Los valores de intersección y unión se expresaron como porcentaje del área común de cobertura de los inventarios. Las áreas de cobertura comunes se definieron como la intersección de polígonos rectangulares que definen el área de cobertura para cada inventario (Figura 20),

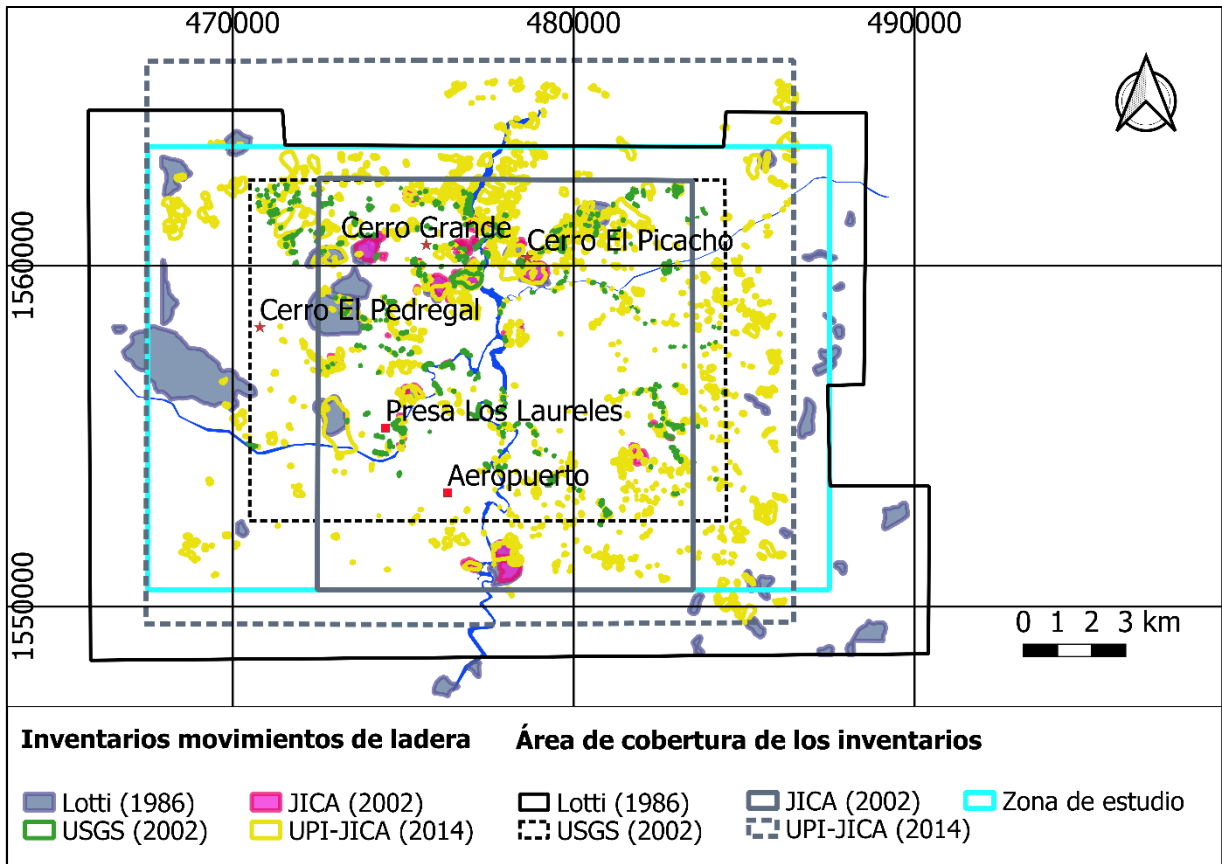


Figura 20. Área de distribución de los diferentes inventarios de movimientos de ladera existentes en el MDC.

Para estimar el número de movimientos de ladera coincidentes entre los inventarios, se intersecaron los inventarios en formato vectorial, tomados de dos en dos, utilizando la herramienta de *intersección* del QGIS. Posteriormente, se contabilizaron con criterio experto los movimientos en los que existe coincidencia. Este análisis es necesario ejecutarlo con criterio experto porque, en ocasiones, 2 o tres polígonos que intersectan entre dos inventarios en realidad puede representar un solo movimiento de ladera en el que existe coincidencia.

El método indirecto seleccionado fue la comparación de mapas de densidad entre inventarios, para comparar la distribución espacial de los mismos (Galli et al., 2008; Gorum et al., 2011; Rosi et al., 2018). Para elaborar los mapas de densidad de los inventarios, el área de estudio se dividió en 260 celdas de 1 km<sup>2</sup> y se calculó el área de los movimientos de ladera y la densidad de movimientos de ladera en cada celda. Los resultados se compararon construyendo tablas de contingencia por pares que relaciona el número de celdas con movimientos de ladera (celdas inestables) con el número de celdas sin movimientos de ladera (celdas estables) (Tabla 12) y estimando un índice de imprecisión de la clasificación (Galli et al., 2008).

Tabla 12. Tabla de contingencia para comparar los mapas de densidad de inventarios de movimientos de ladera.

		<b>Mapa de densidad para el inventario B</b>	
		N.º de celdas estables	N.º de celdas inestables
Mapa de densidad para el inventario A	N.º de celdas estables	<i>a</i>	<i>b</i>
	N.º de celdas inestables	<i>c</i>	<i>d</i>

A partir de estas tablas se estima el índice de imprecisión de la clasificación (*IIC*) como:

$$ICC = (b + c)/N$$

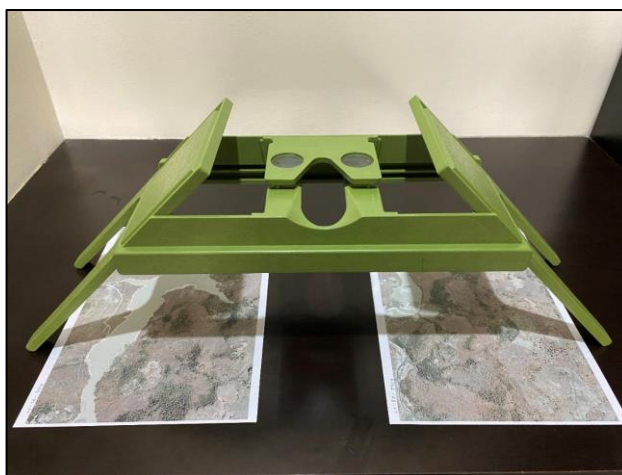
*Ecuación 31*

Donde *N* es el número total de las celdas.

Adicionalmente, se estimó la densidad de los movimientos de ladera, midiendo en cada celda el porcentaje de área con movimientos de ladera respecto al área total de la celda (Galli et al., 2008; Gorum et al., 2011; Rosi et al., 2018).

## **2.4 Fotointerpretación**

En toda la zona de estudio se realizó una fotointerpretación a partir de fotogramas a escala 1:10.000 mediante un estereoscopio de espejo de la marca *StereoAid* (Figura 21). Mediante dicha fotointerpretación se verificó la ubicación de los movimientos de ladera existentes en los inventarios, se identificaron nuevos movimientos de ladera y se realizó el mapeo de los coluviones y suelos residuales. Los movimientos de ladera y los límites de la cobertura del coluvión y suelos residuales fueron marcados con un lápiz grueso sobre la foto aérea. Posteriormente se trasladaron al SIG empleando como referencia la ortofoto georeferenciada correspondiente a la misma foto aérea.



*Figura 21. Estereoscopio Stereoaid empleado en este trabajo para la fotointerpretación.*

## **2.5 Trabajo de campo**

### **2.5.1 Trabajo de campo en 2016**

Entre el 16 y 25 de junio de 2016 se llevó a cabo una campaña de campo para validar los inventarios de movimientos de ladera existentes en el MDC y verificar su actividad. Como parte de la campaña, realizada conjuntamente con personal de la dirección de Prevención y Mitigación del Riesgo de la alcaldía municipal del MDC, se visitaron aquellos movimientos de ladera que el personal de la dirección consideraba activos. Se consideraron movimientos de ladera con actividad reciente aquellos que habían presentado alguna actividad entre los años 2010-2016.

Además, se mapearon con Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) 116 afloramientos de puntos de interés y se elaboró una tabla georeferenciada con la descripción de cada uno de los afloramientos.

## 2.5.2 Trabajo de campo en 2018

Entre el 3 y 4 de marzo de 2018 se realizó trabajo de campo adicional para recopilar nuevos datos *in situ*. Esta campaña de campo permitió verificar la extensión y tipos de coluviones y suelos residuales mapeados mediante foto aérea. Se tomaron nuevos puntos con el GPS, elaborando una tabla con 45 afloramientos adicionales con su correspondiente descripción y fotografía.

Se considera que algunas intervenciones antrópicas, como la alteración de los patrones de drenaje natural del terreno pueden estar influyendo como factores disparadores de los movimientos de ladera. A partir de las visitas de campo se realizó un análisis cualitativo de los elementos de influencia antrópica que pudieron contribuir a la activación de los deslizamientos analizados, con el fin de identificar acciones que puedan considerarse relevantes como parte de las medidas propuestas de reducción del riesgo por deslizamientos.

## 2.6 Elaboración de inventario de movimientos de ladera validado

La fotointerpretación, junto con el trabajo de campo en el año 2016, permitió generar un inventario de movimientos de ladera e identificar aquellos con evidencias de actividad. El inventario consideró únicamente los deslizamientos traslacionales y rotaciones debido a que: (i) en años recientes (considerando el periodo de actividad de referencia de 2010-2016) son los únicos tipos de movimientos que presentaban actividad y (ii) que como se evidenció durante el huracán Mitch, son los causantes de la mayor parte de las pérdidas económicas y humanas en la zona de estudio (Harp et al., 2002a).

Por otro lado, diversos estudios (Chung y Fabbri, 2003; Van Westen et al., 2003; Corominas et al., 2014) recomiendan que los análisis de susceptibilidad se realicen para una tipología de movimientos de ladera específica, lo que refuerza la pertinencia de que el inventario validado, como insumo para los análisis de susceptibilidad, se enfoque únicamente en los deslizamientos.

El inventario validado se analizó aplicando los siguientes parámetros: (i) tamaño de los deslizamientos: se analizaron cuantos deslizamientos del inventario se localizaban en las categorías de tamaño definidas por COSUDE-INETER (2005) y (ii) análisis de la proporción del área del inventario por rango de pendiente: se contabilizaron las celdas y se estimaron las proporciones del área total por rango de pendiente, tanto a nivel de todo el inventario como para cada deslizamiento.

Para esto se clasificó el MDP con tamaño de celda de 10 x 10 metros en rangos de 5 grados y se combinó (comando *combine* de *ArcView 3.2*) con el inventario de deslizamientos en formato raster, usando como máscara el MDE.

## 2.7 Caracterización de los coluviones y suelos residuales

La cartografía de los coluviones y suelos residuales se realizó mediante fotointerpretación a partir de las fotografías aéreas del año 2013 (2.1). Dicha fotointerpretación fue verificada en la campaña de campo de 2018.

### 2.7.1 Distribución respecto a otras variables

Para determinar la capacidad explicativa de las principales variables utilizadas por los distintos estudios de susceptibilidad a movimientos de ladera y compararla con la cobertura de coluviones y suelos residuales elaborado por el presente estudio, se aplicó el método del peso de la evidencia (Bonham-Carter, 1994; Van Westen et al., 2003), descrito en el marco teórico. Este método permite estimar un peso total para cada variable. Si el peso es negativo la variable no tiene influencia en la susceptibilidad a movimientos de ladera. Si su peso es cercano a 0 la influencia es baja y cuanto mayor es el valor positivo del peso, mayor es su influencia. Las variables analizadas fueron la litología, la pendiente y la distancia a ríos y riachuelos. Dichas

variables fueron seleccionadas porque eran las variables utilizadas con mayor frecuencia en estudios previos en el MDC (Tabla 11).

Como capa de litología se empleó la síntesis de la zona de estudio elaborada en el marco del estudio de BID (2015) ([anexo 1](#)). Para definir la distancia a los ríos y riachuelos se generó un buffer de 50 metros del mapa de los cauces elaborado a partir del MDE (ver apartado 2.2).

Las capas del inventario validado y de los inventarios de movimientos de ladera previos en formato vectorial se unieron con una máscara en formato vectorial para toda la zona de estudio y se codificaron de forma que se tuviera un valor para los polígonos que corresponden a movimientos de ladera (valor 100) y un valor para el resto del área de la zona de estudio donde no hay movimientos (0).

Todas las capas fueron convertidas a formato raster usando como máscara el MDE de la zona de estudio, con un píxel de 10 x 10 m. A continuación, se superpusieron las capas en formato raster, combinando las capas de movimientos de ladera con cada una de las variables explicativas empleando la herramienta “combine” de ArcView 3.2 y se generó una tabla de contingencia con el número de píxeles para todas las combinaciones posibles (Tabla 4). Con estos valores de los números de píxeles se calcularon los valores de  $W_i+$  y  $W_i-$  y se obtuvo un valor único de capacidad explicativa para cada categoría, sumando el valor  $W_i+$  de una determinada categoría con el resto de los valores  $W_i-$  para toda la capa (Ecuación 29).

### 2.7.2 Caracterización de la profundidad y propiedades mecánicas

Las variables de la fórmula del talud infinito son el ángulo de fricción interna, la cohesión, la fuerza de cohesión de las raíces, la profundidad del suelo, la presión de poro, el peso específico húmedo y el peso específico saturado (Ecuación 13). Con base a la recopilación de estudios realizados en el MDC se obtuvieron los valores de estos parámetros para los distintos tipos de coluviones y suelos residuales identificados. El resumen de las muestras recopiladas se presenta en la Tabla 13.

Tabla 13. Resumen de muestras tomadas por cada tipo de suelo y pruebas realizadas.

Tipo de coluvión/suelo residual	Número de muestras con parámetros de resistencia al corte (ángulo de rozamiento y cohesión)	Número de datos de profundidad	Número de muestras de clasificación de suelos (USCS)
Coluvión derivado de basaltos y andesitas	10	12	18
Coluvión derivado del Grupo Padre Miguel	9	17	2
Suelo residual derivado del Grupo Valle de Ángeles	4	7	12

Todos los resultados de cohesión y ángulo de rozamiento recopilados corresponden a muestras remoldeadas, es decir se trata de muestras que fueron remoldeadas en el laboratorio previo a realizar los ensayos de corte directo. El uso de muestras remoldeadas se considera que representa un supuesto de partida conservador para las modelaciones, dado que corresponde a una condición más desfavorable que la resistencia pico y por tanto más apropiada para suelos que han sufrido procesos de intemperación importantes (Saleh y Wright, 1997), como los coluviones y suelos residuales presentes en la zona de estudio.

Previo a la estimación del promedio y la desviación típica de cada variable se realizó una revisión con base a la literatura y criterio experto de la consistencia de los valores obtenidos de los ensayos. Con base a dicha revisión se identificó la existencia de valores de ángulo de rozamiento muy bajos, que no corresponden a los valores obtenidos en estudios de caracterización de parámetros geotécnicos para suelos similares a los que están presentes en la zona de estudio (Ayala Carcedo et al., 1991; Saleh y Wright, 1997), por lo que se decidió

eliminar las muestras con valores del ángulo de rozamiento inferiores a 10°. El número de muestras que se consideraron confiables para estimar los valores de promedio y desviación típica para cada tipo de suelo se resumen a continuación (ver Tabla 14 y detalles en los anexos [2](#), [3](#) y [4](#)):

Tabla 14. Número de muestras seleccionadas con criterio experto.

Tipo de coluvión/suelo residual	Número de muestras con propiedades de resistencia al corte	Número de datos de profundidad	Número de muestras con datos de clasificación de suelos (USCS)
Coluvión derivado de basaltos y andesitas	4	12	18
Coluvión derivado del Grupo Padre Miguel	8	17	2
Suelo residual derivado del Grupo Valle de Ángeles	3	7	12

En el apartado 3.3.2 de resultados y en los anexos [2](#), [3](#) y [4](#) se resumen los resultados de la recopilación de muestras de suelo realizada.

### 2.7.3 Capacidad explicativa de la susceptibilidad a movimientos de ladera

Se desarrolló un mapa de susceptibilidad basado en la cobertura de coluviones y suelos residuales generado en el presente estudio.

La cobertura de coluviones y suelo residuales se unió con una máscara, de forma que el mapa resultante cubriera toda la zona de estudio. Dicho mapa se convirtió en un mapa de susceptibilidad aplicando la metodología estadística bivariante propuesta por Van Westen et al., (2003), mediante la atribución a las distintas categorías del mapa de los pesos obtenidos mediante el método del peso de la evidencia .

Se seleccionó un método bivariante porque ese tipo de métodos ha sido aplicado en la mayoría de los mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera existentes en el área de estudio (Tabla 11), por lo que facilita la comparabilidad entre los resultados de los diferentes estudios. Los valores de los pesos obtenidos fueron divididos en tres categorías de susceptibilidad (alta/media/baja) utilizando el método de rupturas naturales en *QGIS*.

Los mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera en formato ráster producidos por UNAH/PNUD (2010) y BID (2015) son los únicos que cubren por completo la zona de estudio (Tabla 11). El poder predictivo de esos dos mapas de susceptibilidad se comparó con el del mapa derivado de los coluviones y suelos residuales. Los tres mapas de susceptibilidad se combinaron con el inventario de deslizamientos validado, y su precisión se estimó aplicando el método de la curva de la ratio de éxito (Chung y Fabbri, 2003; Beguería, 2006).

Este método se basa en la construcción de curvas acumuladas que asocian la proporción del área del inventario de movimientos de ladera con la proporción del área del mapa de susceptibilidad, acumulada desde el valor más alto del mapa de susceptibilidad (susceptibilidad más alta) al valor más bajo. Cuanto mayor sea el valor de la pendiente de la curva, mayor es la capacidad predictiva del modelo. De manera similar, el área bajo la curva (AUC, que varía de 0% a 100%) se puede usar para comparar modelos, siendo el modelo con el AUC más cercano al 100% el que tiene mayor precisión (Beguería, 2006).

## 2.8 Estimación del factor de seguridad aplicando el modelo del talud infinito

### 2.8.1 Aplicación en una muestra de deslizamientos

A partir de las observaciones de campo se plantea que el modelo del talud infinito puede ser aplicable para modelar los deslizamientos, transaccionales y rotacionales existentes en el área de estudio. Es decir, se considera que se cumplen una serie de simplificaciones que adopta el modelo (Tabla 15).

Tabla 15. Simplificaciones consideradas del modelo del talud infinito.

Supuestos del modelo del talud infinito	Situación identificada en la zona de estudio
El plano de falla es paralelo a la superficie del terreno	Se cumple en los deslizamientos visitados en el campo
Existe una barrera de drenaje, es decir, un sustrato mucho menos permeable que el suelo superficial, que es paralela a la superficie del terreno (puede ser el sustrato rocoso o un suelo más denso)	Se cumple en la zona de estudio, pues el coluvión se deposita paralelo a la superficie del terreno y subyacente se sitúa la roca poco alterada, que constituye una barrera de drenaje
Existe un gran contraste de conductividad hidráulica entre el suelo y la barrera de drenaje lo que produce que el flujo del agua subterránea sea aproximadamente paralelo a la barrera de drenaje y a la superficie del terreno	Este contraste es muy marcado entre los coluviones/suelos residuales y el sustrato rocoso poco alterado
Se asume que el plano de falla se extiende hasta el infinito	Idealización que, en realidad, no se cumple en ningún caso, pues la superficie de rotura siempre interseca la topografía
Se considera una única capa, aunque se pueden realizar algunos ajustes para modelizar situaciones con varias capas promediando los parámetros de cada capa según el espesor	El modelo de una sola capa, representada por los coluviones y suelos residuales, situada sobre la roca poco alterada se considera válido para la zona de estudio
El análisis se realiza en dos dimensiones. Esto es especialmente aplicable a situaciones en las que la resistencia a lo largo de los planos de falla lateral sea despreciable respecto a la resistencia a lo largo de la base y por tanto sea la resistencia de la base la que determina la estabilidad de todo el bloque	Se considera un supuesto válido

Esta hipótesis coincide con las conclusiones de Harp et al., (2002b) que considerando las condiciones geológicas y geotécnicas locales plantean que el modelo del talud infinito puede ser aplicable para caracterizar la probabilidad espacial de los movimientos de ladera existentes en el área de estudio. Para validar esta hipótesis se requiere reducir las fuentes de incertidumbre asociadas a la aplicación del modelo en zonas extensas, como son la carencia de datos de parámetros de profundidad y propiedades mecánicas de los suelos (Guimaraes et al., 2003; Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014), con el fin de identificar la incertidumbre epistémica asociada a las propias limitaciones del modelo para explicar los deslizamientos traslacionales y rotaciones existentes en el área de estudio. Para reducir la incertidumbre asociada a la falta de datos, se seleccionó una muestra de deslizamientos del inventario validado que cuenta con datos de caracterización de las propiedades mecánicas y profundidad de los suelos. La validación se realizó aplicando los programas PISA-m (Haneberg, 2007) y la extensión SHALSTAB (Dietrich y Montgomery, 1998).

#### 2.8.1.1 Modelación con el programa PISA-m

El programa PISA-m aplica el modelo del talud infinito de forma probabilista, es decir, los valores de la fórmula del talud infinito (Ecuación 13) son introducidos como funciones de probabilidad y en cada píxel se calcula la probabilidad de que el Factor de Seguridad (FS) sea inferior a 1, con valores que van de 0 a 1, utilizando el método de FOSM (Haneberg, 2004;



Hidalgo y Pacheco, 2011) (Ecuación 17 y Ecuación 18). Para poder aplicar el programa PISA-m se requieren tres coberturas en formato raster, todas con la misma extensión y tamaño de píxel: (i) cobertura “*dem*”, que corresponde al MDE, derivado de las curvas cada 10 metros y con tamaño de píxel de 10 x 10 m, (ii) cobertura “*soil*”, que incluye los distintos tipos de suelo existentes en la zona de análisis numerados de forma correlativa y (iii) cobertura “*trees*”, que incluye los distintos tipos de cobertura de vegetación existentes en la zona de estudio. Todos estos ficheros se deben convertir a formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange). Adicionalmente se debe generar un fichero de parámetros donde se establecen los parámetros de resistencia al corte y propiedades de los distintos tipos de suelos y de las coberturas vegetales. Los parámetros requeridos son la profundidad, el peso específico húmedo y saturado de cada tipo de suelo, el ángulo de rozamiento y la cohesión. Los 3 ficheros en formato ASCII y el fichero de parámetros en formato .txt. se ubican en la misma carpeta que el ejecutable PISA-m.exe y se ejecuta el programa, generando un fichero de resultados en formato ASCII que es convertido en formato raster para poder ser manipulado en el SIG.

Para esta validación los valores fueron introducidos de forma determinista. Con este fin se asumió que todos los parámetros de entrada al modelo, para cada tipo de suelo, seguían una distribución de probabilidad uniforme, planteándose valores mínimos y máximos para caracterizar las funciones de densidad de probabilidad para cada valor de la fórmula prácticamente coincidentes, lo cual es equivalente a realizar los cálculos para un valor único. Para evitar calcular valores de FS demasiado grandes el programa define un valor de ángulo de 5° por debajo del cual no realiza cálculos (Haneberg, 2007). Los valores obtenidos de la probabilidad de que el FS sea inferior a 1 fueron clasificados en rangos con base a Hammond (1992) (Tabla 3).

### 2.8.1.2 Modelación con la extensión SHALSTAB

La extensión SHALSTAB combina el modelo del talud infinito con un modelo hidrogeológico simplificado para estimar la saturación y fue diseñado para caracterizar las inestabilidades en suelos de tipo coluvión, como los que caracterizan la zona de estudio (Montgomery y Dietrich, 1994; Dietrich y Montgomery, 1998). En principio la incorporación del modelo hidrológico simplificado representa una mejora respecto al modelo del talud infinito, pues incorpora en los resultados de la modelación el efecto de la topografía en la concentración de la escorrentía superficial. La aplicación de este modelo permite identificar de forma cualitativa la importancia relativa que tienen las propiedades geotécnicas y las condiciones de saturación para cada categoría de inestabilidad. En este trabajo se ha utilizado el MDE (10 x 10 m) para la modelación con SHALSTAB. Como parámetros de entrada el programa requiere el peso específico del suelo, la profundidad y el ángulo de rozamiento interno por cada tipo de suelo considerado.

Los resultados del SHALSTAB corresponden a valores del logaritmo del parámetro  $Q/T$  (siendo  $Q$  la precipitación expresada en m/día y  $T$  la transmisividad en  $m^2/día$ ) y son clasificados en 4 categorías (Montgomery y Dietrich, 1994) (Tabla 16). La categoría “incondicionalmente inestable” corresponde a zonas que son inestables independientemente de la saturación del terreno, únicamente por las condiciones geotécnicas del sitio. De forma similar la categoría “incondicionalmente estable” corresponde a píxeles que se considera que serán estables, independientemente de las condiciones de saturación del sitio. Las condiciones “inestable” y “estable” corresponden a los píxeles que pueden ser estables o inestables dependiendo de las condiciones de saturación del terreno y que Montgomery y Dietrich (1994), con base en los resultados de diversos estudios piloto, consideran que serán estables cuando les corresponda un logaritmo de  $Q/T$  entre -2.8 y -2.2 e inestables con valores del logaritmo de  $Q/T$  entre -3.1 a -2.8.

Tabla 16. Rangos del valor Q/T definidos por Montgomery y Dietrich (1994) para los valores resultantes de SHALSTAB y clasificación según las categorías de inestabilidad. Q: precipitación (m/día). T: transmisividad (m<sup>2</sup>/día).

Valor del logaritmo de Q/T	Categoría de inestabilidad
-10 a -3,1	Incondicionalmente inestable
-3,1 a -2,8	Inestable
-2,8 a -2,2	Estable
-2,2 a 10	Incondicionalmente estable

### 2.8.1.3 Validación en zonas piloto de deslizamientos seleccionados

Los pasos realizados para la validación fueron los siguientes:

#### Selección de deslizamientos traslacionales y rotacionales para validar el modelo

La selección de deslizamientos activos para la validación es una cuestión muy importante, pues si los deslizamientos no muestran actividad y más bien han alcanzado un estado de equilibrio, la modelación debería arrojar que el FS es mayor de 1 y, por tanto, perdería sentido la validación de la aplicabilidad del modelo del talud infinito para estos deslizamientos. Para cada uno de los principales tipos de coluvión/suelo identificados, es decir, el coluvión derivado de las andesitas/basaltos, el coluvión derivado del Grupo Padre Miguel y el suelo residual derivado del Grupo Valle de Ángeles, se seleccionó, al menos, un deslizamiento que habían presentado actividad entre los años 2010-2016 y que contaba con información geotécnica y de profundidad de suelos. Para el coluvión derivado de las riolitas, no se pudo disponer de datos específicos de valores de resistencia al corte, densidad aparente y profundidad, por lo que no se seleccionó un deslizamiento piloto en este tipo de coluvión.

#### Definición de zonas piloto de análisis para la modelación

Una vez seleccionados los deslizamientos, las zonas piloto de análisis se definieron como el área del deslizamiento junto con el área de la cuenca que drena hacia los deslizamiento/s considerado/s. La definición de los límites del área de la cuenca se realizó de forma manual a partir de las curvas de nivel cada 10 metros disponibles para toda el área de estudio.

#### Realización de las modelaciones

Los insumos requeridos para la modelación son el MDE (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.

Para cada zona piloto se realizaron modelaciones con los dos programas y con dos sets de parámetros, los parámetros promedio para cada tipo de suelo recopilados en la zona de estudio y los parámetros por defecto para coluviones que incluye el programa SHALSTAB (Dietrich y Montgomery, 1998).

En la modelación con PISA-m se asumió la condición más desfavorable de saturación, es decir, que el suelo estuviera totalmente saturado y no se consideró el efecto cohesivo de las raíces, dado que la zona de estudio tiene una cobertura vegetal muy reducida. Los resultados de la probabilidad de que FS sea inferior a 1 para cada píxel, generados por PISA-m, y del logaritmo Q/T generados por SHALSTAB, fueron divididos en rangos de probabilidad, de acuerdo a los rangos definidos en la literatura (Tabla 3 y Tabla 16).

#### Evaluación de los resultados de las modelaciones

La calidad de las modelaciones se evaluó comparando el resultado de las mismas con los deslizamientos piloto seleccionados. Esta evaluación se realizó por medio de un Índice de

Ajuste (IA). Este índice de ajuste es similar al empleado por Guimaraes et al (2003) para comparar los resultados de distintas modelaciones con el modelo del talud infinito (aplicando la extensión SHALSTAB) realizadas variando los parámetros geotécnicos, con la salvedad de que, en dicha publicación se estimó el índice como la relación entre el número de píxeles de los deslizamientos clasificados como inestables con relación al número total de píxeles que corresponden a deslizamientos y, en el presente estudio, el IA se ha estimado a partir de valores de área expresados en m<sup>2</sup>. El índice IA se definió como:

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

Ecuación 32

Siendo ADI el área de los deslizamientos en m<sup>2</sup> en la zona de análisis que se superponen con áreas clasificadas como de alta y muy alta probabilidad de deslizamientos, en el caso de PISA-m, y con las áreas inestables e incondicionalmente inestables definidas por SHALSTAB, y AD el área total de deslizamientos en m<sup>2</sup> en la zona de análisis. Cuanto mayor es el valor de IA, mejor es el ajuste de la modelación para explicar los deslizamientos inventariados. Para estimar este indicador, los resultados de las modelaciones expresadas en categorías de probabilidad en formato vectorial se intersecaron empleando la herramienta “*intersection*” del programa QGIS con el deslizamiento o deslizamientos identificados por el inventario validado en la zona de análisis. Este valor se dividió por el valor AD correspondiente al área total de deslizamientos en la zona de estudio expresada en m<sup>2</sup>.

Conceptualmente este índice se basa en estimar la proporción de “verdaderos positivos” (es decir áreas del deslizamiento seleccionado que coinciden con zonas que los programas PISA-m o SHALSTAB identifican como inestables). No se consideraron en este análisis los “falsos positivos” (donde los modelos identifican zonas inestables que no coinciden con deslizamientos) porque podría suceder que los modelos esté identificando zonas inestables que aún no se encuentran activas, dado que no se basan en el principio del actualismo, sino en modelos físicos. Tampoco se consideran una buena referencia de la precisión de la clasificación los verdaderos negativos, pues pueden corresponder a zonas que el modelo clasifica de forma errada como estables y que, en realidad, son inestables. El indicador se basa en el elemento en el que se tiene más confiabilidad, los deslizamientos activos, identificados por medio del inventario.

Los resultados de las modelaciones obtenidos, tanto con PISA-m, como con SHALSTAB, se intersecaron con el mapa de pendientes expresado en grados y reclasificado en categorías de 10 grados cada una. Con esta intersección se obtuvieron los indicadores de porcentaje del área de cada categoría de probabilidad de deslizamientos de PISA-m (Tabla 3) y de inestabilidad de SHALSTAB (Tabla 16) para cada categoría de pendiente. Este indicador se empleó para analizar si existen diferencias significativas en los porcentajes de área por rango de pendiente entre las zonas clasificadas como estables e inestables por cada programa, así como para identificar tendencias en la relación entre la pendiente y la inestabilidad.

La realización de modelaciones en las zonas piloto empleando distintos grupos de parámetros de propiedades mecánicas permite identificar qué parámetros son los más apropiados, caracterizados como aquellos que generan un índice IA mayor (Guimaraes et al., 2003).

### 2.8.2 Análisis de sensibilidad del modelo del talud infinito

Teniendo en cuenta los resultados de los estudios de los casos piloto se realizó un análisis de sensibilidad de la fórmula del talud infinito, para identificar cómo dicha fórmula responde a la variación de los parámetros de entrada (Saltelli et al., 2008).

Uno de los objetivos del análisis fue determinar la dependencia que tienen los resultados del método del talud infinito de la pendiente. Por otro lado, se trató de determinar el

comportamiento del modelo con la variación de la saturación del suelo, representada por el parámetro  $H_w$ , que caracteriza la proporción de la capa de suelo saturada respecto a la potencia total de la capa, y que toma valores entre 0 a 1.

El análisis de sensibilidad se realizó para cada uno de los parámetros de suelos aplicados en los estudios de las zonas piloto. En la Tabla 17 se resumen los parámetros utilizados para los análisis de sensibilidad.

Tabla 17. Valores de los distintos parámetros del talud infinito utilizados para el análisis de sensibilidad.

Parámetro	Significado	Unidades	Valor considerado	Observaciones
$c_r$	Fuerza cohesiva de las raíces de los árboles	N/m <sup>2</sup>	Valor fijo de 0	La cobertura vegetal es muy escasa en la zona de estudio
$c_s$	Fuerza cohesiva del suelo	N/m <sup>2</sup>	Distribución normal	Tomando como promedio y desviación típica los que corresponden a cada tipo de suelos considerado
$q_t$	Carga uniforme debida a el peso de la vegetación	N/m <sup>2</sup>	Valor fijo de 0	La cobertura vegetal es muy escasa en la zona de estudio
$\gamma_m$	Peso unitario del suelo sobre la superficie freática	N/m <sup>3</sup>	Distribución normal	Tomando como promedio y desviación típica los que corresponden a cada tipo de suelos considerado
$\gamma_{sat}$	Peso unitario del suelo saturado por debajo del nivel freático	N/m <sup>3</sup>	Distribución normal	Tomando como promedio y desviación típica los que corresponden a cada tipo suelos considerado
$\gamma_w$	Peso unitario del agua	N/m <sup>3</sup>	Se toma un valor fijo	El valor es de 9.810 N/m <sup>3</sup>
$H_w(t)H_w(t)$	Variación con el tiempo de la altura del nivel freático de partida sobre la superficie de rotura	Adimensional	Entre 0 y 1	Se sensibilizó tomando valores de 0 a 1 en intervalos de 0,2 unidades
D	Potencia del suelo por encima de la superficie de rotura	Metros	Distribución normal	Tomando como promedio y desviación típica los que corresponden a cada tipo de suelos considerado
$\beta$	Pendiente	(°)	Entre 0 y 45°	Se sensibilizó tomando valores de 0 a 45°, con intervalos de 5°
$\emptyset$	Ángulo de rozamiento interno	(°)	Distribución normal	Tomando como promedio y desviación típica los que corresponden a cada tipo de suelos considerado

Las modelaciones se realizaron en la aplicación Excel empleando las opciones para generar números aleatorios a partir de la distribución normal (comando “*random*”). La notación para generar números aleatorios en Excel empleando la función normal es la siguiente:  $NORM.INV(RAND(), X, \sigma)$ , siendo  $X$  y  $\sigma$  la media y la desviación típica de la variables considerada respectivamente.

En total, se realizaron modelaciones con 216 combinaciones distintas de tipos de suelos, valores de pendiente y  $H_w$  (

Tabla 18) (4 tipos de suelos y 54 combinaciones de valores de pendiente y  $H_w$ ). Los 4 tipos de suelo considerados fueron los que se analizaron en las zonas piloto: (i) suelo con las propiedades geotécnicas promedio del coluvión de andesitas y basaltos, (ii) suelo con las propiedades promedio del coluvión del Grupo Padre Miguel, (iii) suelos con las propiedades mecánicas promedio de los suelos residuales del grupo Valle de Ángeles y (iv) suelo con las propiedades mecánicas recomendadas por Dietrich y Montgomery (1998) para coluviones. Para cada modelación se realizaron 1.000 cálculos y se obtuvo el porcentaje de cálculos de FS inferiores a 1.

Tabla 18. Combinaciones de pendiente en grados y variaciones del nivel freático ( $H_w$ ) modeladas para cada tipo de suelo. Las combinaciones se han codificado como  $PxHy$ , siendo  $Px$  el valor de la pendiente expresada en grados y  $Hy$  el valor de  $H_w$  expresado en valores entre 0 y 1.

Pendiente (°)	Valores de $H_w$					
	H0	H0.2	H0.4	H0.6	H0.8	H1
5	P5H0	P5H0.2	P5H0.4	P5H0.6	P5H0.8	P5H1
10	P10H0	P10H0.2	P10H0.4	P10H0.6	P10H0.8	P10H1
15	P15H0	P15H0.2	P15H0.4	P15H0.6	P15H0.8	P15H1
20	P20H0	P20H0.2	P20H0.4	P20H0.6	P20H0.8	P20H1
25	P25H0	P25H0.2	P25H0.4	P25H0.6	P25H0.8	P25H1
30	P30H0	P30H0.2	P30H0.4	P30H0.6	P30H0.8	P30H1
35	P35H0	P35H0.2	P35H0.4	P35H0.6	P35H0.8	P35H1
40	P40H0	P40H0.2	P40H0.4	P40H0.6	P40H0.8	P40H1
45	P45H0	P45H0.2	P45H0.4	P45H0.6	P45H0.8	P45H1

Se elaboraron gráficos de dispersión agrupados por franjas (Saltelli et al., 2008) para cada tipo de suelo, que relacionan para cada valor de  $H_w$  los rangos de pendientes con el porcentaje de los mil cálculos de FS que resultaron menores de 1. Adicionalmente, se compararon los promedios obtenidos para las distintas modelaciones. Usando las herramientas para elaborar líneas de tendencia en Excel se analizó si el promedio sigue una tendencia lineal, obteniendo el valor de los parámetros de la recta y el coeficiente  $R^2$  de Pearson.

### 2.8.3 Estimación del factor de seguridad aplicando el modelo del talud infinito de forma probabilista

Se empleó el programa PISA-m para realizar una modelación probabilista con el modelo del talud infinito en la cobertura de coluviones y suelos residuales y obtener la probabilidad espacial de que se produzcan deslizamientos a nivel de pixel, definida como la probabilidad de que el  $FS < 1$ . Para este análisis se descartó la extensión SHALSTAB, debido a que los resultados de las zonas piloto mostraron consistentemente un ajuste más bajo con respecto al PISA-m.

Para la modelación con PISA-m se utilizaron los parámetros promedio de los ensayos de suelos y se asumió que todas las variables seguían una distribución de probabilidad normal. Dicho supuesto de normalidad para las variables es coherente con uno de los supuestos principales del método FOSM (Hidalgo y Pacheco, 2011) que aplica el programa PISA-m (Haneberg, 2004, 2007). Se consideró la condición conservadora de que el suelo esté totalmente saturado, es decir  $H_w = 1$ . Este supuesto contribuye a que la probabilidad espacial obtenida por medio de esta modelación sea independiente de la probabilidad temporal, lo que es una condición del modelo conceptual planteado para la estimación de la amenaza de movimientos de ladera (2.5).

Dado que el raster obtenido por medio de la modelación con el PISA-m no presenta valores para pendientes menores de  $5^\circ$ , se procedió a completarlo para toda la cobertura de coluviones y suelos residuales. Con este fin se unió el raster resultante de la modelación con PISA-m con una máscara del coluvión a la que se le atribuyó un valor de probabilidad de FS de 0. La unión se realizó mediante la herramienta *merge* del programa *ArcView 3.2*. De este “*raster completado*” se obtuvieron los principales parámetros estadísticos usando la herramienta *grid statistics* del programa *ArcView 3.2*.

Los valores de probabilidad de que el FS sea menor de 1 del “*raster completado*” se reclasificaron de acuerdo a los rangos definidos por Hammond (1992) (Tabla 3). Siguiendo el mismo procedimiento que se aplicó para las zonas piloto, el “*raster reclasificado*” en categorías de probabilidad se convirtió en un formato vectorial, se intersectó con el inventario de deslizamientos también en formato vectorial y se obtuvo el valor del *IA* para todo el inventario de deslizamientos, empleando la Ecuación 32. Adicionalmente el “*raster reclasificado*” se

combinó con la capa de coluviones y suelos residuales y se analizó la proporción del área de cada coluvión y suelo residual que se localiza en cada categoría de probabilidad.

### *2.8.3.1 Análisis con criterio experto de los resultados de la modelación con PISA-m*

Los resultados de los estudios en las zonas piloto evidenciaron que el modelo del talud infinito tiende a subestimar las zonas de deslizamientos, al clasificar como estables las zonas con pendientes bajas que se encuentran entre el escarpe y el pie de los deslizamientos. Para subsanar este sesgo se realizó un análisis con criterio experto, delimitando polígonos de zonas potencialmente inestables. El análisis se realizó con criterio geomorfológico y considerando los resultados del PISA-m, delimitando las zonas potencialmente inestables limitadas por escarpes con probabilidades altas de que  $FS < 1$ . Se construyó una capa vectorial elaborada manualmente y, a toda la zona delimitada, se le atribuyó la probabilidad de que  $FS < 1$  correspondiente al escarpe. Se utilizó el modelo hillshade y las curvas de nivel cada 10 metros para facilitar la identificación de las formas del terreno y apoyar la delimitación de las zonas homogéneas.

Para poder establecer la probabilidad de que  $FS < 1$  en los escarpes de las zonas delimitadas manualmente, se utilizó una versión reclasificada del “raster completado”. Esta reclasificación se realizó para agrupar y simplificar el raster de probabilidades en rangos, con el fin de facilitar la identificación visual de cuál era el valor de probabilidad del escarpe. El “raster completado” con los resultados de la modelación con PISA-m se dividió en 12 clases con un ancho de clase de 0.08 unidades. El ancho de clase se definió empleando los valores de los rangos definidos por Hammond (1992) para las clases de probabilidad moderada y alta y generalizándolos para obtener 12 clases (Tabla 3).

Posteriormente, la capa vectorial elaborada con criterio experto se convirtió a formato raster, asignando a todos los píxeles de cada polígono el valor de probabilidad del escarpe y se unió al raster generado por el programa PISA-m para toda la zona de estudio mediante la opción “merge”.

## **2.9 Elaboración de funciones de daño**

El análisis del riesgo ligado a deslizamientos se centró en las viviendas situadas en deslizamientos activos, en concreto viviendas unifamiliares de una planta, que son las que predominan en la zona de estudio (BID, 2015). En el análisis no se consideraron otras infraestructuras como carreteras, caminos o edificaciones públicas, pues en la zona de estudio son las viviendas las que concentran la mayor parte del valor expuesto (BID, 2015).

Con relación a los parámetros para definir funciones de vulnerabilidad, los modelos de estimación del riesgo catastrófico definen distintas funciones de daño/vulnerabilidad considerando indicadores como: (i) sistema constructivo, (ii) el material de las paredes y (iii) la clase social (FEMA, 2011a, 2011b; Yamin et al., 2014). Generalmente se asume que hay una relación entre la clase social y el mayor o menor cumplimiento del código de construcción o la aplicación de estándares de construcción más exigentes. Por ejemplo, el programa HAZUS que tiene una amplia librería para las funciones de daño/vulnerabilidad, para la estimación del riesgo sísmico (FEMA, 2011a) distingue 36 funciones con base en el sistema constructivo (marcos de acero dúctiles, de acero arriostrado, de madera, mampostería reforzada y no reforzada, etc.) y la clase social (alta, media, baja). Para la amenaza de inundación HAZUS (FEMA, 2011b) distingue 6 tipos de funciones de vulnerabilidad, en función del tipo de sistema constructivo (madera, acero, concreto, mampostería y móvil) y la clase social (alta, media y baja a las que se asocian alturas del edificio). HAZUS no cuenta con funciones de daño/vulnerabilidad para movimientos de ladera y, en general, son muy limitados los estudios que han generado funciones para deslizamientos traslacionales y rotacionales lentos, que son el objeto del presente estudio.

La disponibilidad de datos empíricos de daños a viviendas expuestas a deslizamientos lentos es un reto importante para la presente investigación. Para subsanar esta carencia de información

diversos autores han recurrido a utilizar criterio experto o métodos heurísticos para caracterizar la vulnerabilidad asociada a deslizamientos lentos (Zêzere et al., 2008; Galve et al., 2016; Pereira et al., 2017). La posibilidad de recopilar la información relativa a daños en viviendas afectadas por deslizamientos como parte del presente estudio enfrentaba dos retos importantes. Por un lado, en los años en que se realizó el trabajo de campo de esta investigación (2016 y 2018) no se produjeron eventos significativos de lluvia que generaran la activación de deslizamientos y permitieran evaluar los daños en las viviendas. Por otro lado, cualquier intento de realización de encuestas en las viviendas de la ciudad de Tegucigalpa se enfrenta con una limitación muy importante que es la inseguridad existente en los barrios populares y precarios, por el control territorial que ejercen las pandillas.

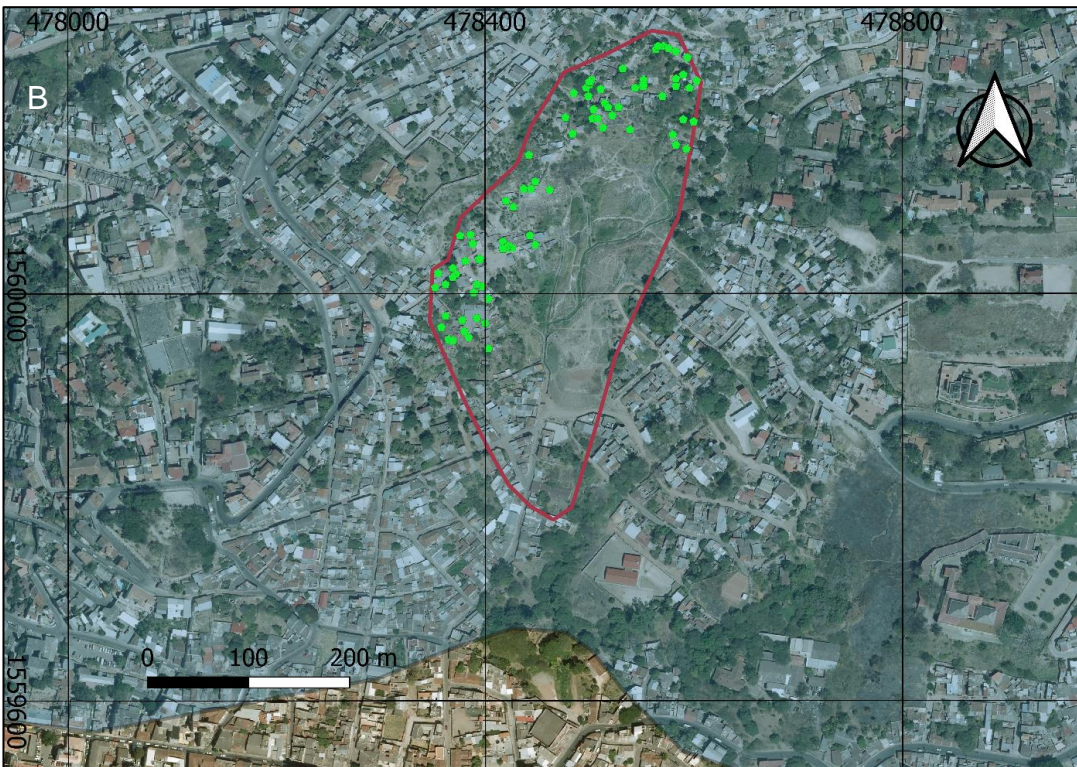
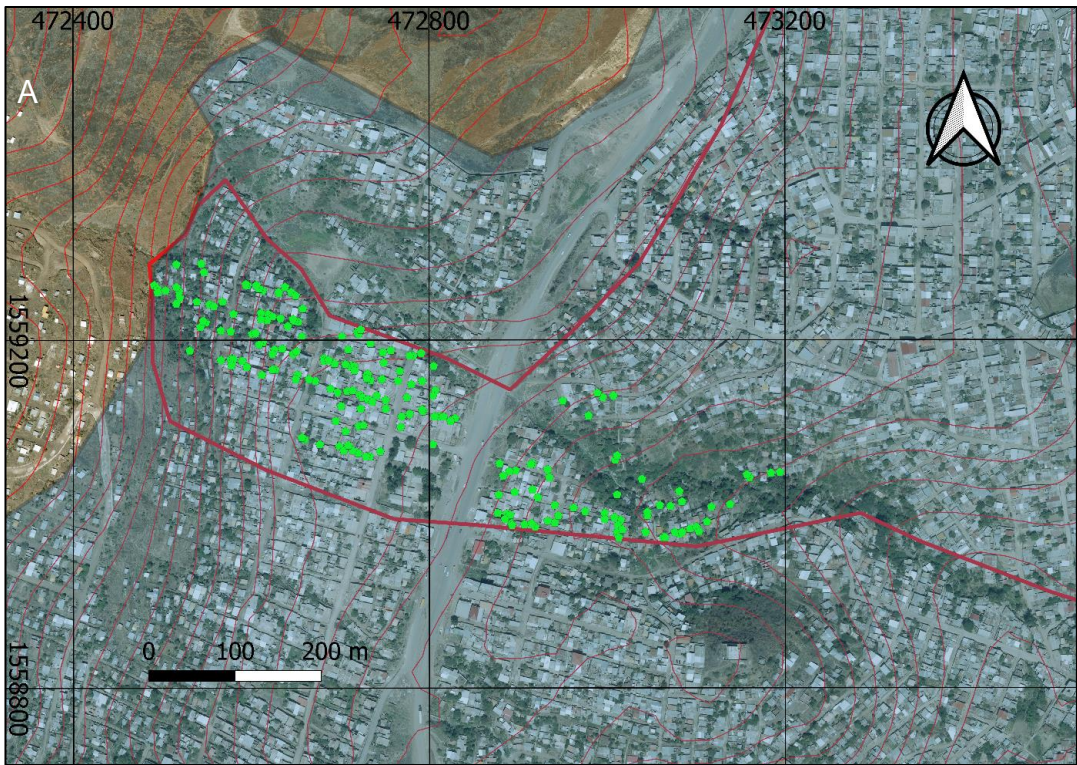
En este estudio se optó por emplear la base de datos de la encuesta realizada por la ONG GOAL entre noviembre del año 2010 y marzo del 2011. Esta base de datos presenta elementos de valor añadido como son: (i) el acceso privilegiado que tuvo la ONG para poder evaluar las viviendas, dado que se encontraban realizando diversos proyectos de desarrollo en estos barrios en dicho periodo y (ii) la representatividad de las condiciones de las viviendas después de la activación de los movimientos de ladera, dado que las encuestas se realizaron inmediatamente después de la temporada invernal del año 2010, que fue particularmente activa en términos de movimientos de ladera (Suárez y Mora, 2010; Martínez 2011b, 2011a). Una vez revisada la base de datos y eliminados algunos puntos que no aparecían correctamente georreferenciados, así como los casos donde no existía un valor para el campo “paredes de la vivienda” se obtuvieron 1.206 registros de viviendas considerados válidos. Al tratarse de encuestas ya existentes, que no fueron realizadas expresamente para el presente estudio, existen una serie de limitaciones que se analizan en detalle en este apartado metodológico.

Las encuestas consideradas válidas de la base de datos de la ONG GOAL se cruzaron con la capa en formato vectorial de las clases sociales (BID, 2015) y se clasificaron por el tipo de material de las viviendas.

### *2.9.1 Selección de encuestas*

Del total de las encuestas de la base de datos se seleccionaron las que estaban localizadas sobre deslizamientos activos correspondientes al inventario realizado en el presente estudio, con el fin de incluir únicamente viviendas que representasen la condición de que el  $FS < 1$ . No se consideraron las viviendas que presentaban daños, pero que no se encontraban sobre deslizamientos del inventario, porque existe la incertidumbre de si el daño observado es el resultado de un movimiento de ladera o de otras causas, como puede ser la existencia de deficiencias constructivas relacionados con rellenos de baja calidad, o la erosión de la cimentación asociada a escorrentías superficiales, ambos fenómenos comunes en la zona de estudio. También se excluyeron aquellas encuestas que aparecían aisladas espacialmente, seleccionando únicamente las que aparecen concentradas en deslizamientos específicos. Con estos criterios se seleccionaron 323 encuestas correspondientes a viviendas localizadas sobre 3 deslizamientos activos: (i) deslizamiento 1, sobre las colonias La Ulloa y José Arturo Duarte, (ii) deslizamiento 2, en la colonia El Edén y (iii) deslizamiento 3, en la colonia el Reparto Arriba.

En la Figura 22 se puede apreciar la distribución espacial de las encuestas en los tres deslizamientos (José Arturo Duarte/La Ulloa, Edén y Reparto Arriba).





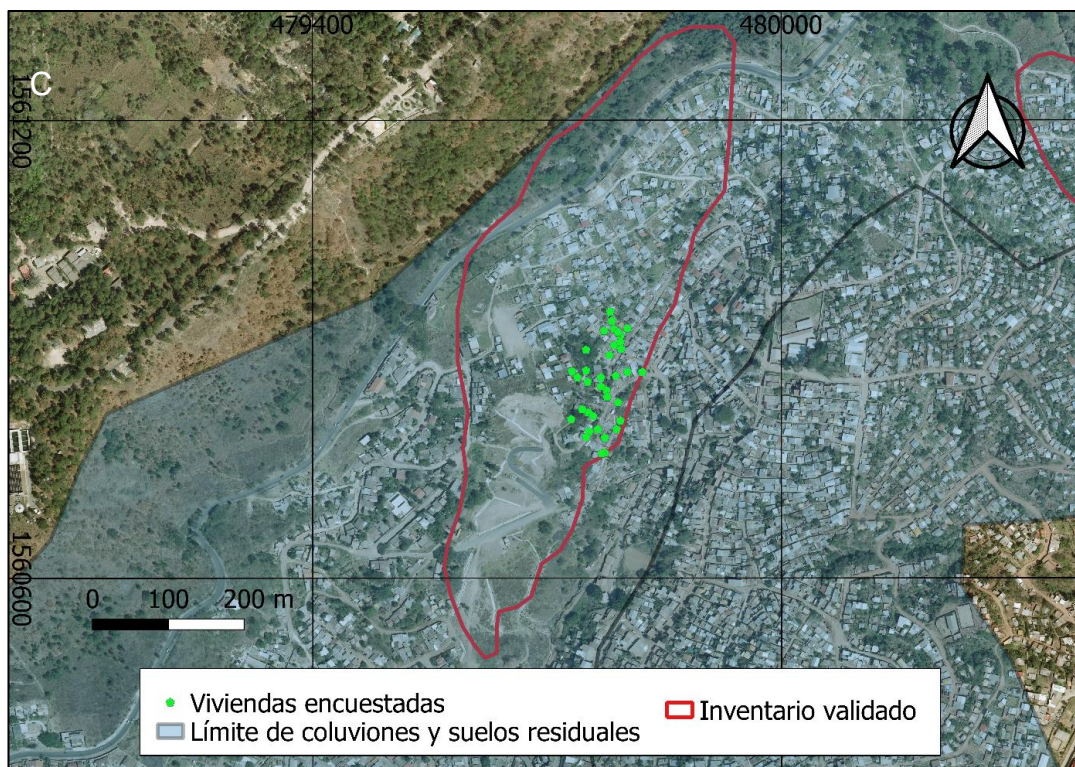


Figura 22. Distribución espacial de las encuestas de la ONG GOAL en los 3 deslizamientos considerados. A. José Arturo Duarte/La Ulloa. B. Edén. C. Reparto Arriba.

A partir de la información disponible se construyeron las funciones de vulnerabilidad considerando las siguientes categorías de viviendas según el material de las paredes y la clase social: (i) de ladrillo popular, (ii) de ladrillo precaria, (iii) de bloque popular, (iv) de bloque precaria y (v) de madera. En el caso de las viviendas de madera, dado que las visitas de campo realizadas evidenciaron que son viviendas precarias y que no presentan calidades diferenciadas entre las distintas clases sociales se optó por realizar una única función de vulnerabilidad, sin diferenciarla por clases sociales. Por otro lado, dada la escasez de los datos de viviendas de “otros materiales” (sólo 2 encuestas) y que representan una proporción baja del total de las viviendas de la zona de estudio (8% Tabla 7), se decidió aplicar para estas viviendas la función de vulnerabilidad que refleje las condiciones más desfavorables.

Dado que no se dispone de encuestas sobre deslizamientos en los barrios de clase media y residencial, se planteó aplicar a estos barrios los valores más favorables de las funciones de vulnerabilidad obtenidas de los barrios de clase precaria y popular, lo que se considera como una aproximación conservadora y por tanto del lado de la seguridad. Por otro lado, para gestionar las distintas fuentes de incertidumbre, incluyendo la relacionadas con las limitaciones de los datos, se aplicó un tratamiento que se describe a continuación en este apartado metodológico.

### 2.9.2 Estimación del error de las encuestas

Aunque en la selección de las viviendas a encuestar la ONG GOAL aplicó principalmente un muestreo basado en juicio y no estrictamente aleatorio, el error muestral se puede aproximar por medio de las fórmulas del cálculo de tamaño de muestra que corresponden a un muestro aleatorio simple (Malhotra, 2010):

$$n = \frac{Z^2 NP(1 - P)}{(N - 1)e^2 + Z^2 P(1 - P)}$$

Donde  $n$  es el tamaño de la muestra,  $N$  es el tamaño de la población,  $Z$  es el número de unidades de desviación típica en la distribución normal que producirá el nivel de confianza deseado (para un nivel de confianza del 95% sería 1.96),  $e$  es el error máximo (que sería la variable a estimar) y  $P$  es la proporción de la población que tiene la característica de estudio (en ausencia de un estudio piloto previo se asume la hipótesis conservadora de 0.5).

El tamaño de la población para cada uno de los deslizamientos con datos de daños en las viviendas se obtuvo mediante un conteo visual del número total de viviendas empleando la foto aérea escala 1:10.000 del año 2009.

### *2.9.3 Metodología para construir las funciones de vulnerabilidad*

Las funciones de vulnerabilidad se elaboraron para los distintos tipos de viviendas, asumiendo una única condición, y no distintos valores de intensidad para la amenaza de deslizamientos. La condición que se consideró es que el  $FS < 1$ . El cumplimiento de esta condición se logra al seleccionar encuestas situadas sobre deslizamientos activos.

Para construir estas funciones de vulnerabilidad a partir de los datos de las encuestas se consideró la metodología aplicada por Barbat et al. (1996) para elaborar funciones de vulnerabilidad para un valor único de intensidad de la amenaza, empleando el valor de la RMD como indicador del daño, considerando que es el indicador de vulnerabilidad que se utiliza con mayor frecuencia en los estudios de estimación probabilista del riesgo (Yamin et al., 2014).

Las encuestas elaboradas por la ONG GOAL incluyen una caracterización cualitativa del daño de las viviendas, por medio de la variable “presencia de fisuras” en: (i) paredes, (ii) piso y (iii) techo de la vivienda. Considerando estas tres variables existen 7 posibles combinaciones, que corresponden a 7 “estados de daño”: (i) fisuras en paredes, (ii) fisuras en el techo, (iii) fisuras en el piso, (iv) fisuras en las paredes + techo, (v) fisuras en paredes + piso, (vi) fisuras en piso + techo y (vii) fisuras en paredes + piso + techo. Cada uno de estos “estados de daño” se correlacionó con un valor de la RMD, aplicando las Ecuación 7 y Ecuación 8 para convertir los estados de daño en valores numéricos (Cardona et al., 2011; Yamin et al., 2014). Dado que la RMD se basa en la estimación del costo de reposición, es decir el valor de reponer el elemento dañado por un elemento nuevo, que es la aproximación más utilizada en este tipo de modelaciones (Yamin et al., 2014), la relación entre estado de daño y el valor de la RMD se obtiene al asociar a cada estado de daño los elementos que deberían reponerse y estimar qué valor económico representan estos elementos con relación al valor total de la vivienda. A continuación, se describen los pasos desarrollados para elaborar las funciones de vulnerabilidad.

#### *2.9.3.1 Estado de daño respecto a los elementos de la vivienda*

Asumiendo, con base a la conceptualización del valor de reposición, que si un elemento es afectado por una fisura se debería reponer, se vincularon los 7 estados de daño identificados en la encuesta de la ONG GOAL (fisuras en piso, paredes y techo y sus distintas combinaciones) con los elementos de la vivienda que deberían reponerse al alcanzarse este estado de daño. Esta relación entre estado de daño y los elementos a reponer será constante para todos los tipos de vivienda, no así la RMD, es decir el valor relativo de cada estado de daño con relación al valor total de la vivienda, como se analiza a continuación.

#### *2.9.3.2 Valor de la RMD correspondiente a cada estado de daño*

Existe una relación entre el valor total de la vivienda y el valor de los elementos que la componen. Dicha relación variará dependiendo del tamaño de la vivienda, los materiales de las paredes y los acabados, que hacen que algunos elementos aumenten o disminuyan su valor relativo y, por tanto, variará la relación entre un determinado estado de daño (por ejemplo, fisuras en las paredes) y el costo de reposición de este daño con respecto al valor total de la vivienda (RMD). Para poder capturar esta variabilidad se estimó el valor relativo que

representaría cada estado de daño del valor total de la vivienda para 5 viviendas tipo, representativas de las 5 funciones de vulnerabilidad consideradas (vivienda de ladrillo popular, ladrillo precaria, bloque popular, bloque precaria y madera). Como área de estas viviendas se consideraron las áreas promedio por tipo de barrio identificadas en BID (2015) (Tabla 8). Los presupuestos para cada vivienda tipo, estructurados en 17 categorías, se elaboraron a partir de una recopilación de información de presupuestos de viviendas en la zona de estudio (en el caso de las viviendas de tipo precario de bloque y de madera se emplearon presupuestos facilitados por la ONG GOAL) y se contó con el apoyo de la arquitecta hondureña Nancy Turcios para elaborar los presupuestos del resto de viviendas. Con criterio experto se definieron cuáles de los 17 elementos en que se dividieron los presupuestos de las viviendas deberían reponerse en caso de alcanzarse cada uno de los 7 estados de daño identificados en las encuestas: (i) daños en paredes, (ii) techo, (iii) piso, (iv) paredes + techo, (v) paredes + piso, (vi) piso + techo y (vii) paredes + piso + techo. Se consideró que la relación entre elementos que deberían reponerse y el estado de daño sería la misma para todos los tipos de viviendas analizadas. Tras este análisis se agruparon los 17 elementos de la vivienda en 9, considerando los elementos comunes que debían reponerse para cada estado de daño considerado.

Mediante el análisis de los datos de las encuestas de la ONG GOAL se obtuvieron la media y la desviación típica de la RMD para la condición de  $FS < I$ , para cada uno de los tipos de vivienda considerados. Dado que las viviendas de bloque popular y precario presentaban valores muy similares de media y desviación típica, se decidió considerar un solo modelo de vivienda de bloque.

### 2.9.3.3 Gestión de la incertidumbre de las funciones

Las funciones de daño/vulnerabilidad deben considerar diversas fuentes de incertidumbre epistemológica y aleatoria, como se describe en el apartado 1.4.10. En el marco del presente estudio las incertidumbres epistemológicas incluyen las relacionadas con el límite entre cada estado de daño, la incertidumbre en las relaciones entre el estado de daño y la RMD para todos los tipos de vivienda existentes en la zona de estudio y las asociadas a las simplificaciones del modelo, como son las generalizaciones requeridas debido a la falta de información de detalle de todos los tipos de edificios existentes en la zona de estudio. Por otro lado, las incertidumbres aleatorias incluyen la incertidumbre en la respuesta de los distintos tipos de edificio y la incertidumbre en el valor de la intensidad (Crozier y Glade, 2005b; Guillard-Goncalves et al., 2016). Para gestionar estas incertidumbres el daño expresado por la RMD para la condición de  $FS < I$  se consideró como una variable aleatoria, asumiendo que sigue una función de densidad de probabilidad Beta (Cardona et al., 2011; Yamin et al., 2014) y empleando los valores de la media y la desviación típica de la RMD obtenidos, para estimar los parámetros de forma de la función Beta,  $\alpha$  y  $\beta$ . Las fórmulas consideradas fueron las siguientes (Forbes et al., 2011):

*Función Beta:*

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx$$

*Ecuación 34*

*Parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la función:*

$$\alpha = \bar{x} \{ [\bar{x}(1-\bar{x})/s^2] - 1 \}$$

*Ecuación 35*

$$\beta = (1-\bar{x}) \{ [\bar{x}(1-\bar{x})/s^2] - 1 \}$$

*Ecuación 36*

Donde  $B$  es la distribución Beta, que toma valores entre 0 y 1,  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de forma de la distribución Beta,  $\bar{x}$  es la media o valor esperado y  $\sigma$  es la desviación típica.

## 2.10 Estimación probabilista del riesgo de deslizamientos

Para realizar el análisis probabilista del riesgo de desastres por deslizamientos en la zona de estudio se desarrolló un nuevo modelo conceptual, adaptado a la disponibilidad de datos. Este modelo corresponde a un modelo probabilista simplificado, dado que no se construyen escenarios de forma estocástica, sino que se analiza un número discreto de escenarios de riesgo por deslizamiento y, a partir de los mismos, se interpola la curva de excedencia de pérdidas (Barandiarán et al., 2019).

La estimación del riesgo, supone evaluar separadamente sus componentes: tanto la amenaza o peligrosidad como la exposición, es decir el valor de los bienes y las personas bajo la amenaza, y la vulnerabilidad. A continuación se detalla el proceso de cálculo de cada una de ellas.

### 2.10.1 Estimación de la amenaza de deslizamientos

El modelo de estimación de la amenaza parte del análisis del estado del arte realizado, identificando el modelo que se considera más apropiado teniendo en cuenta la información disponible y planteando ajustes a modelos existentes con el fin de superar las limitaciones identificadas en la literatura analizada.

La conceptualización de la estimación de la amenaza de deslizamientos en el presente estudio se fundamenta en los modelos estadísticos basados en el análisis de inventarios de movimientos de ladera (1.4.6.2). Dichos modelos plantean el análisis de la amenaza a deslizamientos como el resultado de la integración de la probabilidad espacial y temporal de los movimientos de ladera, asumiendo que son dos probabilidades condicionales independientes (Guzzetti et al., 2005, 2006; Jaiswal et al., 2010; Ghosh et al., 2012). La Figura 23 resume el modelo conceptual planteado para el análisis de la amenaza de deslizamientos.

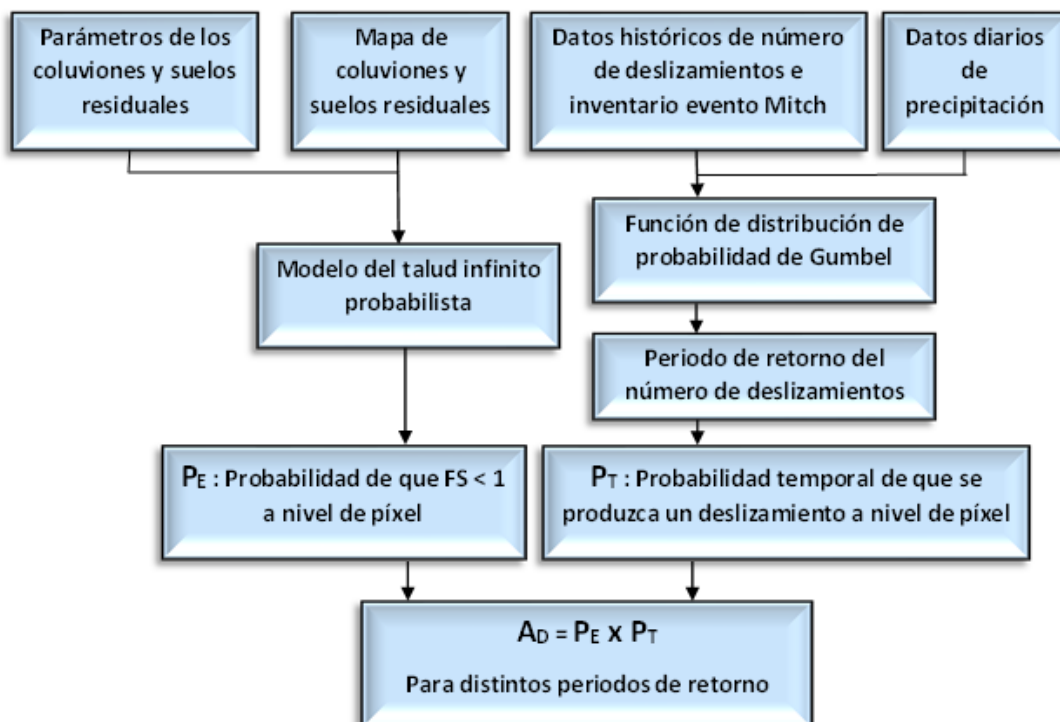


Figura 23. Modelo conceptual seguido para llevar a cabo el análisis de la amenaza de deslizamientos a nivel de píxel ( $A_d$ ), donde  $P_e$  y  $P_t$  representan la probabilidad espacial y temporal, respectivamente.

A continuación, se describe la metodología empleada para estimar los componentes del modelo.

### *2.10.1.1 Estimación de la probabilidad espacial de deslizamientos*

Para el análisis de la probabilidad espacial se empleó un modelo analítico basado en el talud infinito (el programa PISA-m), con un tratamiento de la incertidumbre de los parámetros de entrada por medio de la aplicación del método FOSM, que permite estimar las probabilidades de que el  $FS < 1$  en cada píxel.

Este enfoque tiene dos ventajas conceptuales frente a los modelos estadísticos, empleados ampliamente en la literatura para caracterizar la probabilidad espacial (Zêzere et al., 2004, 2008; Guzzetti et al., 2005, 2006; Jaiswal et al., 2010; Ghosh et al., 2012) : (i) el modelo analítico no se basa en el principio del actualismo, lo que permite identificar zonas potencialmente inestables que pudieran no ser reveladas por un modelo estadístico y (ii) al no depender del inventario de movimientos de ladera para su elaboración, que es la expresión de la probabilidad temporal y espacial combinadas, se contribuye a que la probabilidad espacial sea independiente de la probabilidad temporal.

Para contribuir a esta independencia, la modelación con PISA-m se realizó considerando que la variable  $H_w$  del modelo tome un valor fijo de 1, es decir asumiendo que la capa del terreno susceptible a deslizamientos esté completamente saturada, que es la condición más desfavorable. De esta forma se evita integrar variables dependientes del tiempo en la modelación (Haneberg, 2004), y se realiza el análisis con un enfoque hacia la seguridad, pues se considera un enfoque conservador.

### *2.10.1.2 Estimación de la probabilidad temporal de los movimientos de ladera*

Teniendo en cuenta el marco conceptual de los Modelos estadísticos basados en el análisis de inventarios de movimientos de ladera (1.4.6.2), la probabilidad temporal se estimó atribuyendo periodos de retorno a episodios históricos de movimientos de ladera.

Los episodios de movimientos de ladera se definieron como uno o varios movimientos de ladera reportados en la misma fecha y referidos a la misma estación pluviométrica (Valenzuela, 2017). El número de deslizamientos de los episodios históricos se obtuvo de la base de datos de desinventar completada con el inventario tipo evento realizado por USGS (2002) para el huracán Mitch (Harp et al., 2002a). Se consideraron únicamente deslizamientos reportados sobre la cobertura de coluviones y suelos residuales, dado que la probabilidad espacial se estimó únicamente sobre esta cobertura que concentra los deslizamientos en la zona de estudio. En el apartado 2.2 se describe con más detalle la metodología aplicada para el análisis de la base de datos de desinventar y el inventario del USGS (2002).

Una vez definidos los episodios de movimientos de ladera y el número de movimientos asociado, se estimó el periodo de retorno de dichos episodios. El periodo de retorno se obtuvo a partir de los datos de precipitación antecedente, empleando la metodología propuesta por Zêzere et al., 2004. Dicha metodología consiste en estimar una serie de indicadores de lluvia antecedente para cada una de las fechas de los eventos históricos de movimientos de ladera registrados, calcular el periodo de retorno para cada indicador de lluvia antecedente, empleando la distribución de probabilidad de Gumbel, y asignar a cada evento el periodo de retorno mayor de los indicadores de lluvia antecedente.

Para el análisis de lluvia antecedente se dispuso de la base de datos de precipitación diaria de la estación pluviométrica de la UNAH que cuenta con datos de forma continua para el periodo 1980 a 2019. Se asume que la precipitación diaria no varía espacialmente de forma sustancial dado que el área es relativamente pequeña (260 km<sup>2</sup>), hipótesis que es similar a la planteada por trabajos anteriores, que utilizaron una sola estación pluviométrica para estimar la probabilidad de disparo de los deslizamientos en toda el área de estudio (García-Urquía y Axelsson, 2015; García-Urquía, 2016).

A partir de los trabajos previos en la zona de estudio (García-Urquía y Axelsson, 2015), y la revisión de la literatura (Zêzere et al., 2004, 2008; Galli y Guzzetti, 2007; Jaiswal et al., 2010; Tien Bui et al., 2013; García-Urquía y Axelsson, 2015; García-Urquía, 2016), se seleccionaron los indicadores de lluvia antecedente de 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 30 y 60 días para la estimación del periodo de retorno de los episodios de movimientos de ladera.

De la base de datos de precipitación se obtuvieron los máximos anuales para cada indicador de lluvia antecedente considerado (1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 30 y 60 días). La serie de datos anuales de cada indicador se ajustó a una función de distribución de probabilidad tipo Gumbel, también conocida como Distribución Generalizada de Valores Extremos tipo I. La función de distribución de probabilidad de Gumbel ha sido utilizada ampliamente para estudios que correlacionan las lluvias extremas con eventos de movimientos de ladera (Zêzere et al., 2004, 2008; Khan et al., 2012; Valenzuela, 2017; Valenzuela et al., 2019).

La función de distribución de probabilidad de Gumbel es la siguiente:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\mu)}}$$

*Ecuación 37*

El valor  $F(x)$  representa la probabilidad de que la función tome un valor menor al valor  $x$  considerado. Por otro lado,  $\alpha$  y  $\mu$  son parámetros de la función, que pueden ser calculados por distintos métodos, incluyendo momentos, Chow, mínimos cuadrados, máxima verosimilitud y Kimball (Chow et al., 1988; Khan et al., 2012).

Con base en Khan et al., (2012) se optó por el método de los momentos, que emplea las siguientes ecuaciones para estimar los parámetros de la función de distribución de probabilidad:

$$\mu = \frac{Y}{\alpha}$$

*Ecuación 38*

$$\alpha = \bar{x} - \frac{\pi}{\sigma \sqrt{6}}$$

*Ecuación 39*

Donde  $Y$  es la constante de Euler (0.5772),  $\bar{x}$ , es la media y  $\sigma$  es la desviación típica.

Utilizando la base de datos de precipitación diaria se obtuvieron los indicadores de precipitación antecedente considerados para cada episodio de deslizamiento. De acuerdo con Valenzuela (2017) se eliminaron del análisis los episodios donde la precipitación antecedente de 5 días fuera menor de 20 mm, pues se considera que, en estos casos, la relación con un evento de precipitación es dudosa.

El periodo de retorno para cada indicador de lluvia antecedente se obtuvo aplicando los valores de los parámetros de la función de distribución de probabilidad de Gumbel ( $\alpha$  y  $\mu$ ) obtenidos para cada indicador (Ecuación 38 y Ecuación 39) y los valores de  $F(x)$  (Ecuación 37), con la siguiente fórmula:

$$T = \frac{1}{1 - e^{-e^{-\alpha(x-\mu)}}$$

*Ecuación 40*

Siguiendo la metodología propuesta por Zêzere et al., (2004) se seleccionó el periodo de retorno mayor de los distintos indicadores de lluvia antecedente para caracterizar cada episodio de deslizamiento. Una de las limitaciones de esta metodología para determinar la probabilidad espacial es que pueden existir episodios con el mismo número de deslizamientos que presenten distintos periodos de retorno (Zêzere et al., 2004). Para abordar esta limitación se aplicaron dos criterios: (i) cuando existen episodios con el mismo número de deslizamientos que presentan distintos periodos, se consideró el periodo de retorno mayor del conjunto de los episodios como el que caracteriza el evento con este número de deslizamientos y (ii) dado que cuanto mayor es el número de deslizamientos el periodo de retorno debe ser mayor, se excluyeron del análisis aquellos episodios que no seguían esta tendencia.

El número de deslizamientos para cada periodo de retorno fue convertido en valores de área afectada por periodo de retorno, utilizando como factor de conversión el área promedio de los deslizamientos del inventario elaborado en el presente estudio siguiendo la metodología aplicada por Bonachea (2006). Este cálculo puede generar una cierta sobrestimación, pues el inventario validado tiene un sesgo hacia deslizamientos medianos y grandes, sin embargo, se considera que dicha sobrestimación puede compensar la subestimación en el número de eventos que caracterizan las bases de datos basadas en datos de prensa, dado que sólo registran movimientos de ladera que produjeron daños y no incluyen otros eventos que pudieron ocurrir en zonas poco pobladas (Domínguez-Cuesta et al., 1999; Zêzere et al., 2015; Valenzuela, 2017; Valenzuela et al., 2017).

### 2.10.1.3 Integración de la probabilidad espacial y temporal

La probabilidad espacial de que el  $FS < I$  se integró con la probabilidad temporal de activación de un deslizamiento dada una determinada intensidad de lluvia, expresadas ambas a escala de píxel. La estimación de la probabilidad condicional de que un píxel sea afectado por un deslizamiento, dado un evento determinado de precipitación  $i$ , se realizó adaptando la ecuación propuesta por Zêzere et al., (2004) para integrar probabilidad espacial y temporal.

$$Fp_{x_j d_i} = \frac{Ta_i}{Ts} F(FS < 1)$$

*Ecuación 41*

Donde  $Fp_{x_j d_i}$  es la probabilidad condicional de que el píxel  $j$  sea afectado por un deslizamiento en el evento de precipitación  $i$ ,  $Ta_i$  es el número de píxeles afectados por deslizamientos en el evento de precipitación  $i$ ,  $Ts$  es el número de píxeles susceptibles de deslizamientos, se consideró equivalente a toda el área cubierta por coluviones y suelos residuales,  $F(FS < 1)$  es la probabilidad que el píxel presente un  $FS < I$ , en este estudio sería el resultado de la modelación probabilista con el programa PISA-m.

El término  $\frac{Ta_i}{Ts}$  representa la probabilidad temporal ( $P_t$ ) de que por efecto una precipitación determinada se produzcan las condiciones para que se active un deslizamiento en un píxel situado en la zona de estudio y el término  $F(FS < 1)$  representa la probabilidad espacial (independiente del factor de disparo) de que en un determinado píxel se produzca un deslizamiento ( $P_e$ ). Con esta propuesta metodológica la Ecuación 21 se simplifica de la siguiente forma:

$$A_d = P_t \cdot P_e$$

*Ecuación 42*

Donde  $A_d$  es la amenaza de deslizamiento.

### 2.10.2 Estimación de la exposición

La estimación del riesgo se centró en las viviendas. Su valor económico se obtuvo a partir de la cobertura elaborada por BID (2015) para todo el MDC. Dicha información se cruzó con la capa de coluvión y suelos residuales, obteniéndose 30 unidades homogéneas que se sitúan sobre la capa de coluvión y suelos residuales y que, por tanto, estarían expuestas a la amenaza de deslizamiento: 4 ocupadas por viviendas de tipo residencial, 4 por vivienda de tipo clase media, 9 por vivienda popular y 13 por vivienda precaria.

La capa vectorial de estas unidades homogéneas incluye datos de población y número de viviendas correspondiente al censo de 2001 y proyecciones de población para el año 2014. Aplicando las tasas de crecimiento poblacional que plantea BID (2015) se proyectó la población para cada unidad desde el año 2014 al 2020, utilizando una proyección geométrica mediante la fórmula:

$$P_p = P_o(1 + r)^t$$

*Ecuación 43*

Donde  $P_p$  es la población proyectada,  $P_o$  es la población original,  $r$  es la tasa de crecimiento expresada en un valor entre 0 y 1 y  $t$  es el tiempo transcurrido.

A partir del dato de población proyectado para 2020 se estimó el número de viviendas por medio de la relación población/viviendas del censo 2001. Se utilizó el censo 2001 porque se considera el más confiable por su carácter censal. Este indicador, que refleja el nivel de hacinamiento, es característico de cada unidad homogénea, variando entre valores de 2,8 a 5 y con un promedio de 4,12. Una vez estimado el número de viviendas para el año 2020 para cada una de las 30 unidades, se estimó la cantidad de viviendas por hectárea dividiendo este valor por el área total de la unidad expresado en hectáreas. Este valor de densidad se multiplicó por el área de la unidad que intersecta con el coluvión para estimar el número total de viviendas y personas expuestas a la amenaza de deslizamientos.

Se obtuvieron los valores económicos promedio por metro cuadrado de construcción para los tipos de barrios considerados (residencial, clase media, popular y precaria) del estudio BID (2015), así como el porcentaje del área construida con viviendas con respecto al área total de la unidad. Los valores por m<sup>2</sup>, que se encontraban en dólares del año 2015, fueron convertidos a lempiras utilizando la tasa de cambio promedio dólar/lempira del año 2015 ([https://www.bch.hn/tipo\\_de\\_cambiom.php](https://www.bch.hn/tipo_de_cambiom.php)), se ajustaron por inflación a valores del 2020 empleando los valores de inflación media anual para Honduras (<https://data.iadb.org/>) y se convirtieron en dólares utilizando la tasa de cambio promedio Lempira/dólar para 2020. El producto de este valor por m<sup>2</sup> proyectado a 2020 por el número de m<sup>2</sup> que intersectan con el coluvión, corresponde al valor económico de las viviendas expuestas a los deslizamientos.

### 2.10.3 Estimación de la vulnerabilidad y el daño

Con base en la metodología descrita en el apartado 2.9 se obtuvieron los valores de la media y la desviación típica de la RMD para cada uno de los tipos de vivienda considerados (vivienda de ladrillo popular, vivienda de ladrillo precaria, vivienda de bloque popular, vivienda de bloque precaria y viviendas de madera). Dichos valores se emplearon para caracterizar la variable RMD como una variable aleatoria, asumiendo que sigue una distribución de densidad de probabilidad tipo Beta (Yamin et al., 2014). Dado que los valores de la media y la desviación típica de la RMD obtenidos para viviendas de bloque precarias y populares fueron similares se optó por considerar un único modelo de vivienda de bloque.



#### 2.10.4 Estimación del riesgo

Se estimó la esperanza matemática de las pérdidas (en dólares americanos) dada la condición de que el  $FS < 1$  para cada una de las 30 unidades homogéneas que intersectan con la capa de coluviones y suelos residuales. Para incorporar la incertidumbre asociada a la vulnerabilidad, el valor de la vulnerabilidad, expresado como la RMD, para cada tipo de vivienda fue analizado como una variable aleatoria, asumiendo que sigue una distribución de densidad de probabilidad tipo Beta (Yamin et al., 2014). Así, para cada unidad homogénea se realizaron 1000 modelaciones aleatorias del valor de  $P/FS < 1$  empleando el método de Montecarlo. Los valores obtenidos se discretizaron dividiéndolos en intervalos de 20 unidades (Barbat et al., 1996) y se obtuvo la esperanza matemática de  $P/FS < 1$ , aplicando las siguientes fórmulas, elaboradas como parte del presente estudio:

$$E[P/FS < 1] = \sum_i^N (P/FS < 1)_i F_i$$

Ecuación 44

$$(P/FS < 1)_i = e \left( \sum N_{xj} V_{xj} \right)$$

Ecuación 45

Donde:

$E[P/FS < 1]$  es la esperanza matemática de la pérdida P, condicionada a que el  $FS < 1$ , para una unidad considerada.

$F_i$  es la frecuencia de la pérdida  $P_i$  condicionada a que el  $FS < 1$ .

$(P/FS < 1)_i$  es la pérdida condicionada a que  $FS < 1$  para la unidad  $i$ .

$e$  es el valor expuesto en dólares americanos para la unidad considerada, que es un valor constante para cada unidad y que se obtiene multiplicando el valor del  $m^2$  de construcción expresado en dólares americanos para la tipología de calidad de vivienda de la unidad (residencial, clase media, vivienda popular y precaria) por el área total en  $m^2$  de la unidad que se localiza sobre el coluvión.

$N_{xj}$  es la proporción (de 0 a 1) del área de la unidad considerada que corresponde a un determinado tipo de vivienda  $x_j$ . Los tipos de vivienda considerados fueron: vivienda de ladrillo popular, vivienda de ladrillo precaria, vivienda de bloque y viviendas de madera. La suma de los valores de  $N_{xj}$  es igual a 1 para cada unidad.

$V_{xj}$  es una variable aleatoria que representa la vulnerabilidad ante deslizamientos de los distintos tipos de vivienda  $x_j$  presentes en la unidad, los cuales siguen una función de distribución de densidad de probabilidad tipo Beta, con valores de 0 a 1.

Para poder resolver la Ecuación 45 se requiere estimar los valores de  $N_{xj}$ , es decir, la proporción de los tipos de viviendas para las 30 unidades homogéneas de análisis. Al no disponer de estos datos, dicha estimación se basó en las siguientes simplificaciones, que tienen en cuenta los datos disponibles y criterio experto:

La proporción entre tipos de vivienda (viviendas de ladrillo populares y precarias, vivienda de bloque y viviendas de madera) es característica para cada tipo de barrio (precarios, populares, clase media y residenciales).

Las proporciones entre tipos de viviendas para cada tipo de barrio debe ser coherente con las proporciones para todo el MDC (Tabla 7).

Únicamente se encuentran viviendas de madera en los barrios de tipo precario y popular.

Los barrios precarios presentan una combinación de viviendas de madera, bloque y ladrillo precario.

Los barrios de tipo popular presentan una combinación de viviendas de madera, bloque y ladrillo popular.

Los barrios de clase media presentan una combinación de viviendas de ladrillo de tipo popular y de bloque.

Los barrios de tipo residencial sólo tienen viviendas de bloque, que son las que presentan mejor comportamiento ante los deslizamientos.

Para barrios de tipo precario se consideraron las encuestas de la ONG GOAL como una referencia de la proporción entre los tipos de vivienda.

A partir del valor esperado de la pérdida para cada unidad homogénea se estimó el valor de la pérdida potencial para cada píxel de la unidad aplicando la siguiente ecuación, desarrollada como parte del presente estudio:

$$P|FS < 1 px_j = \frac{E[P|FS < 1]}{N_{px}}$$

*Ecuación 46*

Donde  $P|FS < 1 px_j$  son las pérdidas potenciales en el píxel  $j$ , dado que  $FS < 1$ ,  $E(P|FS < 1)$  es el valor esperado de las pérdidas para la unidad considerada y  $N_{px}$  es el número de píxeles en la unidad.

La pérdida económica a nivel de píxel dado un evento de precipitación  $i$ , se estimó con la siguiente ecuación, elaborada para el presente estudio a partir de la propuesta de conceptual de Guillard-Goncalves et al., (2016) y que integra la probabilidad condicional de que el píxel  $j$  sea afectado por un deslizamiento (expresada como la probabilidad de que el  $FS < 1$ ) dado el evento de precipitación  $i$  (Ecuación 41) con el valor de la pérdida condicionada a que el  $FS < 1$ :

$$Ppx_{ji} = Fpx_j d_i (P|FS < 1)px_j$$

*Ecuación 47*

Donde  $Ppx_{ji}$  son las Pérdidas en el píxel  $j$  dado el evento  $i$ ,  $Fpx_j d_i$  es la probabilidad condicional de que píxel  $j$  sea afectado por un deslizamiento en el evento de precipitación  $i$ , la cual integra la probabilidad espacial y temporal y  $(P|FS < 1)px_j$  son las Pérdidas potenciales en el píxel  $j$ , dado que  $FS < 1$ .

El valor total de pérdidas  $P$  para cada evento  $i$ , se obtuvo agregando los valores de pérdidas a nivel de píxel aplicando la fórmula:

$$P|Evento_i = \sum_{j=i}^n Ppx_{ji}$$

*Ecuación 48*

Los valores de pérdidas para cada periodo de retorno y sus probabilidades anuales de excedencia se integraron por medio de una curva de excedencia de pérdidas y se calculó el área bajo la curva para estimar la pérdida anual esperada para toda el área de estudio, siguiendo la fórmula (adaptada de Cardona et al., 2011):

$$PAE = \sum_{i=1}^n (P|Evento_i)F_a(Evento_i)$$

Ecuación 49

Donde *PAE* es la Pérdida Anual Esperada,  $(P|Evento_i)$  es el valor de la Pérdida para el evento *i* y  $F_a(Evento_i)$  es la frecuencia anual del evento *i*.

La extrapolación de la curva de excedencia de pérdidas y la estimación del área bajo la curva a partir de los puntos obtenidos para cada uno de los valores de periodo de retorno/probabilidad anual de excedencia se realizó mediante un análisis por intervalos (Jaiswal et al., 2008; Reclamation y USACE, 2019). Los intervalos se definen con un valor inferior y superior, correspondientes a los valores de probabilidad de excedencia anual ordenados de mayor a menor probabilidad. La probabilidad del intervalo se define como la diferencia entre la probabilidad del límite inferior y superior. El valor de la pérdida correspondiente al intervalo se denomina *valor índice* y es la media geométrica entre el valor de la pérdida del límite superior e inferior (Reclamation y USACE, 2019). El producto de la probabilidad del intervalo por el valor índice del intervalo es la contribución a la PAE del intervalo. La suma de los valores de la PAE por intervalo permite estimar la PAE total (Jaiswal et al., 2008). La Tabla 19 sintetiza el procedimiento para realizar el cálculo.

Tabla 19. Procedimiento de estimación del área bajo la curva de excedencia de pérdidas por intervalos.

Límite inferior	Pérdida		Probabilidad			Pérdida anual esperada intervalo (PAEI)
	Límite superior	Valor índice	Límite inferior	Límite superior	Probabilidad intervalo	
PA	PB	$\sqrt{PA \cdot PB}$	Probabilidad A (PRA)	PRB	PRA-PRB	$(PRA - PRB) \cdot \sqrt{PA \cdot PB}$
PB	PC	$\sqrt{PB \cdot PC}$	PRB	PRC	PRB-PRC	$(PRB - PRC) \cdot \sqrt{PB \cdot PC}$
<b>TOTAL</b>						<b><math>\Sigma(PAEI)</math></b>

## 2.11 Diseño de medidas para reducir el riesgo de deslizamiento

La medida considerada para la reducción del riesgo de deslizamiento fue la mejora del drenaje superficial. La elección de esta medida se basó en la existencia de evidencia empírica de su eficacia y eficiencia en contextos similares al de la zona de estudio, es decir, en barrios informales en zonas tropicales (Anderson et al., 2011). Además, se tuvo en cuenta que otras medidas, como modificar el perfil del terreno, resultan poco viables desde el punto de vista económico y social, dado que se trata de zonas densamente pobladas. Por otro lado, el trabajo de campo evidenció la contribución de las deficiencias de los sistemas de drenaje superficial a la activación de algunos movimientos de ladera analizados, como los de la colonia Nueva Santa Rosa, la colonia La Obrera y El Berrinche. El diseño preliminar incluye la representación gráfica de los elementos principales de la solución planteada, aplicando estándares de diseño parametrizados para estimar sus costos (MEF, 2019).

A continuación, se describe la metodología empleada para: (i) el diseño preliminar de los sistemas de drenaje superficial, (ii) estimar el beneficio de los drenajes y (iii) realizar el ACB.

### 2.11.1 Diseño de los drenajes superficiales

El diseño del sistema de drenaje incluye: (i) trazado, (ii) dimensionamiento y (iii) elaboración de presupuesto. Para que los drenajes superficiales sean eficientes deben evitar la obstrucción por detritos y presentar diseños que minimicen el mantenimiento (Anderson y Holcombe, 2013), con velocidades del flujo que superen los 0.5 m/s para evitar la sedimentación (Hernández-Muñoz, 1998). En el diseño no se incluyeron las conexiones de los sistemas de aguas grises

(drenajes de duchas, lavaderos y fregaderos) y techos de las viviendas a los canales (Anderson y Holcombe, 2013). En la implementación de este tipo de proyectos se recomienda incluir acciones de sensibilización para motivar a la población para que realicen estas inversiones de forma individual (Anderson y Holcombe, 2013).

### 2.11.1.1 Trazado del sistema de drenaje

El trazado del sistema de drenaje debe considerar: i) capturar la mayor cantidad posible de caudal de escorrentía superficial; ii) tener una apropiada conectividad que asegure la descarga a un cuerpo de agua; iii) asegurar una pendiente mínima que permita un drenaje apropiado y evite la sedimentación y iv) evitar atravesar zonas con deslizamientos activos.

La Figura 24 muestra un trazado idealizado, con un drenaje que intercepta el caudal aguas arriba del barrio (drenaje interceptor), drenajes secundarios, que siguen el trazado de las calles dentro del barrio, y un drenaje principal, que concentra el caudal de los drenajes secundarios.

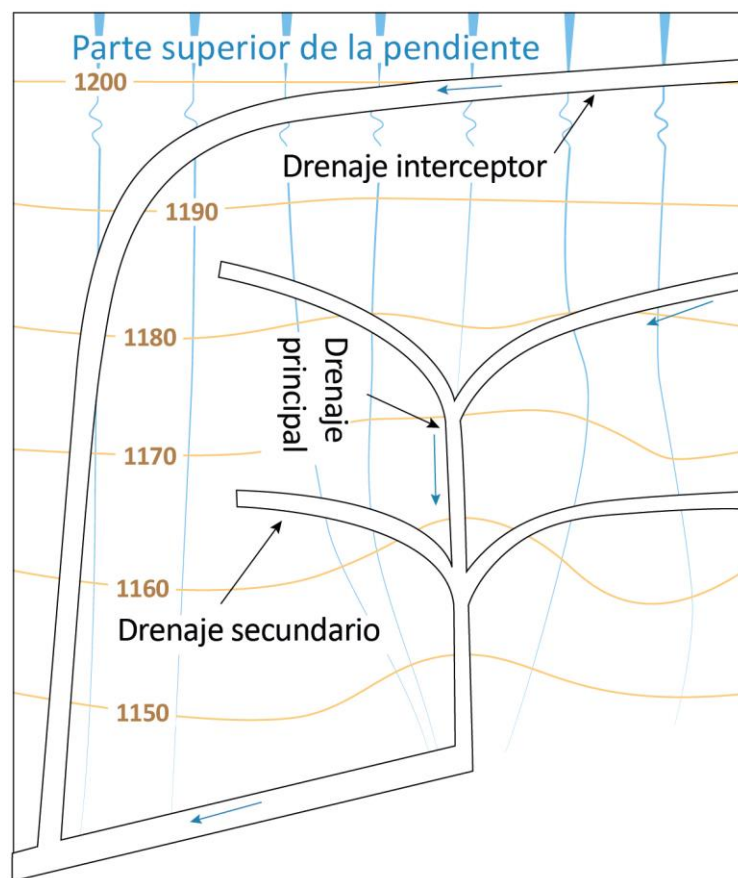


Figura 24. Esquema idealizado del patrón de trazado del sistema de drenaje. Adaptado de Anderson y Holcombe (2013).

El sistema de drenaje fue delineado de forma manual como un fichero vectorial de líneas en el SIG, empleando la foto aérea del año 2013 (escala 1:1000) para identificar el trazado de calles. Se diseñó considerando las zonas actualmente pobladas que se sitúan sobre la cobertura del coluvión y suelos residuales.

Los drenajes interceptores se trazaron en la periferia y en una cuota superior a la de la cobertura de coluviones y suelos residuales para evitar que la escorrentía de la parte superior de la cuenca urbana alcance estos suelos. Dentro de la cobertura de coluvión y suelos residuales se trazaron líneas de drenaje principales en el centro de las cuencas urbanas y líneas secundarias que confluyen a las primarias, siguiendo los trazados de las calles principales. La distancia entre

líneas secundarias se definió de forma que su espaciamento no superara la distancia entre dos cuadras, es decir 160 metros. Las líneas de drenaje principales se trazaron de forma que se evitara que atravesaran los deslizamientos del inventario validado.

Todos los drenajes se trazaron desde cotas superiores a inferiores, de forma que pudieran operar por gravedad, para lo que se utilizaron las curvas de nivel como referencia.

### 2.11.1.2 Dimensionamiento del sistema de drenaje

El drenaje debe ser dimensionado para poder conducir el caudal de la escorrentía superficial. Para ello, es necesario conocer la intensidad de la precipitación para el periodo de retorno de diseño.

La intensidad de la precipitación para el diseño del drenaje será la asociada al tiempo de concentración de la cuenca urbana para el periodo de retorno considerado. Utilizando el mapa con curvas de nivel cada 10 metros y considerando únicamente las áreas donde se localiza la población, se delimitaron de forma manual todas las cuencas urbanas en que se divide la cobertura de coluviones y suelos residuales. El tiempo de concentración se define como el tiempo del tránsito de una gota desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de análisis considerado y se estimó para cada una de las microcuencas urbanas con la fórmula de Kirpich (INTEMA, 2002):

$$T_c = 0.01947 \left[ \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right]$$

*Ecuación 50*

Donde  $T_c$  es el tiempo de concentración en minutos,  $L$  es la longitud del cauce principal en metros, que se midió para cada microcuenca con el SIG y  $S$  es la pendiente del cauce en m/m, que se obtiene como el cociente entre la diferencia de elevación y la longitud dividiendo el desnivel entre la longitud del cauce principal. La diferencia de elevación se obtuvo empleando el mapa de curvas de nivel cada 10 metros.

La intensidad asociada al periodo de concentración de cada microcuenca urbana y al periodo de retorno considerado se obtuvo empleando las curvas Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) para el aeropuerto de Toncontín, situado en el centro de la zona de estudio (INTEMA, 2002) (Figura 1). Empleando los valores de las constantes correspondientes a la estación de Toncontín (INTEMA, 2002) se pueden obtener los valores de intensidad para una lluvia con una duración y periodo de retorno determinado aplicando la siguiente ecuación:

$$i = \frac{a}{(b + d)^n}$$

*Ecuación 51*

Donde  $i$  es la intensidad de la lluvia en mm/hora,  $d$  es la duración de la tormenta, duración que para el diseño de drenajes se considera igual al tiempo de concentración,  $a$  y  $b$  son constantes para la estación de Toncontín que dependen del periodo de retorno considerado (se cuenta con datos para 2, 5, 10, 20 y 50 años de periodo de retorno) y  $n$  es una constante característica de cada estación.

El periodo de retorno para el diseño de los drenajes se seleccionó con base en los periodos de retorno obtenidos para la construcción de la curva de excedencia de pérdidas por deslizamientos.

A partir del valor de la intensidad de precipitación de diseño en mm/hora obtenida para cada microcuenca urbana el caudal de la escorrentía fue dimensionado utilizando el método racional,

cuya aplicación se recomienda principalmente en cuencas pequeñas con periodos de concentración inferiores a 30 minutos (INTEMA, 2002):

$$Q = \frac{CiA}{360}$$

*Ecuación 52*

Donde  $Q$  es el caudal de escorrentía en  $m^3/s$ ,  $i$  es la intensidad de la lluvia en  $mm/hora$ ,  $A$  es el área de la cuenca vertiente en hectáreas, estimada mediante el SIG, y  $C$  es el coeficiente de escorrentía adimensional.  $C$  se calcula con base en la metodología del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (*SCS*). Para la zona de estudio se seleccionó un valor general de  $C$  de 0.7, considerando que está densamente poblada y asumiendo la condición en que los suelos tienen un moderado potencial de escorrentía por encontrarse húmedos (INTEMA, 2002).

El valor del área de la cuenca vertiente para los drenajes secundarios se estimó midiendo manualmente en el SIG el área que drena hacia cada canal. En el caso de los drenajes interceptores el área vertiente se calculó como la de toda la microcuenca que se sitúa por encima del drenaje y el partearguas de la microcuenca; mientras que, para los drenajes principales se estimó como el área de toda la microcuenca urbana en la que se encuentra el drenaje.

La velocidad media que un canal abierto puede conducir en condiciones de flujo contante se puede estimar con la ecuación de Manning-Strickler (Hernández-Muñoz, 1998):

$$V_m = \frac{21.1}{(k_s)^{\frac{1}{6}}} R_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$$

*Ecuación 53*

Donde  $V_m$  es la velocidad media ( $m/s$ ),  $R_h$  es el radio hidráulico ( $m$ ), la relación entre la sección y el perímetro mojado,  $I$  es la pendiente piezométrica en  $m/m$  y  $k_s$  es la rugosidad absoluta de Strickler, que es una contante tabulada para los distintos tipos de paredes de los drenajes. Considerando que los canales se construirían con mampostería se aplicó un valor  $k_s$  de 0.00565 (Hernández-Muñoz, 1998).

El caudal asociado a una la velocidad de flujo obtenida con la ecuación de Manning-Strickler para una sección considerada se puede estimar con la fórmula (Anderson y Holcombe, 2013):

$$Q = AV$$

*Ecuación 54*

Donde  $Q$  es el caudal en  $m^3/s$ ,  $A$  es la sección en  $m^2$  y  $V$  es la velocidad en  $m/s$  obtenida con la ecuación de Manning-Strickler.

El dimensionamiento de las secciones de tramos de los drenajes se realizó por medio de un proceso iterativo (Anderson y Holcombe, 2013). Para cada uno de los tramos del sistema de drenaje se estimó la velocidad del flujo considerando el canal completamente lleno, aplicando la Ecuación 53. Se tomaron como referencia las secciones tipo de canal que utiliza el AMDC, partiendo de la menor sección posible para cada tramo considerado. A partir del valor de la velocidad se estimó el valor del caudal con la Ecuación 54. Dicho caudal se comparó con el resultado del caudal de diseño obtenido para el tramo del drenaje considerado aplicando la Ecuación 52. Si el valor del caudal estimado era menor al del caudal de diseño se repetía el proceso con una sección inmediatamente mayor, hasta identificar la sección menor con capacidad para conducir el caudal de diseño.

### *2.11.1.3 Diseño y presupuestación del sistema de drenaje*

Los diseños y presupuestos con que cuenta el AMDC para canales abiertos de mampostería de diferentes dimensiones, así como para las tapas de los canales y cajas de control, fueron empleados como referencia para elaborar el presupuesto del diseño preliminar del sistema de drenaje. Dicha información se estandarizó siguiendo un formato único, que permitió obtener un valor de precio por metro lineal para cada canal, incluyendo el valor de las tapaderas de concreto, estructuras de refuerzo y cajas de inspección. Las cajas de control facilitan el mantenimiento y las tapas permiten cubrir los drenajes de forma que se puedan integrar en las aceras. Para las secciones de los canales cuyas dimensiones exceden las de las secciones tipo con que cuenta la AMDC, se realizó una extrapolación.

Se elaboró un gráfico correlacionado los datos de área de la sección de los canales y sus presupuestos, provistos por la AMDC. Por medio de la  $R^2$  de Pearson se verificó si existía una correlación lineal entre las secciones y el presupuesto. Una vez verificada la existencia de una correlación lineal se obtuvo la ecuación de la recta de correlación. Esta ecuación se empleó para estimar el presupuesto del metro lineal de las secciones para las que no se disponía de datos del AMDC.

### *2.11.2 Análisis costo/beneficio*

#### *2.11.2.1 Estimación del beneficio de los drenajes*

Anderson et al. (2011) identificaron que, sistemas de drenaje similares a los diseñados en este trabajo, reducían por completo los deslizamientos asociados a precipitaciones con periodos de retorno en torno a 5 años. Considerando los periodos de retorno de eventos de deslizamientos que fue posible modelar en el presente estudio, para la estimación de las pérdidas evitadas se asumió que la construcción de los canales de drenaje diseñados para un periodo de retorno de 10 años evitaría por completo los eventos de deslizamiento hasta, al menos, un periodo de retorno de 6 años. Esta hipótesis está basada en la evidencia empírica de la reducción del riesgo de deslizamientos asociada a este tipo de medidas (Anderson et al., 2011) y se considera conservadora dado que: (i) el periodo de retorno del diseño de los canales es superior al periodo de retorno del evento que se prevé evitar, lo que permite compensar eventuales ineficiencias en el funcionamiento del sistema de drenaje y (ii) Anderson et al. (2011) también observaron una reducción en los deslizamientos para periodos de retorno mayores, beneficios que no fueron considerados en el presente análisis.

Una vez elaborada esta nueva curva de excedencia de pérdidas, considerando el beneficio de las obras, se estimó la Pérdida Anual Esperada (PAE) como el área bajo la curva usando el método por intervalos (Tabla 19). El beneficio anual de las obras de reducción del riesgo se estimó como la diferencia entre la PAE sin obras de reducción del riesgo y la PAE con obras de reducción del riesgo (Mechler, 2005, 2016).

#### *2.11.2.2 Estimación de indicadores VAN y TIR*

Se proyectaron los beneficios de las obras y los costos de construcción y mantenimiento para un periodo de vida útil de 20 años. Se aplicó la Ecuación 9 para estimar el Valor Actual Neto (VAN) de las medidas considerando una tasa de descuento del 12%, que es la que se emplea generalmente en proyectos de inversión públicos (Mechler, 2005). Adicionalmente se estimó la Tasa Interna de Retorno (TIR). Si el VAN es mayor de 1 la obra se considera costo eficiente, mientras que si la TIR es mayor del 12% la inversión se considera viable (Mechler, 2005; Mechler, 2016; Barandiarán et al., 2019).

Los beneficios corresponden a las pérdidas anuales evitadas. Este valor se incrementó en un porcentaje anual, correspondiente al incremento anual en el valor expuesto (Mechler, 2005, 2016). Este incremento anual se estimó a partir del estudio de BID (2015), que proyecta el incremento del valor expuesto en el área de estudio entre 2015 y 2050. A partir de los valores

proyectados se obtuvo la tasa anual media de incremento de la exposición considerando una proyección geométrica (Ecuación 43). La tasa obtenida de incremento anual de la exposición de las viviendas fue del 2%, que es próximo al 1.5% aplicado por Mechler (2005).

Los costos totales incluyen la inversión en las obras y los costos de mantenimiento. El mantenimiento se estimó en un 2% anual del costo de inversión (Gulliver et al., 2005). Los costos de inversión en las obras se ajustaron aplicando un factor de corrección para considerar el precio social de la mano de obra no calificada. El precio social de la mano de obra corresponde al verdadero costo de oportunidad que tiene para la sociedad el uso social de la mano de obra, eliminando distorsiones que se incluyen en los precios de mercado de la mano de obra, como impuestos, subsidios, etc (León-Castillo y García-Salas, 2019). Como mano de obra no calificada se define como las labores desarrolladas por trabajadores que no requieren estudios o experiencia previa (León-Castillo y García-Salas, 2019). El precio social para la mano de obra se estima empleando un factor de corrección aplicando la siguiente ecuación (León-Castillo y García-Salas, 2019):

$$PSMO_{nc} = FC.Pm$$

Ecuación 55

Donde  $PSMO_{nc}$  es el Precio Social de la Mano de Obra no calificada,  $FC$  es el factor de corrección y  $Pm$  es el precio de mercado. Se aplicó el  $FC$  de 0,634, que corresponde a un estudio realizado para la región centroamericana (Rojas, 2019). Para poder estimar el valor de esta reducción en el costo de la inversión se estimó la proporción que representa la mano de obra no calificada del total de la inversión. Dicha estimación se realizó empleando las fichas de precios unitarios para un canal de dimensiones de 0,3 m x 0,4 m (único canal para el que se disponía de datos detallados del costo de la mano de obra) y asumiendo que dicha proporción se mantiene en el resto de los canales.

En la Tabla 20, se resumen los principales supuestos empleados para el ACB.

Tabla 20. Principales supuestos aplicados en el ACB.

Elemento del análisis	Supuesto	Cálculo realizado
<b>Costos</b>		
Periodo de retorno del diseño	10 años para el diseño de las obras con base en la información de precipitación disponible. Este valor es superior al del periodo de retorno de 6 años que se quiere reducir, pero se considera que este margen está del lado de la seguridad y permite compensar alguna ineficiencia del sistema.	Se usó el valor para 10 años de las curvas IDF para dimensionar los caudales que deben circular por los canales.
Mantenimiento	Los costos de mantenimiento de las obras se estimaron en un 2% del costo de la inversión con base en Gulliver et al. (2005)	
Precio social	Se consideró un descuento al costo total de la obra con base en el valor de la mano de obra no calificada, dado el beneficio que genera este concepto en términos generación de empleo.	Se obtuvo el valor que representa la mano de obra no calificada del costo unitario de un metro de un canal tipo y se le aplicó a este valor un factor de 0,634 con base en Rojas (2019).
Periodo de retorno del diseño	10 años para el diseño de las obras con base en la información de precipitación disponible. Este valor es superior al del periodo de retorno de 6 años que se quiere reducir, pero se considera que este margen está del lado de la seguridad y permite compensar alguna ineficiencia del sistema.	Se usó el valor para 10 años de las curvas IDF para dimensionar los caudales que deben circular por los canales.



<b>Beneficios</b>		
Pérdidas evitadas	Reducción del 100% de las pérdidas por deslizamientos asociadas al evento de 6 años, según Anderson et al. (2011).	Se aplicó el método de los intervalos para estimar las pérdidas evitadas en escenarios con obras y sin obras.
Inicio de los beneficios	Las obras se construyen en verano durante 2 años. El primer año ya se generan parte de los beneficios.	En el año 1 se asumió que se completaría el 50% de la obra. En el invierno de ese mismo año, se proveería el 50% del beneficio anual.
Aumento anual en el valor de pérdidas evitadas	Las pérdidas evitadas se incrementarían en un porcentaje anual debido al aumento de la exposición asociado al crecimiento poblacional, según Mechler (2005).	Se consideraron las proyecciones del aumento de la exposición en el área de estudio para 2050 (BID, 2015) para obtener el valor del incremento anual de la exposición
Pérdidas indirectas	Porcentaje de pérdidas indirectas estimadas según (Mechler, 2005, 2016).	El valor de las pérdidas indirectas para las viviendas se estimó como un 10% de los daños con base en los datos históricos de las pérdidas causadas por eventos climáticos a las viviendas para la región de Centroamérica en el periodo 1972-2010 (Bello et al., 2014)

Siguiendo la propuesta metodológica de Mechler (2005), se realizó una sensibilización de los valores empleados para el ACB, excluyendo del cálculo de los beneficios el incremento de las pérdidas evitadas por el aumento de la exposición, el precio social y las pérdidas indirectas y asumiendo un mayor costo del mantenimiento.

### 3 RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la elaboración de una cartografía que recoge la distribución espacial de las pérdidas probables ocasionadas por deslizamientos y de la identificación de acciones para la reducción de este riesgo en el Municipio del Distrito Central de Honduras. El inventario de deslizamientos y la cartografía de coluviones y suelos residuales es la base para la construcción de un modelo probabilista de la amenaza de deslizamientos, que combinado con la construcción de funciones de vulnerabilidad para las viviendas permite estimar las pérdidas probables en la zona de estudio. En los apartados 3.1 y 3.2 se comparan los inventarios y se describe el inventario validado, en el apartado 3.3 se caracteriza la cobertura de coluviones y suelos residuales, en el apartado 3.4 se estima la probabilidad espacial de los deslizamientos y en el 3.5 se elaboran funciones de daño para viviendas. Posteriormente en el apartado 3.6 se estima la amenaza ante deslizamientos, integrando la probabilidad espacial y temporal, y se estima el riesgo combinando el análisis de la amenaza con la vulnerabilidad y la exposición. Finalmente, en el apartado 3.7 se elabora el diseño preliminar de medidas de reducción del riesgo ante deslizamiento y se estima su beneficio/costo.

#### 3.1 Comparación entre inventarios

La comparación entre diferentes indicadores considerados para los cuatro inventarios previos disponibles se resume en la Tabla 21. Como se puede apreciar, para todas las combinaciones posibles de comparativa de inventarios, el valor estimado para el error de mapeo (Carrara et al., 1992) es del 79% o superior. Respecto al número de movimientos de ladera que coinciden entre inventarios, la coincidencia más alta ocurre entre Lotti (1986) y el resto de los inventarios (más del 50% de los movimientos de ladera del inventario de Lotti se superpone a movimientos de ladera de otros inventarios), seguido de JICA (2002) (por encima del 37%) y USGS (2001) (por encima del 36%) (Tabla 21). La coincidencia más baja ocurre entre el inventario de UPI-JICA (2014) y el resto de los inventarios, con menos del 20% de movimientos de ladera en común.

Con respecto a la distribución espacial analizada comparando la densidad por pares de inventarios, los inventarios de Lotti (1986) y JICA (2002), así como los inventarios de USGS (2002) y UPI-JICA (2014), presentan distribuciones espaciales similares, como lo indican los valores de los Índices de Imprecisión de la clasificación (IIC) de 20% y 28%, respectivamente.

Tabla 21. Resultados de la comparación entre inventarios de deslizamientos previamente existentes para el MDC.

Inventario A /Inventario B	CC (km <sup>2</sup> )	E	NA	NB	PA/B (%)	PB/A (%)	CAI	CBI	IIC
JICA/Lotti	132.3	79	63	14	29	64	33	28	20
USGS/Lotti	139.6	97	567	14	6	50	93	31	56
UPI-JICA/Lotti	271.4	91	1451	25	7	72	199	63	63
JICA/USGS	113.8	93	60	489	37	10	30	79	48
JICA/UPI-JICA	132.3	88	63	1014	68	11	33	120	66
USGS/UPI-JICA	139.6	97	567	1069	36	20	93	124	28

CC, Área de cobertura común; E, error de mapeo; NA, número de movimientos de ladera del inventario A en el CC; NB, número de movimientos de ladera del inventario B en el CC; PA/B, Movimientos de ladera del inventario A que coinciden con movimientos del inventario B; PB/A Movimientos de ladera del inventario B que coinciden con movimientos del inventario A; CAI, número de celdas de 1 km<sup>2</sup> del mapa de densidad del inventario A con deslizamientos; CBI, número de celdas de 1 km<sup>2</sup> del mapa de densidad del inventario B con movimientos de ladera; IIC, índice de imprecisión de la clasificación de los mapas de densidad de los inventarios A y B.

#### 3.2 Inventario de movimientos de ladera validado

El inventario validado (Figura 25) incluye 24 deslizamientos traslacionales y 4 rotacionales, con un área total de 4.119.267 m<sup>2</sup> y un área promedio de 147.116 m<sup>2</sup> por deslizamiento, siendo el más pequeño de 822 m<sup>2</sup> y el más grande de 741.934 m<sup>2</sup>. Del área total del inventario (según

la clasificación de COSUDE-INETER, 2005), el 85,6% pertenece a macro deslizamientos ( $> 100.000 \text{ m}^2$ ), el 14% a deslizamientos grandes ( $10.000\text{--}100.000 \text{ m}^2$ ) y el 0,4% a deslizamientos pequeños ( $< 1000 \text{ m}^2$ ) (Figura 26).

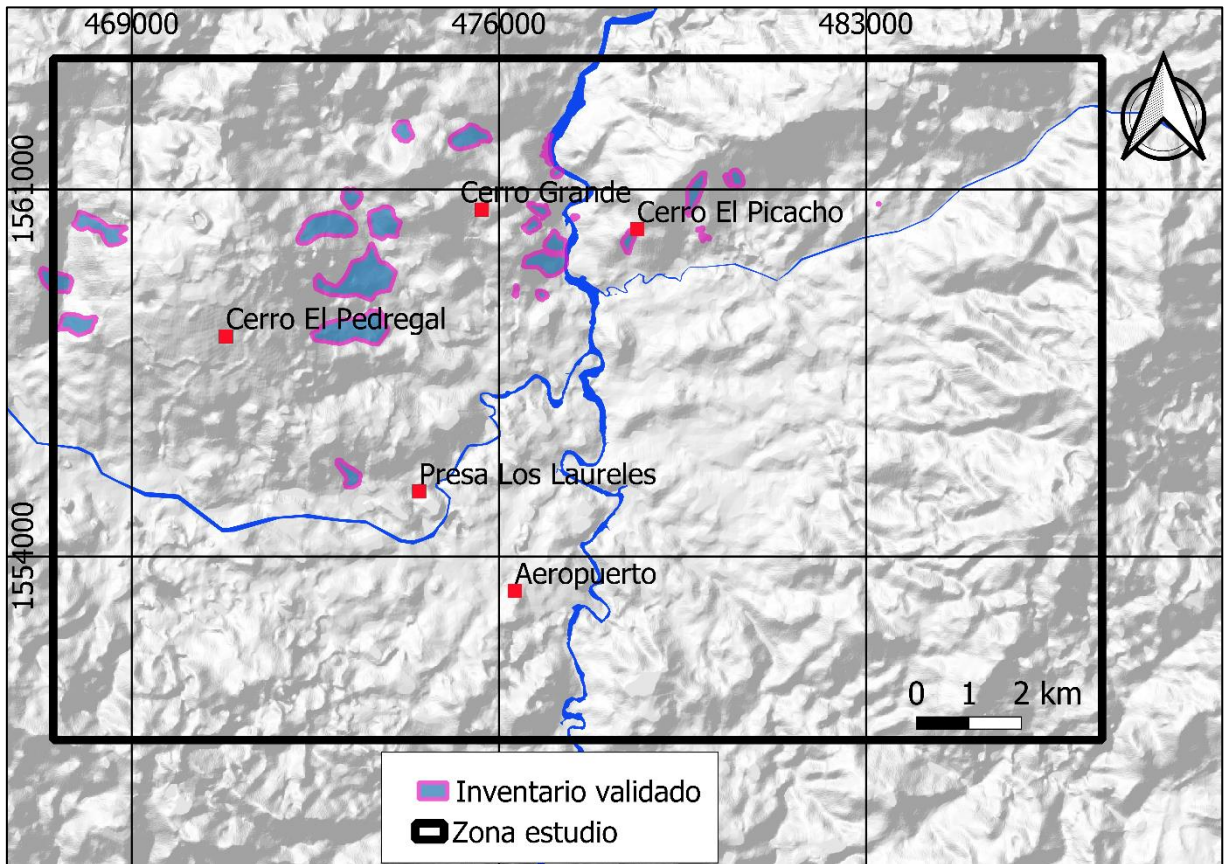


Figura 25. Mapa del inventario validado elaborado en el presente estudio.

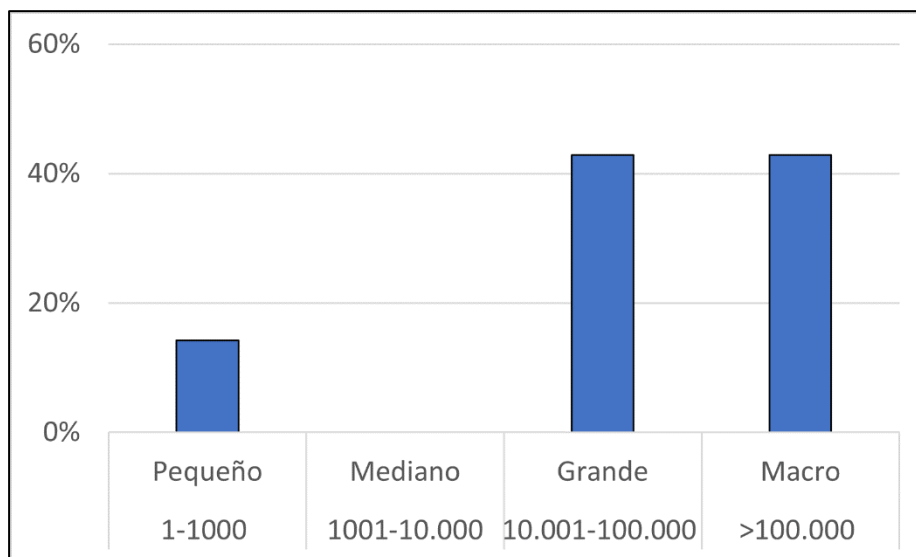


Figura 26. Porcentaje de deslizamientos por tamaño para el inventario validado. Unidades de superficie en  $\text{m}^2$ .

El análisis de la pendiente del inventario validado (Tabla 22) evidencia que el 34% del área del inventario presenta pendientes inferiores a 10%. Si se analiza el promedio por deslizamiento, los 28 deslizamientos del inventario validado presentan un 10% de su área con menos de 5° de pendiente y un 35% con menos de 10°.

Tabla 22. Distribución de superficies del inventario validado por rangos de pendiente.

Rango de pendiente (°)	Proporción área para el inventario (%)	Promedio por deslizamiento (%)
0-5	7,1	10
5-10	28,0	25
10-15	29,4	33
15-20	19,0	24
20-25	9,6	17
25-30	4,6	10
30-35	1,4	2
35-40	0,6	8
40-45	0,3	3
<b>Total</b>	100	

La Tabla 23 resume los resultados de la comparación entre el inventario validado y los inventarios anteriores. El error de mapeo es del 84% o más para la comparación con cualquier inventario. Con relación al número de movimientos de ladera que coinciden entre el inventario validado y los inventarios previos, un número significativo de movimientos de ladera mapeados dentro de la zona de estudio por los inventarios previos no pudieron ser verificados durante el desarrollo del nuevo inventario: 1.339 movimientos de ladera del inventario UPI-JICA (2014) (94% de los movimientos de ladera de este inventario localizados en el área de cobertura común con el inventario validado), 528 movimientos de ladera del inventario de USGS (2002) (93%), 41 movimientos de ladera en el inventario de JICA (2002) (65%) y 15 movimientos de ladera del inventario de Lotti (1986) (56%) no pudieron ser verificados mediante interpretación de fotografías aéreas y trabajo de campo durante el desarrollo del inventario validado.

Tabla 23. Resultados de la comparación entre inventarios previos para el MDC y el inventario validado.

Inventario validado /Inventario A	CC (km <sup>2</sup> )	E	NV	NA	PN/A	PA/N	CVI	CAI	IIC
<b>Validado/Lotti</b>	260.0	84	28	27	39	44	33	63	18%
<b>Validado/JICA</b>	132.3	84	25	63	52	35	33	25	24%
<b>Validado/USGS</b>	139.6	93	25	567	56	7	28	93	52%
<b>Validado/UPI-JICA</b>	260.0	94	28	1,425	75	6	33	198	71%

CC, Área de cobertura común; E, error de mapeo; NV, número de deslizamientos del inventario validado en el CC; NA, número de deslizamientos del inventario A en el CC; PN/A, Deslizamientos del inventario validado que coinciden con movimientos de ladera del inventario A; PA/N, Deslizamientos del inventario A que coinciden con movimientos de ladera del inventario validado; CVI, número de celdas de 1 km<sup>2</sup> del mapa de densidad del inventario validado con deslizamientos (inestable); CAI, de celdas de 1 km<sup>2</sup> del mapa de densidad del inventario A con movimientos de ladera; IIC, índice de imprecisión de la clasificación de los mapas de densidad del inventario validado y el inventario A.

En términos de distribución espacial, el inventario validado muestra más similitudes con los inventarios de Lotti (1986) y JICA (2002) (IIC 18% y 24% respectivamente), que con los inventarios de USGS (2002) y UPI-JICA (2014) (IIC 52% y 71%). La Figura 27 muestra que las distribuciones espaciales de los inventarios de movimientos de ladera de Lotti (1986) y JICA (2002) registran movimientos en celdas específicas en el cuadrante noroeste y parte centro del área de estudio, mientras los inventarios de USGS (2002) y UPI-JICA (2014) recogen movimientos de ladera de forma dispersa en toda el área de estudio. El inventario validado, al igual que los inventarios de Lotti (1986) y JICA (2002), identificó deslizamientos de tierra en un número limitado de celdas (33 celdas en el inventario validado, 63 en el inventario de Lotti y 25 celdas en el inventario de JICA) ubicadas en el cuadrante noroeste del área de estudio, mientras los inventarios de USGS (2002) y UPI-JICA (2014) cartografiaron movimientos de ladera en la mayor parte de la zona de estudio (93 y 198 celdas con movimientos de ladera, respectivamente) (Figura 27).

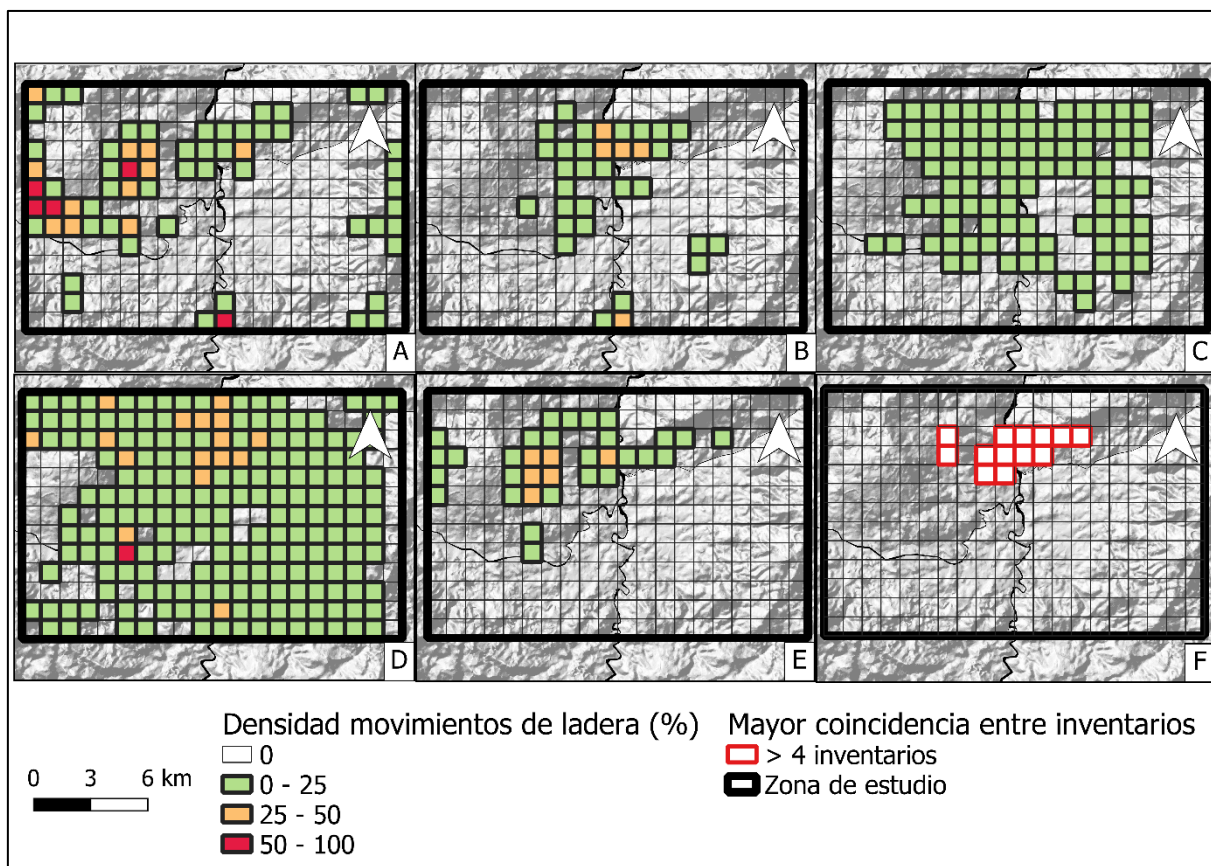


Figura 27. Mapas de densidad (MD) de los inventarios de movimientos de ladera, expresados en porcentaje del área de cada celda que esta cubierta por movimientos de ladera. A. MD del inventario de Lotti (1986). B. MD del inventario de JICA (2002). C. MD del inventario de USGS (2002). D. MD del inventario de UPI-JICA (2014). E. MD del inventario validado. F. Celdas de 1 km<sup>2</sup> con coincidencia entre 4 inventarios o más.

### 3.3 Caracterización de coluviones y suelos residuales

#### 3.3.1 Distribución espacial

La superficie total que ocupa la cobertura de coluviones y suelos residuales, mapeada a escala 1:10.000 mediante trabajo de campo y fotointerpretación, es de 39 km<sup>2</sup>, lo que supone un 15% del área de estudio (Figura 28). Se identificaron 3 tipos de coluviones y un suelo residual, cada uno caracterizado por la roca madre de la que derivan:

Coluviones derivados de los basaltos y andesitas situados en las laderas del cerro El Pedregal, en torno a un cono volcánico relictos (Figura 29).

Coluviones derivados de riolitas en torno al cerro Grande (Figura 30).

Coluviones derivados de las tobas de la formación Padre Miguel situados en las laderas del cerro Grande y cerro el Picacho (Figura 31).

Suelos residuales generados por la alteración del grupo Valle de Ángeles, localizados en las laderas del cerro Grande y el cerro El Picacho (Figura 32).

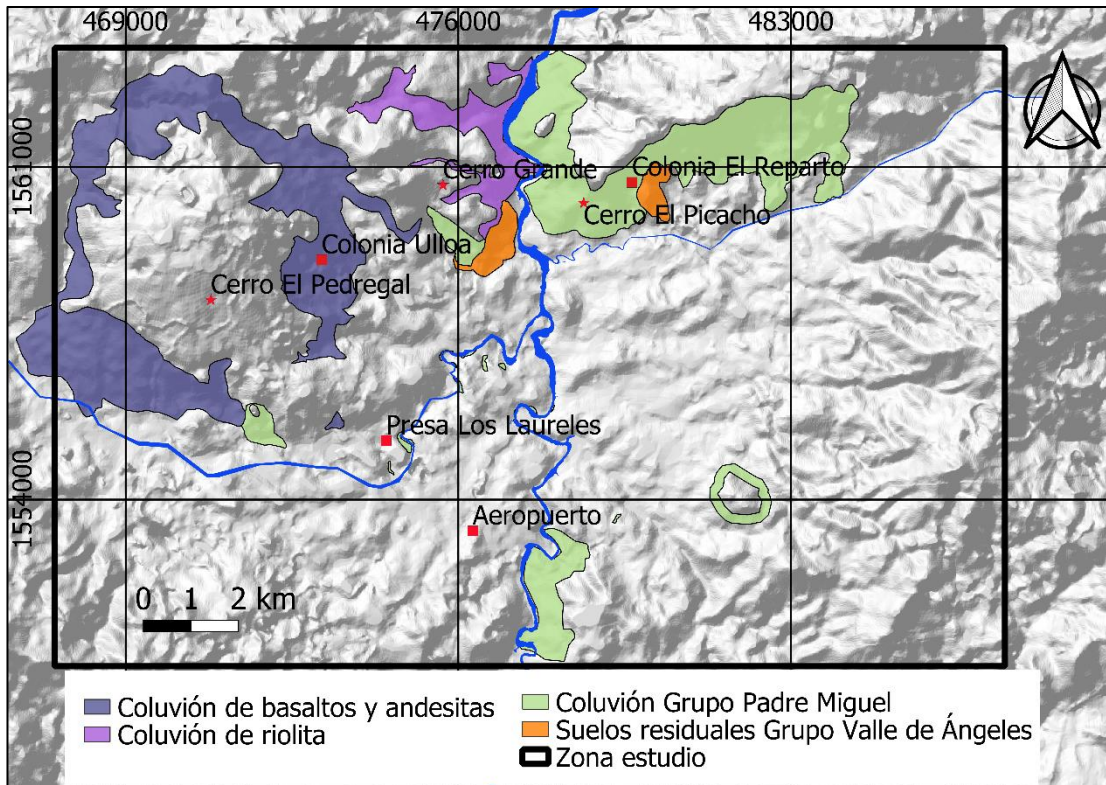


Figura 28. Distribución de coluviones y suelos residuales en la zona de estudio.



Figura 29. Afloramiento localizado en las proximidades de la colonia La Ulloa. A la izquierda de la línea se localiza el coluvión derivado de los basaltos y andesitas. A la derecha se identifica el depósito de un flujo afectando al propio coluvión de andesitas y basaltos. Foto propia agosto 2016.



*Figura 30. Afloramiento de coluvión (círculo rojo) derivado de la riolitas en el pie del cerro Grande. Foto propia agosto 2016.*



*Figura 31. Afloramiento de coluvión derivado de la formación Padre Miguel afectado por flujo en la colonia El Reparto. Foto propia marzo 2018.*



Figura 32. Coluvión de la formación Padre Miguel sobre suelo residual generado por la alteración del Grupo Valle de Ángeles, en las laderas del cerro el Picacho. Foto propia marzo 2018.

Los recubrimientos correspondientes a coluviones y suelos residuales se caracterizan por presentar pendientes moderadas. Así, el 97% de la cobertura presenta pendientes inferiores a 30° (Figura 33 y Tabla 24). Cuando se analiza según la tipología de coluvión (Figura 34) se identifica que el coluvión de basaltos y andesitas presenta un 98% de su superficie en terrenos con menos de 30° de pendiente; el coluvión del grupo Padre Miguel, un 97%; el coluvión del suelo residual de grupo Valle de Ángeles, un 99% y el coluvión derivado de las riolitas, el 93%.

Tabla 24. Distribución de pendientes para la cobertura de coluvión y suelos residuales.

Pendiente (°)	Área (%)	% acumulado
0-5	11,2	11,2
5-10	25,7	36,9
10-15	27,0	63,9
15-20	18,2	82,1
20-25	10,2	92,3
25-30	5,0	97,3
30-35	1,9	99,2
35-40	0,6	99,8
40-45	0,2	99,9
45-50	0,1	100,0
50-55	0	100,0
55-60	0	100,0

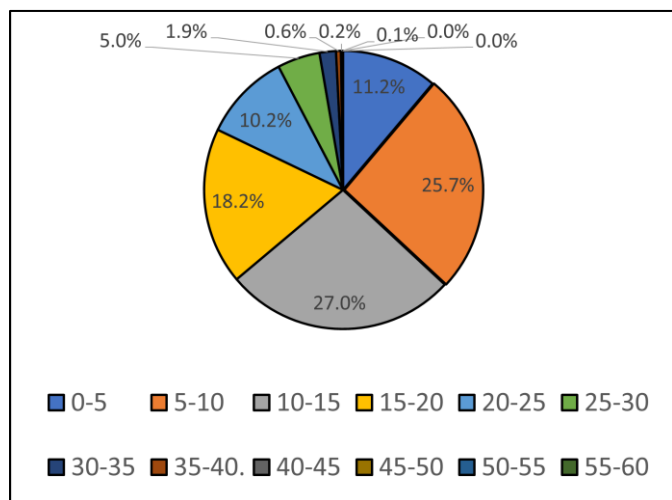


Figura 33. Área ocupada por coluvión por rangos de pendiente



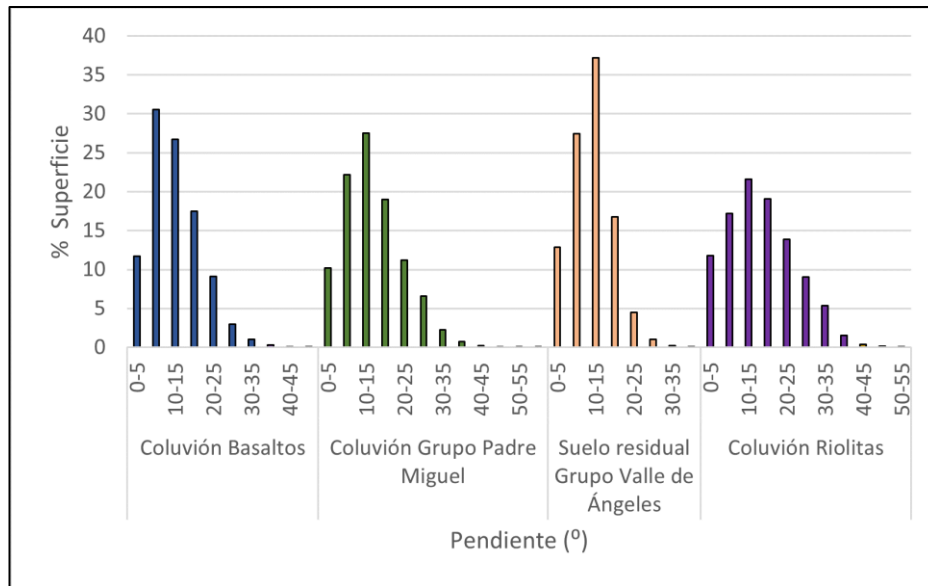


Figura 34. Distribución de superficies según el tipo de coluvión y el rango de pendiente expresada en grados.

El análisis de la intersección entre los inventarios de movimientos de ladera y la cobertura de la capa de coluvión y suelos residuales, permite constatar que: el 87% del área del nuevo inventario validado interseca con la cobertura de la capa de coluvión y suelos residuales, el 80% del inventario de JICA (2002); el 71% del inventario de Lotti (1986), el 51% del inventario de USGS (2002) y el 45% del inventario de UPI-JICA (2014). Además, cabe destacar que la capa de coluvión y suelos residuales interseca las 13 celdas con coincidencia entre 4 y 5 inventarios de movimientos de ladera (Figura 27).

### 3.3.2 Profundidad y propiedades mecánicas

El promedio y la desviación típica para las distintas propiedades de los coluviones y suelos residuales, obtenidas de las muestras seleccionadas, se resumen en la Tabla 25. En los anexos 2, 3 y 4 se incluyen las tablas con todos los datos de profundidad y propiedades mecánicas recopilados.

Tabla 25. Valores promedio de los parámetros mecánicos utilizados en las modelaciones. P, promedio, D, desviación típica, C, cohesión, PEH, peso específico húmedo,  $\phi$ , ángulo de rozamiento interno, PR, profundidad.

Tipo	P PEH (Kg/m <sup>3</sup> )	D PEH (Kg/m <sup>3</sup> )	P C (N/m <sup>2</sup> )	D C (N/m <sup>2</sup> )	P $\phi$ (°)	D $\phi$ (°)	P PR (m)	D PR (m)
Coluvión derivado de basaltos y andesitas	1.940	76	47.317	25.876	11,25	1,71	14,56	8,59
Coluvión derivado del Grupo Padre Miguel	1.628	280	28.562	29.482	23,88	15,16	8,11	4,55
Suelo residual derivado del Grupo Valle de Ángeles	1.846	243	23.536	24.751	13,33	2,52	8,49	3,83

Con relación al peso específico del suelo saturado se contaba con un número muy limitado de muestras de los coluviones derivados del Grupo Padre Miguel y los suelos residuales derivados del Grupo Valle de Ángeles, no disponiéndose de datos para los coluviones derivados de los basaltos y andesitas. Los datos disponibles y los valores obtenidos se resumen en la

Tabla 26.

Tabla 26. Datos utilizados para estimar el peso específico saturado de los suelos.

Tipo de suelo	Número de muestras	Promedio de peso específico saturado (kg/m <sup>3</sup> )	Desviación típica del peso específico saturado (kg/m <sup>3</sup> )
Coluvión derivado de basaltos y andesitas	0	n/a	n/a
Coluvión derivado del Grupo Padre Miguel	3	1.963	87
Suelo residual derivado del Grupo Valle de Ángeles	1	2.151	n/a

En el caso de los coluviones derivados de los basaltos y andesitas, al no disponer de datos del peso específico del suelo saturado, se tomó como referencia la relación promedio entre suelo saturado/suelo húmedo para los otros dos tipos de suelo, de 1.18, para estimar el peso específico saturado.

Con relación a los resultados de la clasificación de las muestras con el Sistema Universal de Clasificación de Suelos (SUCS) (GEOCONSULT, 2018) se aprecia una importante dispersión de los resultados ([anexo 4](#)). En el caso del coluvión derivado de los basaltos y andesitas se dispone de 18 muestras clasificadas. El 39% corresponde a limos y arcillas (17% Limos inorgánicos -MH- y 22% Arcillas inorgánicas muy plásticas - CH) y el 56% corresponden a arenas (22% Arenas arcillosas -SC-, 28% SM y 6% Arenas limosas -SP). Se han recopilado 12 muestras clasificadas del suelo residual del Grupo Valle de Ángeles, de las cuales el 58% corresponden a limos y arcillas (33% Arcillas inorgánicas de plasticidad mediana -CL-, 17% MH y 8% CH), el 25% son arenas (17% SC y 8% SM) y un 17% Gravas arcillosas (GC). En el caso de los coluviones del Grupo Padre Miguel sólo se cuenta con dos muestras clasificadas, una corresponde a gravas GC y otra a arcillas CL.

### 3.3.3 Capacidad explicativa respecto a otras variables

La aplicación del método del peso de la evidencia (Bonham-Carter, 1994) permitió determinar la capacidad explicativa de las distintas variables empleadas para construir los mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera. La capacidad explicativa de las variables seleccionadas (litología, pendiente, distancia a ríos y riachuelos) se comparó con la del mapa de coluviones y suelos residuales elaborado en el presente estudio. La Tabla 27 resume los resultados obtenidos.

Tabla 27. Pesos de las distintas capas analizadas para explicar la presencia o ausencia de movimientos de ladera en los distintos inventarios existentes, obtenidos con el método del peso de la evidencia.

Factor	Clase del factor	Peso inventario validado	Peso inventario Lotti	Peso inventario USGS	Peso inventario JICA	Peso inventario UPI-JICA
Litología	Padre Miguel	0,80	0,49	0,36	0,48	0,20
	Depósitos aluviales	-0,70	1,16	1,48	-0,07	-0,52
	Conos aluviales	-1,04	-2,53	-2,51	-1,84	-0,42
	Andesitas/basaltos/riolitas	-1,22	-2,26	-0,82	-0,64	0,30
	Valle de Angeles- Río Chiquito	-1,34	-0,75	-0,32	-0,05	-1,08

	<b>Valle de Angeles-Villanueva</b>	-2,57	-2,14	-0,65	-1,49	-0,59
<b>Pendiente (°)</b>	<b>0 – 10</b>	-0,66	-0,40	-0,70	-1,47	-1,23
	<b>10 – 20</b>	0,65	0,53	0,42	0,97	0,90
	<b>20 – 30</b>	0,24	-0,07	0,81	0,51	0,59
	<b>30 – 40</b>	-0,62	-0,80	0,36	0,12	0,12
	<b>40 – 50</b>	-2,39	-0,73	-0,38	-0,12	-0,53
	<b>50 – 60</b>		-0,83	-2,02	-1,33	-1,66
<b>Distancia a ríos (m)</b>	<b>0 – 50</b>	0,15	0,14	0,29	-0,06	0,09
	<b>&gt; 50</b>	-0,19	0,27	-0,20	0,47	0,36
<b>Coluvión</b>	<b>Coluvión de Basaltos and andesitas</b>	3,97	4,26	0,34	1,03	1,78
	<b>Coluvión Valle de Angeles</b>	3,88	2,44	4,71	4,03	3,33
	<b>Coluvión Riolitas</b>	3,30	0,18	2,86	3,62	2,95
	<b>Coluvión Padre Miguel</b>	1,12	2,04	2,18	3,63	2,67
	<b>Sin coluvión</b>	-3,13	-2,01	-0,98	-2,31	-0,88

Se puede apreciar que, para el inventario validado, la capacidad explicativa del mapa de factores de litología es muy baja para todas las clases, con valores entre 0,80 y  $-2,57$ . Del mismo modo, la capacidad explicativa de las clases del mapa de pendientes es baja, variando entre 0,65 y  $-2,39$ .

De igual forma para el inventario validado, la distancia a ríos y arroyos muestra pesos bajos, que van desde 0,15 a  $-0,19$ . Por lo tanto, la distancia a ríos y arroyos no parece ser un factor condicionante estadísticamente relevante para la presencia de deslizamientos.

Para el inventario validado, el coluvión presenta pesos significativamente mayores que el resto de los factores condicionantes considerados. El coluvión derivado de basaltos y andesitas presenta un peso cercano a 4 (3,97), seguido del suelo residual del Valle de Ángeles (3,88), el coluvión de riolitas (3,30) y el coluvión de la Formación Padre Miguel (1,12). Las áreas sin coluviones tienen un peso muy bajo ( $-3,13$ ).

Para los otros inventarios, los resultados son similares: la capacidad explicativa más alta, con valores superiores a 2,44 (Tabla 27), se asocia a las categorías de la capa de coluvión y los suelos residuales. Se concluye que, aunque existen diferencias significativas entre el inventario validado y los inventarios previos con relación a los movimientos de ladera específicos mapeados por cada inventario, existe una coincidencia en la identificación de movimientos de ladera en la cobertura de coluviones y suelos residuales.

En el caso de los inventarios de USGS (2002) y UPI-JICA (2014), la alta capacidad explicativa de la capa de coluvión y suelos residuales evidencia que, aunque ambos inventarios se caracterizan por un patrón espacial distinto al resto, caracterizado por mapear movimientos de ladera dispersos en toda el área de estudio (ver 3.1), coinciden con los otros inventarios en mapear movimientos de ladera en la capa de coluviones y suelos residuales.

### 3.3.4 Capacidad explicativa del mapa de susceptibilidad

El análisis de la capacidad explicativa para la presencia de movimientos de ladera de cuatro mapas de factores condicionantes (litología, pendiente, distancia a ríos y riachuelos y el mapa de coluviones / suelos residuales), evidenció que el mapa de coluviones y suelos residuales tiene el mayor peso en la determinación de la presencia de movimientos de ladera para todos los

inventarios y que el resto de los factores presentan baja capacidad explicativa. Por lo tanto, para la elaboración del nuevo mapa de susceptibilidad se consideró únicamente el mapa de coluvión y suelos residuales a escala 1:10.000.

Tras aplicar los pesos obtenidos con la metodología del peso de la evidencia a cada tipo de coluvión y suelo residual, así como a la porción de la zona de estudio que no presenta la cobertura de coluviones y suelos residuales, los valores obtenidos se dividieron en tres rangos empleando el método de las roturas naturales en *QGIS*, categorizando los rangos como alta, media y baja susceptibilidad (Tabla 28). Dicha categorización permitió evidenciar que el coluvión derivado del Grupo Padre Miguel presenta menor susceptibilidad que los otros coluviones y suelos (Figura 35).

Tabla 28. Pesos obtenidos con el método del peso de la evidencia para el mapa de coluviones y suelos residuales y categorías de susceptibilidad.

Rangos de valores	Categoría de susceptibilidad
-3,3 - 1,11	Baja
1,11 - 3,30	Media
3,30 - 3,97	Alta

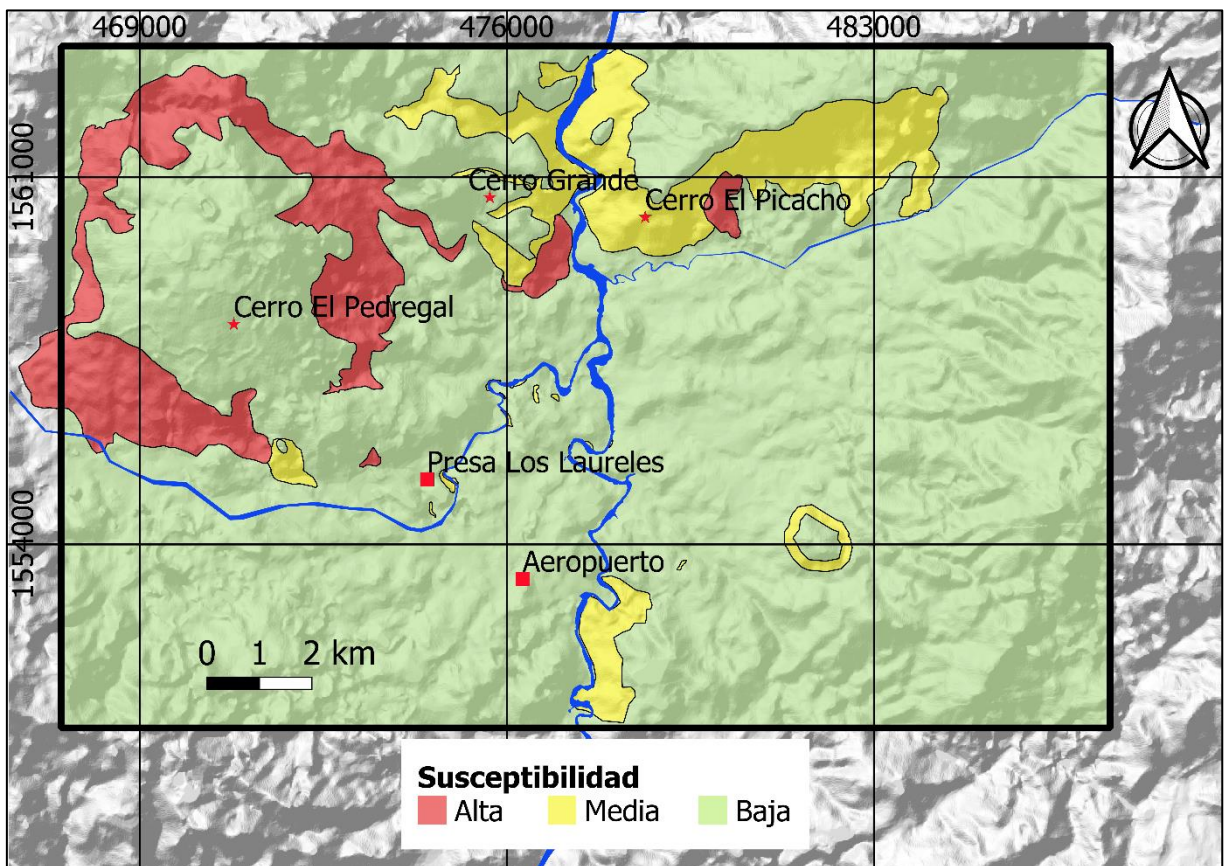


Figura 35. Distribución de la susceptibilidad a movimientos de ladera basada en la distribución de coluviones y suelos residuales.

### 3.3.4.1 Comparación entre el nuevo mapa de susceptibilidad y los previos

El análisis del poder predictivo de los mapas de susceptibilidad empleando el método de la curva de la ratio de éxito (Chung y Fabbri, 2003; Beguería, 2006), evidenció que el mapa de susceptibilidad elaborado a partir de la cobertura de coluviones y suelos residuales (Figura 35) tiene mayor poder predictivo respecto a los deslizamientos del inventario validado que los mapas de susceptibilidad de la UNAH/PNUD (2010) y de BID (2015).

La curva de la ratio de éxito relaciona el porcentaje de los deslizamientos del inventario validado con el porcentaje del área del mapa de susceptibilidad, acumulado de mayor valor de susceptibilidad a menor valor. El mapa de susceptibilidad elaborado a partir de la cobertura de coluviones y suelos residuales muestra una AUC que los otros dos mapas de susceptibilidad analizados. El AUC representa el 88.64% en el caso del mapa derivado de los coluviones y suelos residuales, el 79.79% para el mapa de susceptibilidad UNAH/PNUD y el 69.80% en el caso del mapa de BID (2015) (Figura 36). Este resultado confirma el alto poder predictivo del mapa de coluviones y su aplicabilidad para identificar las zonas susceptibles a deslizamientos en la zona de estudio.

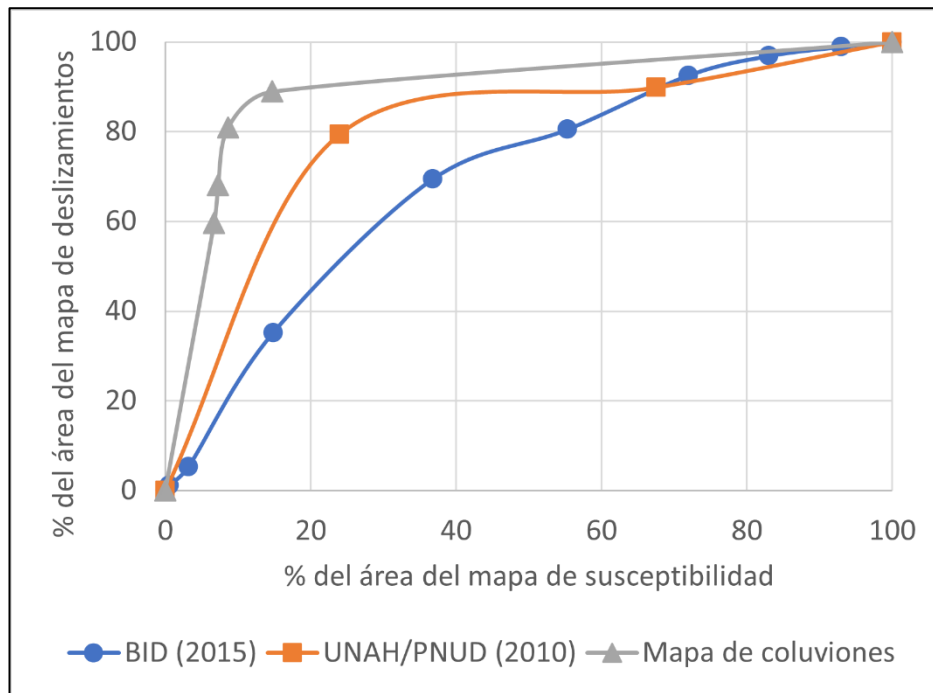


Figura 36. Comparativa de curvas de la ratio de éxito para los distintos mapas de susceptibilidad considerados.

### 3.4 Estimación del factor de seguridad aplicando el modelo del talud infinito

#### 3.4.1 Estimación en una muestra de deslizamientos

Se seleccionaron 6 deslizamientos en 4 zonas de análisis (Figura 37): (A) el deslizamiento de las colonias La Ulloa y José Arturo Duarte, (B) el deslizamiento de la colonia La Obrera, (C) dos deslizamientos en el sector de El Berrinche y (D) dos deslizamientos en la colonia Nueva Santa Rosa. En todos estos deslizamientos existen evidencias de actividad reciente (posterior al año 2010), se cuenta con datos de perforaciones y muestras de suelos y están distribuidos de forma que permiten tener resultados en los principales tipos de suelos en el área de estudio: (i) el coluvión derivado de las andesitas/basaltos, (ii) el coluvión derivado del Grupo Padre Miguel y (iii) el suelo residual derivado del Grupo Valle de Ángeles.

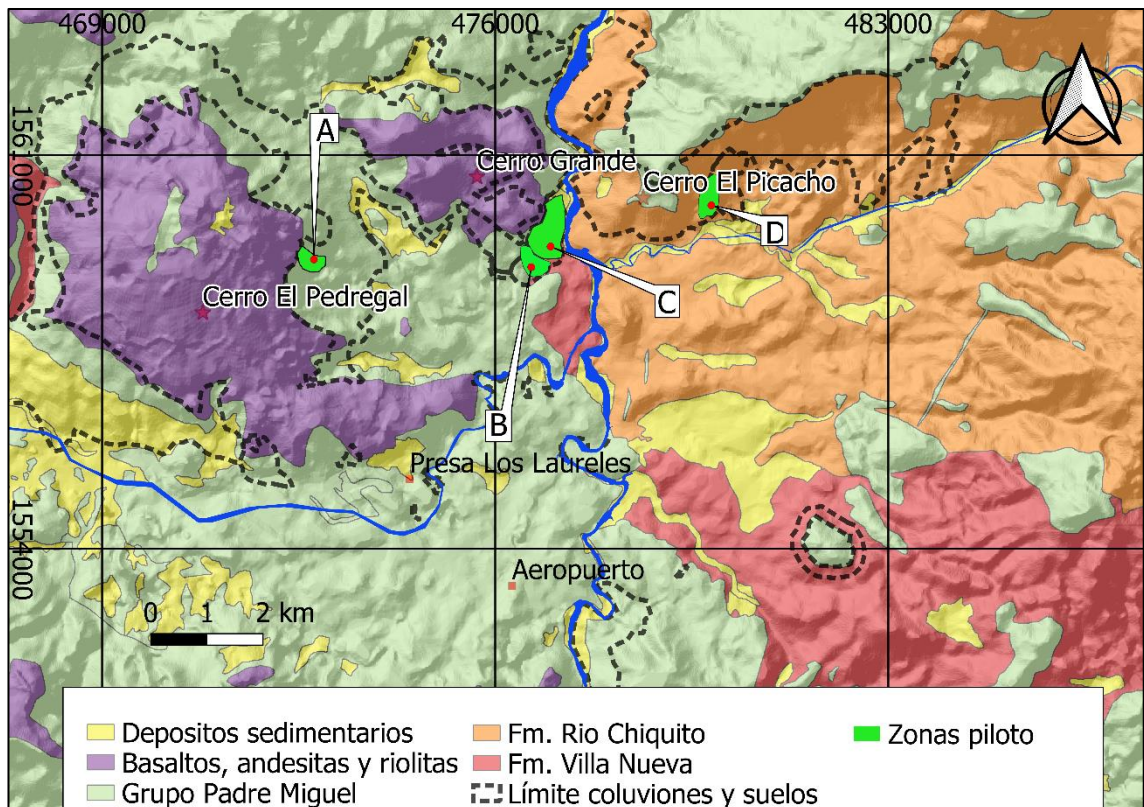


Figura 37. Zonas de estudio piloto seleccionadas para validar la aplicabilidad del modelo del talud infinito. A. Colonias La Ulloa/José Arturo Duarte. B. Colonia La Obrera. C. Cerro El Berrinche. D. Colonia Nueva Santa Rosa.

### 3.4.1.1 Deslizamiento de las colonias La Ulloa y José Antonio Duarte

El deslizamiento de las colonias La Ulloa y José Arturo Duarte se sitúa en las colonias del mismo nombre, al Noroeste de Tegucigalpa (Figura 37), sobre coluviones derivados de andesitas y basaltos (Figura 39). Dicho deslizamiento tiene su área de cabecera en la colonia La Ulloa, y cruza el anillo periférico, la carretera que se encuentra al sur de la colonia, afectando a la colonia José Arturo Duarte que se localiza al sur de la carretera (Figura 39). El deslizamiento ya había sido incluido en el inventario de Lotti (1986), por lo que es, al menos, anterior a dicha fecha. Durante periodos de lluvia intensa, el deslizamiento se ha reactivado en varias ocasiones, desplazándose con velocidades bajas y afectando a las edificaciones que se sitúan sobre el movimiento (unas 130 viviendas presentan fisuras actualmente).

En el inventario actualizado en la presente investigación, el deslizamiento presenta 74 hectáreas. Dado que el estudio de GEOCONSULT (2018) se concentró en la parte superior del deslizamiento se optó por realizar el análisis únicamente en esta área, donde existe disponibilidad de datos, en una zona piloto de estudio de 12 hectáreas. Dicha zona piloto tiene pendientes moderadas, con un 56% del área con pendientes entre 0-10°, un 41% con pendientes entre 10° a 20° y sólo un 3% con pendientes superiores a 20° (Figura 38).

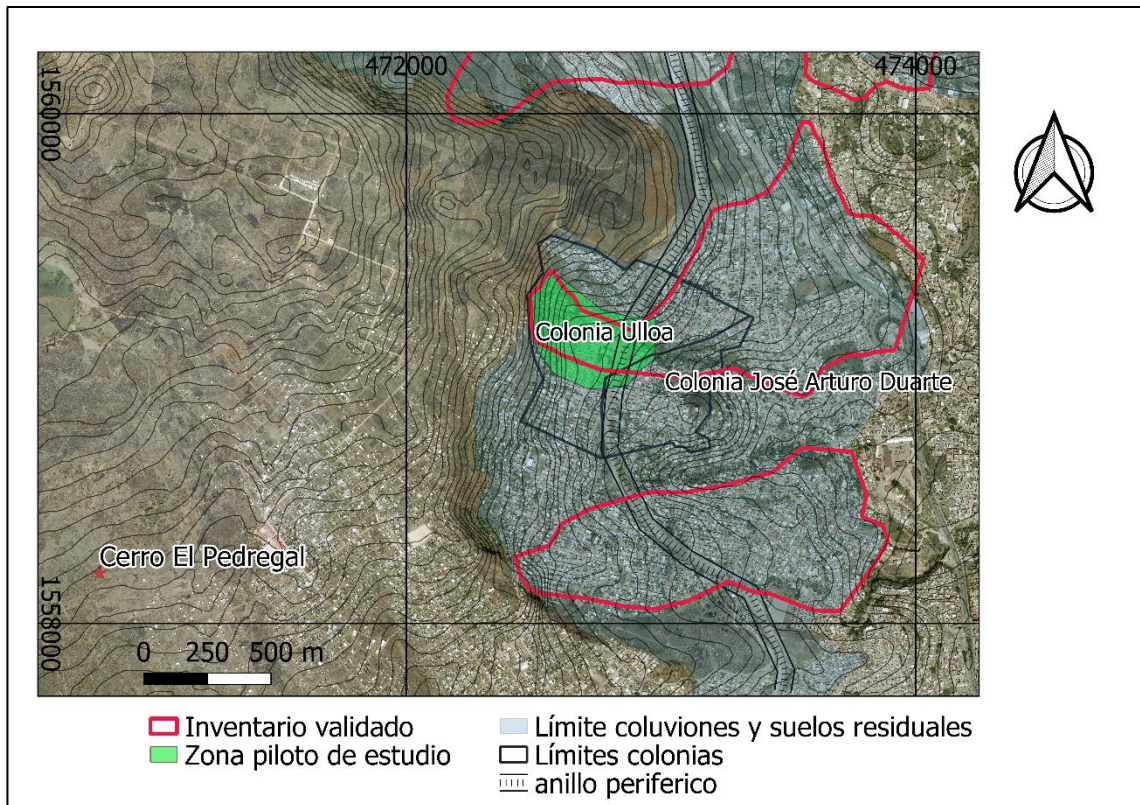


Figura 39. Detalle de la zona de las colonias Ulloa y José Arturo Duarte y localización de los deslizamientos inventariados. Fuente: mapa de barrios y colonias INE (2001), foto aérea escala 1:10.000 JICA (2013).

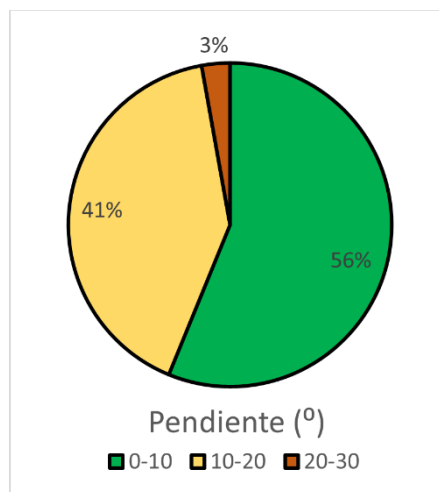


Figura 38. Distribución de superficies para cada rango de pendiente en la zona piloto de las colonias La Ulloa y José Arturo Duarte.

Los datos geotécnicos y de profundidad de los que se dispone para este deslizamiento corresponden al estudio de la empresa GEOCONSULT (GEOCONSULT, 2018) para la alcaldía de Tegucigalpa en el marco del Programa de Mitigación de Desastres Naturales en el Municipio del Distrito Central financiado por El Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE). Dicho estudio incluye datos de 16 perforaciones con recuperación de testigo, con profundidades entre 20 y 35 metros, y la caracterización de muestras de las propiedades mecánicas de los suelos obtenidas de los sondeos. Adicionalmente, se cuenta con un estudio descriptivo del deslizamiento (Martínez, 2011a)

Los parámetros empleados en las modelaciones se resumen en la Tabla 29. Como valores promedio de los estudios de suelo se emplearon los estimados para toda la zona de estudio (Tabla 25), que corresponden a 4 muestras para los valores de cohesión, rozamiento interno y peso específico y 12 datos de profundidad, todos estos datos correspondientes a este

deslizamiento (es el único deslizamiento sobre los coluviones derivados de andesitas y basaltos del que se dispone de información de propiedades de los suelos).

Adicionalmente a los valores obtenidos de los ensayos, se realizaron modelizaciones con los parámetros de resistencia al corte que recomiendan Dietrich and Montgomery (1998) para coluviones y que corresponden a una cohesión de 2000 N/m<sup>2</sup> y un ángulo de rozamiento de 35° (Tabla 29). Se consideraron estos parámetros por defecto 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 et al., 1991; Dietrich y Montgomery, 1998).

Tabla 29. Parámetros utilizados para la modelación en la colonia La Ulloa y José Arturo Duarte.

Parámetro	Valores promedio de los estudios de suelo	Valores por defecto coluviones
Cohesión (N/m <sup>2</sup> )	47.317	2.000
Ángulo de rozamiento interno (grados)	11,25	35
Peso específico (Kg/m <sup>3</sup> )	1.940	1.940
Profundidad	14,56	14,56

El Índice de Ajuste (IA) obtenido en la modelación realizada con el programa PISA-m empleando los parámetros promedios de los estudios de suelos fue del 76%, mientras que, con los parámetros por defecto para coluviones, se obtuvo un IA del 36% (Figura 40). En el centro del deslizamiento existe una zona que presenta pendientes menores de 5° y que no fue modelada por el programa PISA-m (Figura 41). La modelación con la extensión SHALSTAB aplicando los parámetros promedio de los estudios de suelo generó un IA del 34% y con los parámetros por defecto para coluviones se obtuvo un IA del 31% (Figura 40).

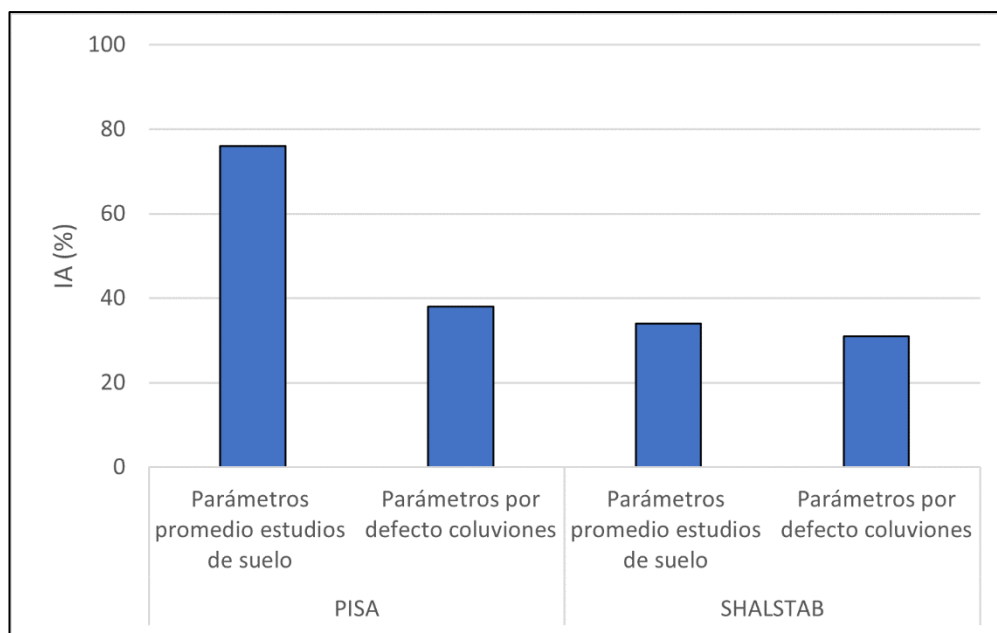


Figura 40. Índice de ajuste (IA) obtenido con las modelaciones mediante PISA-m y SHALSTAB para el deslizamiento en las colonias Ulloa y José Arturo Duarte.



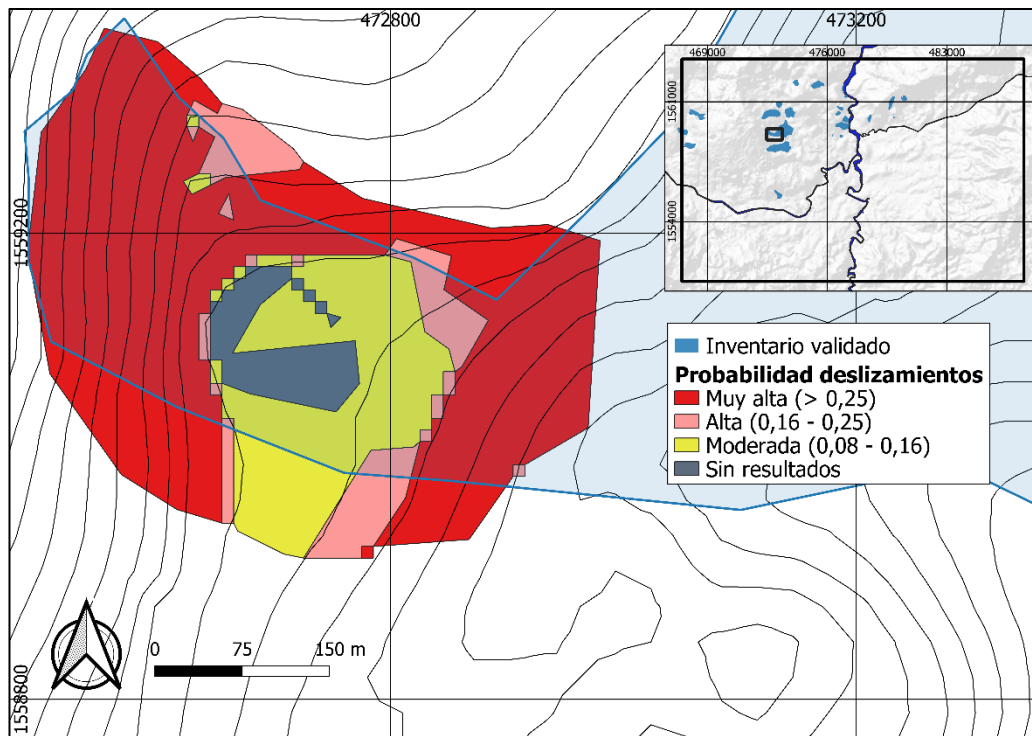


Figura 41. Distribución de probabilidad de deslizamientos obtenida con el programa PISA-M para el deslizamiento de las colonias Ulloa y José Arturo Duarte.

En el caso de la modelación realizada con SHALSTAB prácticamente toda el área clasificada como inestable corresponde a la categoría “incondicionalmente inestable” ([anexo 5](#)). Esto indica que estas zonas son inestables debido a las propiedades mecánicas y pendiente del terreno, independientemente de las condiciones hidrogeológicas.

Los resultados obtenidos corresponden con las observaciones del trabajo de campo, donde se constató que este coluvión presenta deslizamientos muy importantes asociados a intervenciones antrópicas como la construcción de viviendas o carreteras. Ejemplos de estos procesos son el propio deslizamiento de la colonia La Ulloa y José Arturo Duarte o el deslizamiento en la colonia Ciudad del Ángel (Figura 42).

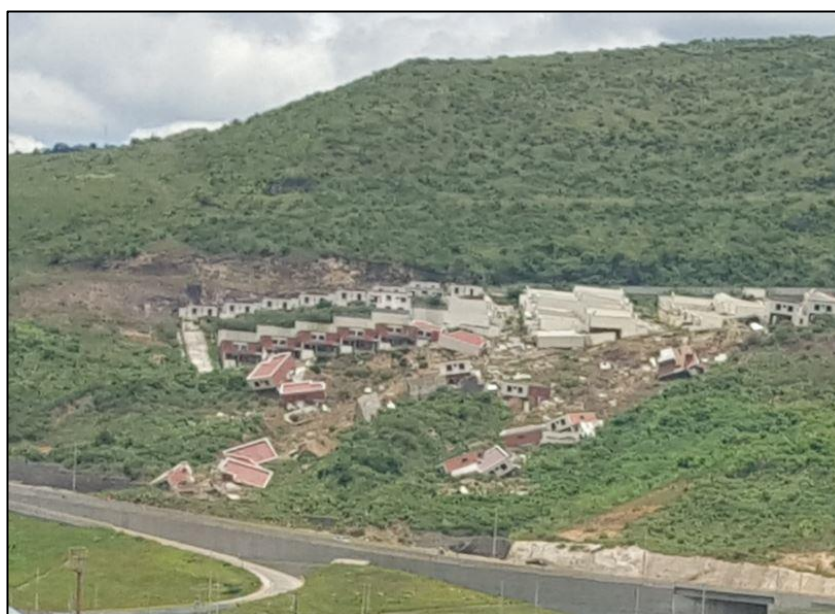


Figura 42. Deslizamiento en el coluvión de basaltos y andesitas en el área residencial Ciudad del Ángel. Fuente: foto propia, agosto de 2016.

Esta clasificación tan desfavorable se asocia con el hecho de que el ángulo de rozamiento promedio obtenido de los ensayos es particularmente bajo ( $11,25^\circ$ ). Los resultados de las modelaciones con el talud infinito son consistentes con el mapa de susceptibilidad realizado en el presente estudio, que identifica la alta propensión a los deslizamientos del coluvión derivado de los basaltos y andesitas (Figura 28).

### 3.4.1.2 Deslizamientos de la colonia Nueva Santa Rosa

La colonia Nueva Santa Rosa se localiza el Noreste de la zona de estudio (Figura 37). En algunos estudios aparece referida como colonia Guillen, sin embargo, se optó por nombrarla colonia Nueva Santa Rosa, que es como aparece referida en el mapa oficial de barrios del MDC. Los deslizamientos traslaciones identificados en el inventario validado en la colonia Nueva Santa Rosa tienen una superficie de 11 hectáreas (deslizamiento A) y 0,52 hectáreas (deslizamiento B) respectivamente y se localizan sobre el coluvión derivado del grupo Padre Miguel (Figura 43).

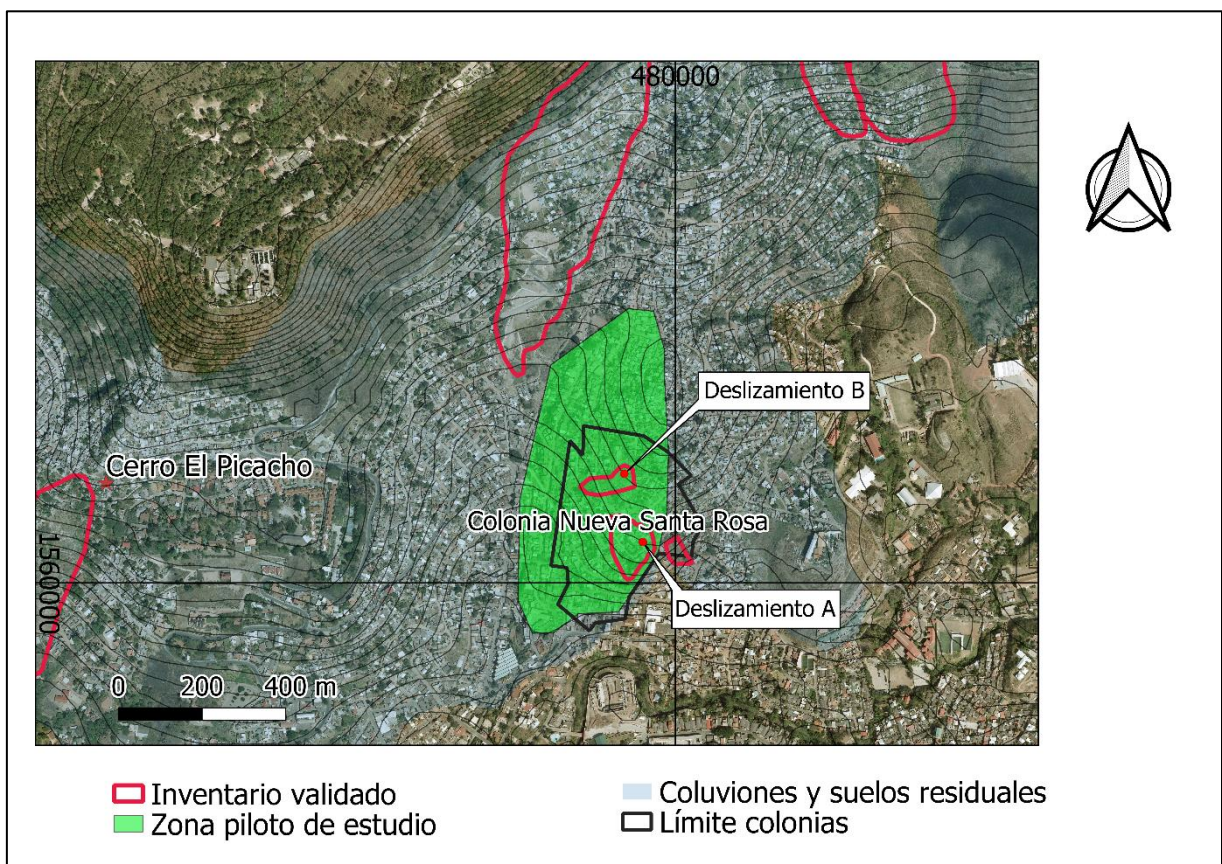


Figura 43. Detalle de la zona de la colonia Nueva Santa Rosa y localización de los deslizamientos inventariados. Fuente: mapa de barrios y colonias (INE, 2001), foto aérea escala 1:10.000 (JICA, 2013).

La zona de estudio piloto consideró toda el área cubierta de coluviones que drenan hacia los deslizamientos, que corresponde a una superficie de 21 hectáreas. Las pendientes son moderadas, con un 78% del área entre  $0$  a  $10^\circ$  y un 22% entre  $10^\circ$  a  $20^\circ$  (Figura 44).

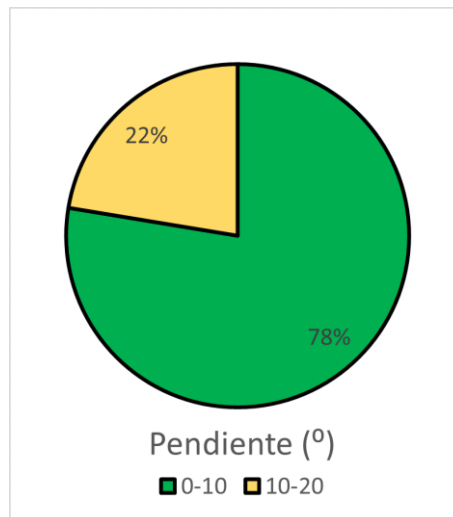


Figura 44. Distribución de superficie para cada rango de pendiente en la zona piloto de la colonia Nueva Santa Rosa.

Se dispone de registros de 3 episodios históricos de activación de los deslizamientos de la colonia Nueva Santa Rosa: (i) en el año 1993 ([www.desinventar.org](http://www.desinventar.org)), (ii) en noviembre de 1998, cuando se produjo la reactivación de uno de los deslizamientos, sin afectar a ninguna vivienda (Harp et al., 2002a) y (iii) un episodio prolongado de activación que se inició en octubre del año 2008 por efecto de la depresión tropical 16, y que se prolongó durante los años 2009 (Figura 45) (AMDC, 2009), 2010 y principio del año 2011. Fruto de este último episodio 78 viviendas resultaron dañadas (52 destruidas y 26 con daños) sobre el deslizamiento A (Martínez, 2010), mientras 11 viviendas situadas sobre el deslizamiento B presentaron daños (encuesta ONG GOAL). Ambos deslizamientos fueron inventariados por primera vez por PNUD en el invierno del año 2010 (Martínez, 2010; Suárez y Mora, 2010).



Figura 45. Ejemplos de daños sobre la colonia Nueva Santa Rosa. A. Viviendas agrietadas. B. Viviendas totalmente destruidas. Ambas fotos se sitúan sobre el deslizamiento A de la colonia Nueva Santa Rosa. Fuente: fotos propias, mayo 2009.

Los datos de que se dispone para esta zona de estudio incluyen los resultados de tres perforaciones con recuperación de testigo, dos de 30 metros y una de 21 metros de profundidad (GEOCONSULT, 2010), perfiles de sísmica de refracción (Rodríguez, 2010b), un análisis descriptivo del deslizamiento A (Martínez, 2010) y una modelación realizada con los métodos de las dovelas simplificados de Janbú y Bishop. A partir de ellos, se obtuvieron 8 datos de profundidad para el deslizamiento A, con los que se estimó la profundidad promedio del coluvión del Grupo Padre Miguel en la zona de la colonia Nueva Santa Rosa ([anexo 5](#)). No se dispone de datos geotécnicos del deslizamiento B pero, por su proximidad al deslizamiento A (se localiza a 50 metros de distancia en dirección norte), se asumió que las profundidades del

coluvión son similares. Para la modelación se emplearon los valores promedio de las propiedades de cohesión, ángulo de rozamiento y peso específico estimados para los coluviones derivados del Grupo Padre Miguel, que fueron obtenidos de los ensayos de 8 muestras, 2 de la colonia Nueva Santa Rosa (GEOCONSULT, 2010), 3 de la colonia La Cabaña, 2 de la Colonia la Flor#1 y 1 del deslizamiento del cerro El Berrinche (GEOCONSULT, 2018). En la Tabla 30 se resumen los parámetros utilizados para las modelaciones.

Tabla 30. Parámetros utilizados en la modelación en la colonia Nueva Santa Rosa.

	Valores promedio de los estudios de suelo	Valores por defecto que utiliza SHALSTAB
Cohesión (N/m <sup>2</sup> )	28.562	2.000
Ángulo de rozamiento interno (grados)	23,88	35
Peso específico (Kg/m <sup>3</sup> )	1.628	1.628
Profundidad	8,11	8,11

El valor del IA obtenido para la modelación realizada con el programa PISA-m fue del 26% y del 24% con los parámetros promedio obtenidos de los ensayos de suelo y los parámetros por defecto para coluviones, respectivamente (Figura 46, Figura 47 y [anexo 5](#)). Las modelaciones realizadas con SHALSTAB con los valores promedio y por defecto arrojaron valores de IA del 0% y 0.1% respectivamente (Figura 46 y [anexo 5](#)).

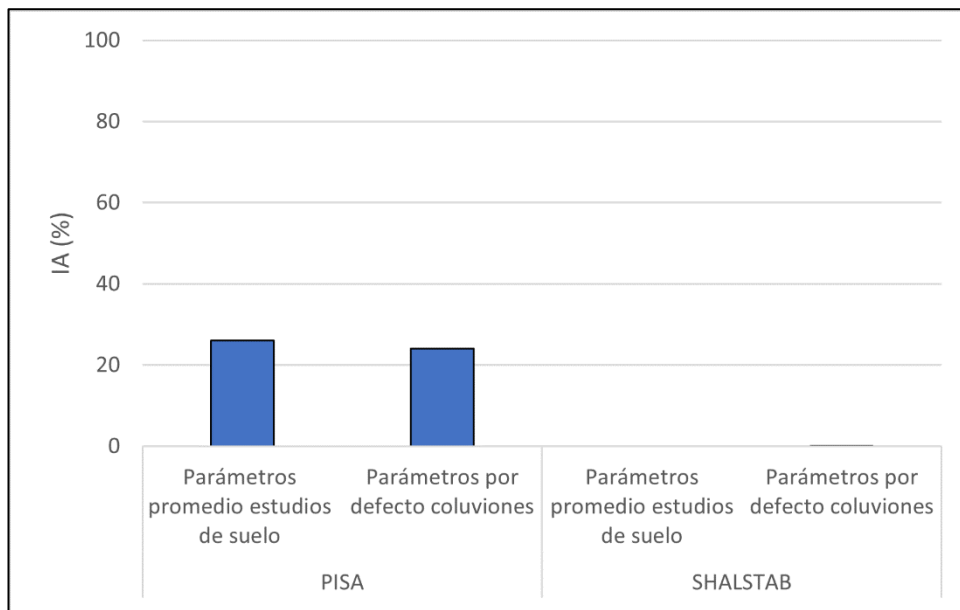


Figura 46. Índice de ajuste obtenido con las modelaciones mediante PISA-m y SHALSTAB para la zona de la colonia Nueva Santa Rosa.

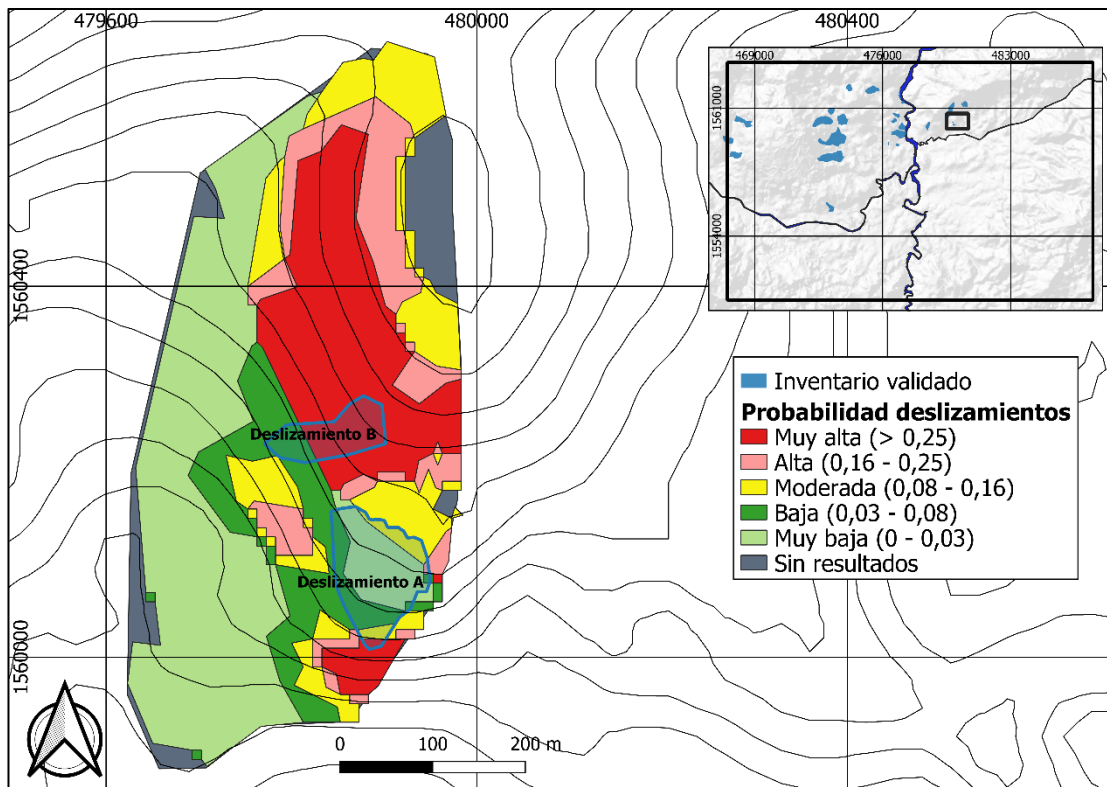


Figura 47. Distribución de probabilidad de deslizamientos obtenida con el programa PISA-m para la zona de la colonia Nueva Santa Rosa.

Cuando se estima el IA con el PISA-m para cada deslizamiento de la colonia Nueva Santa Rosa se obtienen diferencias significativas (Figura 48). El IA para la modelación con parámetros promedio para el deslizamiento A es del 3%, y del 76% para el B, mientras que, con los parámetros por defecto para coluviones, el IA para el deslizamiento A es del 18% y del 35% para B. Dado que el resto de los parámetros empleados en las modelaciones son coincidentes, estas diferencias se pueden atribuir a las distintas pendientes promedio que caracterizan estos deslizamientos: un 53% del área del deslizamiento A y un 19% del área del deslizamiento B presentan pendientes superiores a  $10^\circ$ .

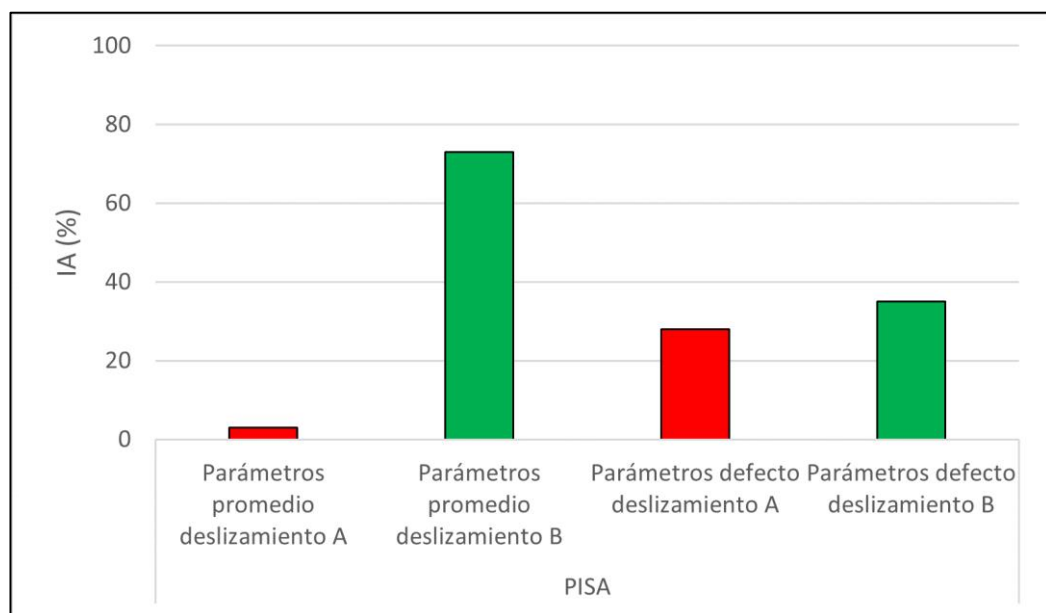


Figura 48. Índice de ajuste obtenido con las modelaciones con PISA-m para los dos deslizamientos identificados en la zona de estudio de la colonia Nueva Santa Rosa.

Se aprecia que el resultado de la modelación con el modelo del talud infinito en el coluvión derivado de las tobas del Grupo Padre Miguel en la zona piloto de la colonia Nueva Santa Rosa presenta un ajuste limitado con las zonas de deslizamientos activos. El ajuste limitado se relaciona con las bajas pendientes que presentan los deslizamientos en esta zona piloto, y los parámetros geotécnicos del coluvión derivado del grupo Padre Miguel (Tabla 25), que son menos favorables para los movimientos de ladera que los obtenidos para el coluvión derivado de las andesitas y basaltos. Los resultados de la modelación son consistentes con el mapa susceptibilidad a deslizamientos (Figura 35), que había clasificado el coluvión derivado de las tobas como menos susceptible a los deslizamientos que el coluvión derivado de las andesitas y basaltos.

Con el fin de mejorar la precisión de la identificación de las áreas con probabilidad alta de inestabilidad en la zona piloto de la colonia Nueva Santa Rosa, se realizó una reinterpretación con criterio experto de los resultados de la modelación realizada con el programa PISA-m que presentó mayor IA (la realizada con parámetros geotécnicos promedio). Partiendo de las zonas caracterizadas como de muy alta, alta y moderada probabilidad y teniendo en cuenta las formas del terreno, se delimitó una zona potencialmente inestable de 10,9 Ha (un 53% de la zona de estudio) (Figura 49). El área obtenida con esta interpretación alcanzaría un IA del 100%, sin embargo se podría estar sobrestimando el área potencialmente inestable.

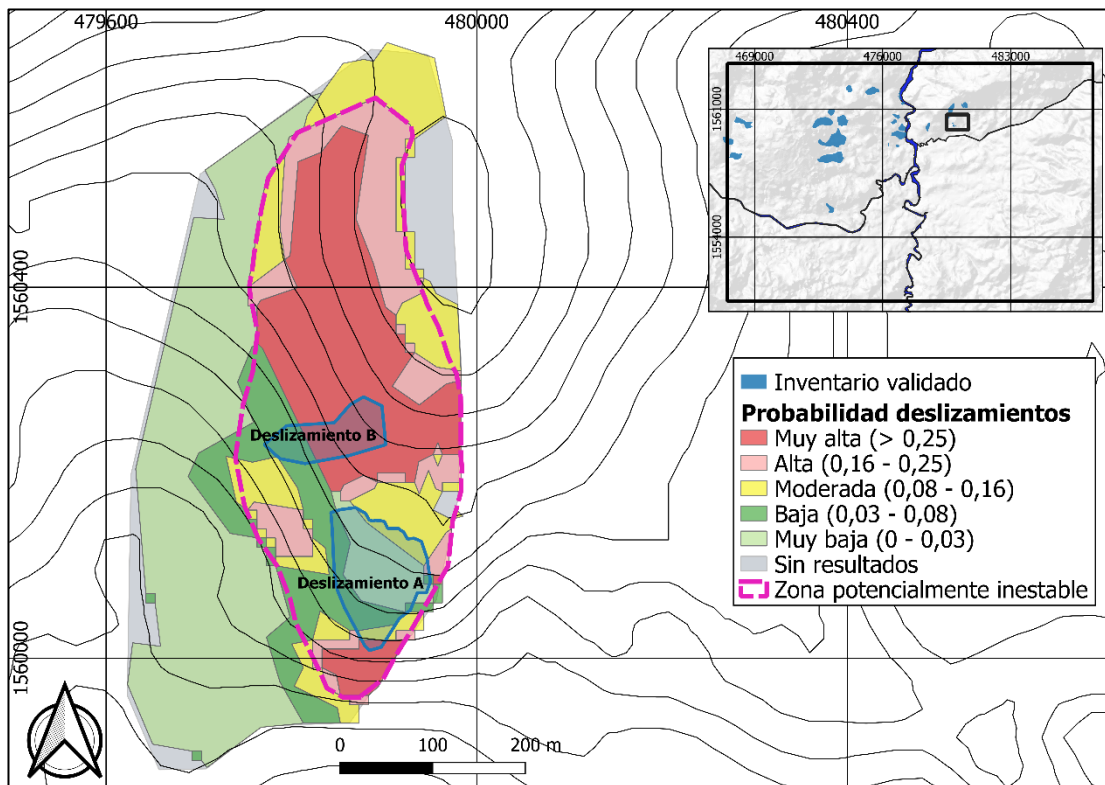


Figura 49. Interpretación geomorfológica de los resultados de probabilidad de deslizamiento obtenidos con el programa PISA-m para los deslizamientos de la colonia Nueva Santa Rosa.

### 3.4.1.3 Deslizamiento de La Colonia La Obrera

El movimiento de ladera presente en la colonia La Obrera, que se sitúa en el centro y al norte de la zona de estudio (Figura 37), tiene una superficie de 2.5 hectáreas. El movimiento se ubica sobre suelos residuales del Grupo Valle de Ángeles (Figura 50) y fue inventariado por primera vez en el año 2010, cuando se activó tras un período de lluvias, destruyendo 19 viviendas (Suárez y Mora, 2010). La zona piloto de estudio presenta un área de 17 hectáreas. La pendiente es moderada, con un 67% del área por debajo de los 10° y un 33% entre 10° a 20° (Figura 51).

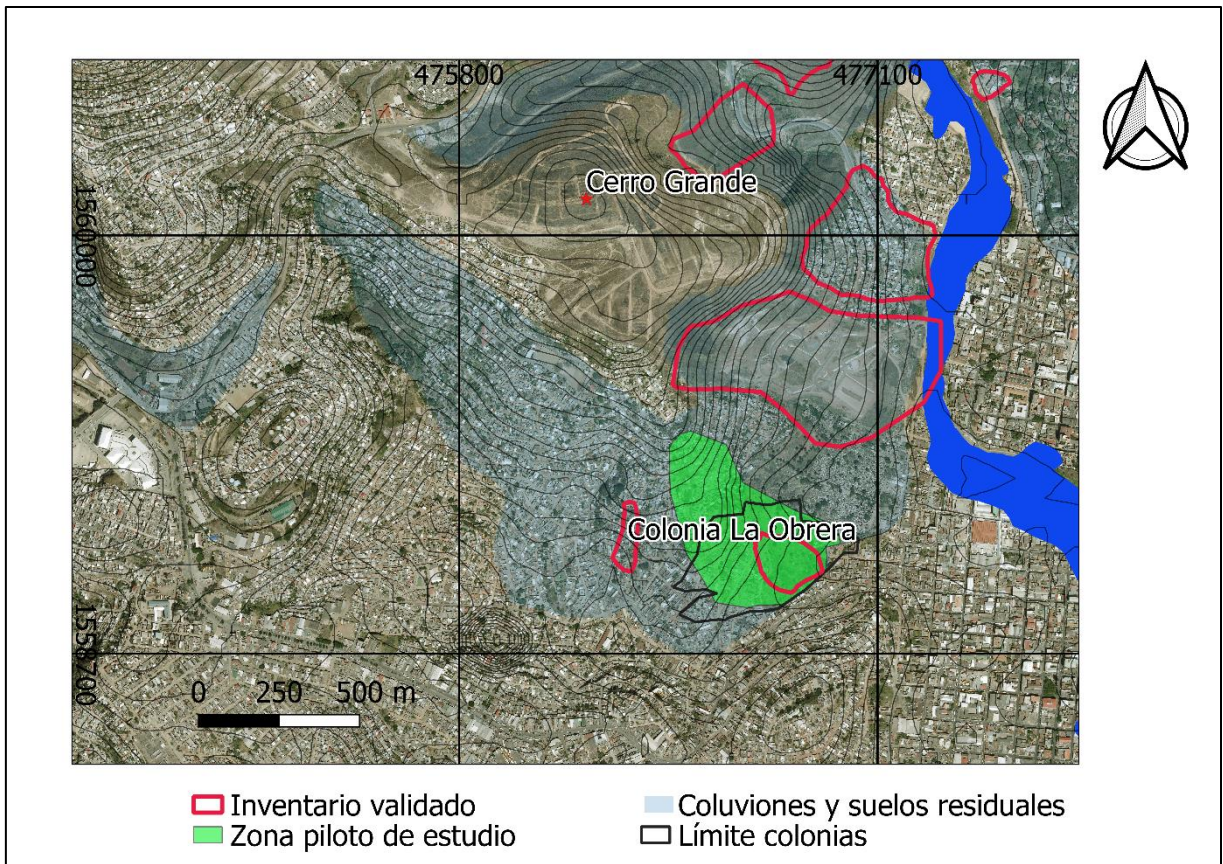


Figura 50. Detalle de la zona piloto de la colonia La Obrera y localización de los deslizamientos inventariados. Fuente: mapa de barrios y colonias (INE, 2001), foto aérea escala 1:10.000 (JICA, 2013).

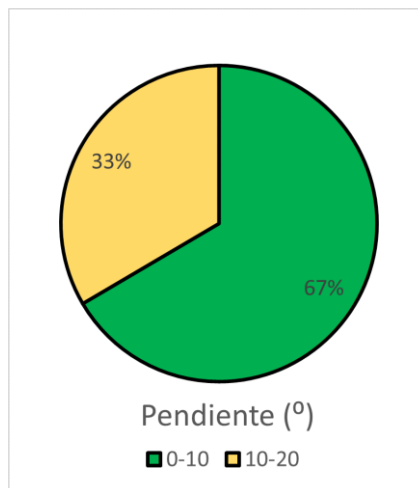


Figura 51. Distribución de superficie para cada rango de pendiente para la zona de estudio de la colonia La Obrera.

Para esta zona se dispone de un informe diagnóstico, que incluye un análisis de estabilidad realizado usando los métodos de las dovelas simplificados de Janbú y Bishop (Suárez y Mora, 2010), análisis de suelos (INGEO, 2010), perfiles de sísmica de refracción (Rodríguez, 2010a), y 6 perforaciones con recuperación de testigo realizados por la empresa GEOCONSULT como parte del Programa Mitigación de desastres Naturales en el Municipio del Distrito Central del BCIE (GEOCONSULT, 2018). Las propiedades de cohesión, ángulo de rozamiento y peso específico de los suelos fueron obtenidas de 3 muestras: 2 correspondientes al movimiento de la colonia La Obrera (INGEO, 2010) y 1 correspondiente a la colonia La Canaan

(GEOCONSULT, 2018). La profundidad del coluvión en la colonia La Obrera se obtuvo de 7 datos obtenidos de las perforaciones y la geofísica.

Tabla 31. Parámetros utilizados para la modelación en la colonia La Obrera.

	Valores promedio de los estudios de suelos	Valores por defecto que utiliza SHALSTAB
Cohesión (N/m <sup>2</sup> )	23.536	2.000
Ángulo de rozamiento interno	13,33	35
Peso específico (Kg/m <sup>3</sup> )	1.846	1.846
Profundidad	8,49	8,49

Los resultados de las modelaciones con PISA-m, tanto con los parámetros promedio (Figura 52), como con los parámetros por defecto, así como las modelaciones realizadas con SHALSTAB ([anexo 5](#)), no generaron zonas de inestabilidad similares a las del deslizamiento existente. Por otro lado, el IA obtenido para la modelación realizada con el programa PISA-m empleando los valores promedio de los estudios geotécnicos fue del 10%, mientras que para el resto de las modelaciones obtenido fue de 0 (Figura 53).

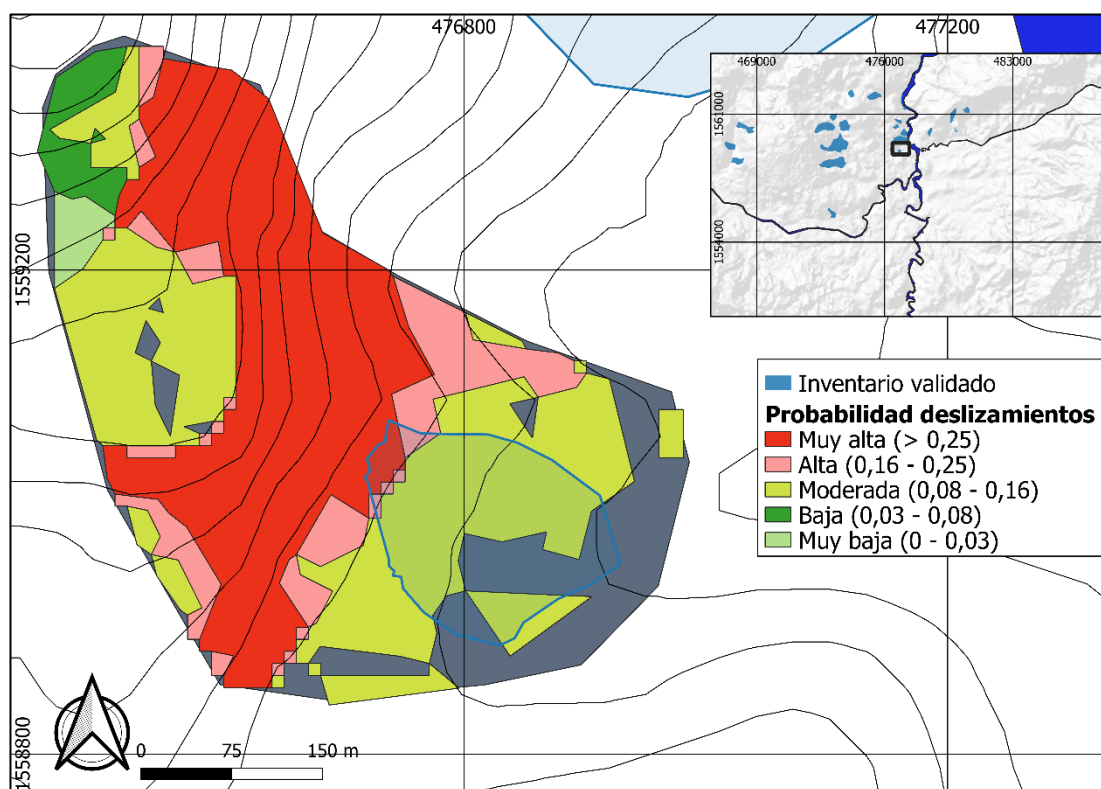


Figura 52. Distribución de la probabilidad de deslizamiento obtenida con el programa PISA-m para la zona de la colonia La Obrera.



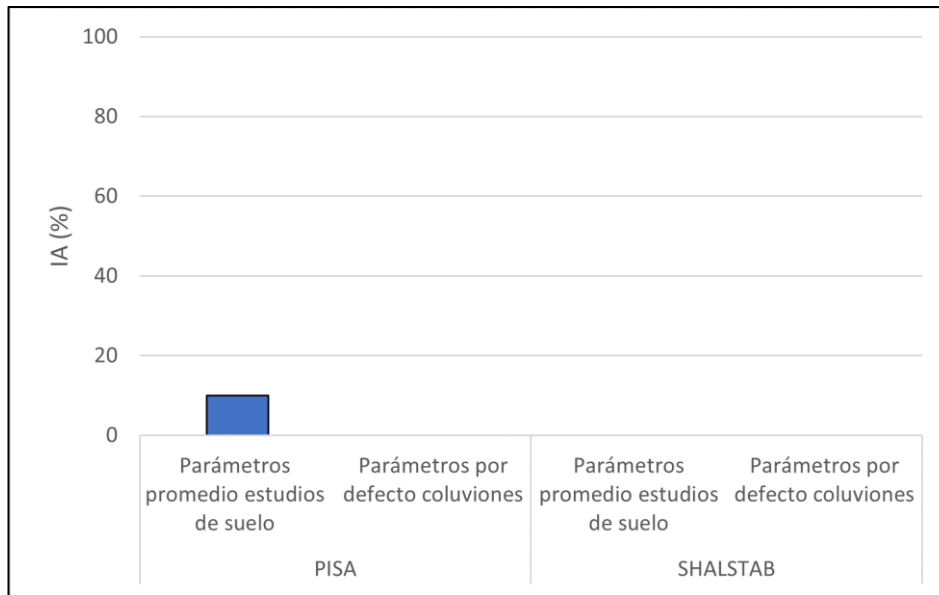


Figura 53. Índice de Ajuste (IA) obtenido con las modelaciones mediante PISA-m y SHALSTAB para el deslizamiento inventariado en la colonia La Obrera.

Al realizar una interpretación con criterio experto basado en las formas del terreno, se obtiene una zona inestable que incluiría a la zona del deslizamiento del inventario (Figura 54). Sin embargo, con esta interpretación el 85% de la zona de estudio de la colonia Obrera se clasificaría como potencialmente inestable.

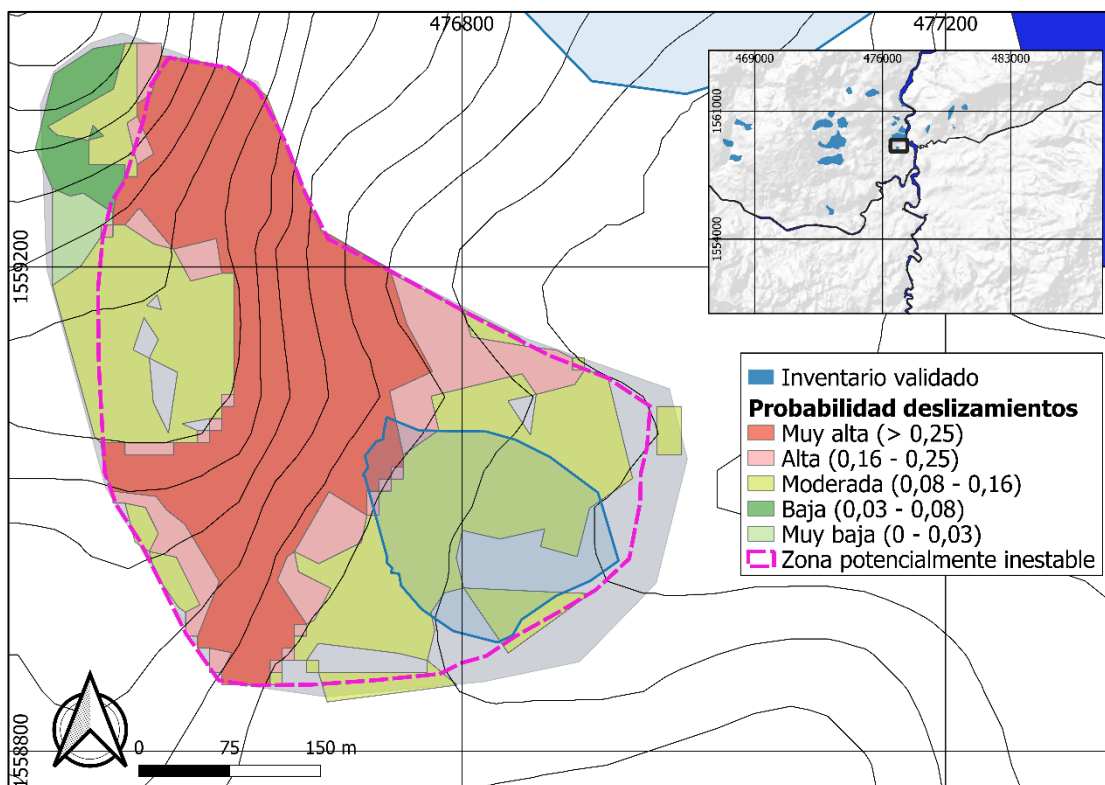


Figura 54. Interpretación geomorfológica de los resultados de probabilidad de deslizamiento obtenidos con el programa PISA-M para los deslizamientos de la colonia Obrera.

Considerando que pudieran existir algunas condiciones locales en la zona piloto de La Obrera que pudieran limitar la aplicabilidad del modelo del talud infinito (ver apartado de Discusión) se optó por seleccionar otra zona piloto adicional para los suelos residuales derivados del grupo

Valle de Ángeles. La zona seleccionada fue el cerro El Berrinche, que se localiza unos 335 metros al Norte del deslizamiento de la colonia La Obrera (Figura 55).

#### 3.4.1.4 Deslizamientos del cerro El Berrinche

La zona piloto del cerro El Berrinche fue seleccionada por estar cubierta por suelos residuales derivados del Grupo Valle de Ángeles (Figura 55) y por su proximidad a la colonia La Obrera. Considerando esta proximidad se asumió que las propiedades del suelo residual derivado de la alteración del grupo Valle de Ángeles obtenidas en la colonia La Obrera podrían ser aplicables al mismo tipo de suelo residual existente en el sector El Berrinche. En ese sector, en el inventario validado se identificaron dos deslizamientos: uno de 25,5 has, que se sitúa sobre la colonia Francisco Morazán y la zona conocida como El Berrinche, (deslizamiento A) y otro, de 11,2 has que se sitúa principalmente sobre la colonia Ramón Amaya Amador (deslizamiento B) (Figura 55).

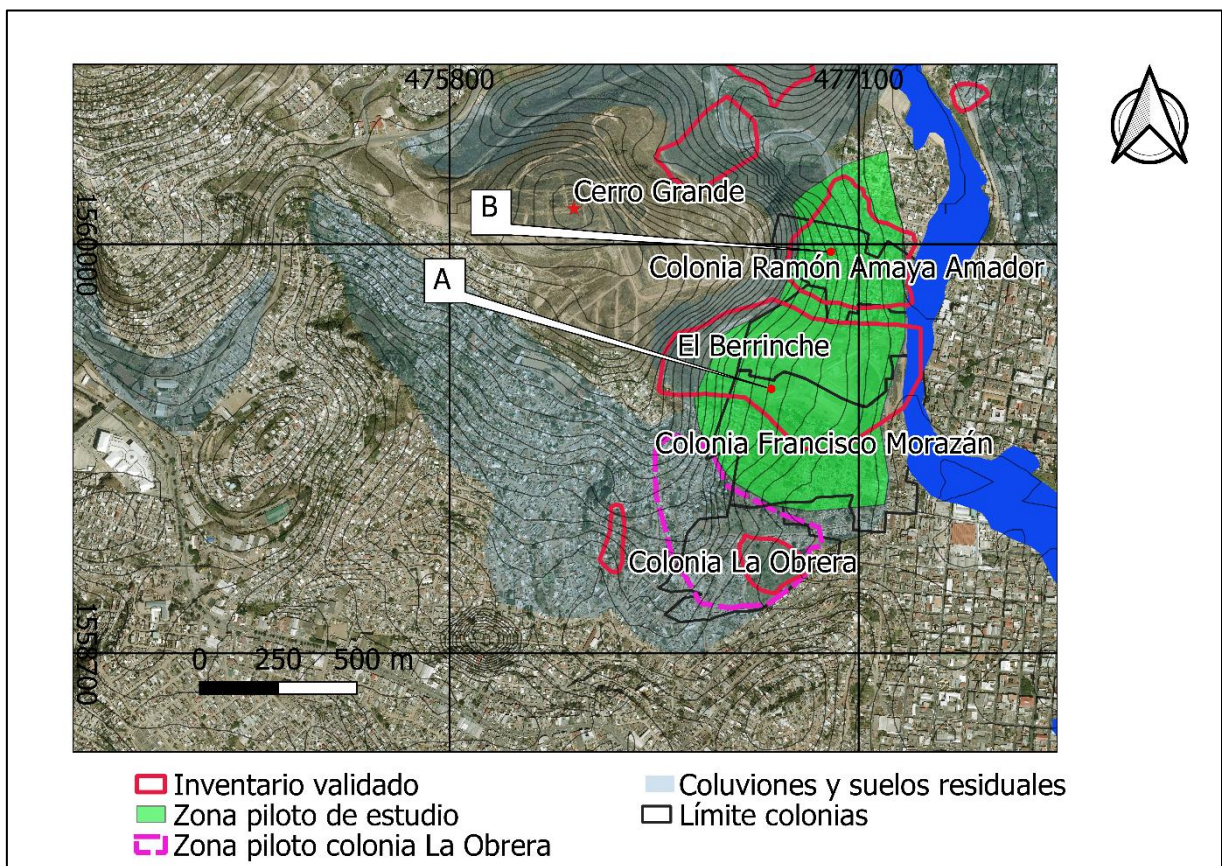


Figura 55. Detalle de la zona piloto del cerro El Berrinche y localización de los deslizamientos inventariados A y B. Fuente: mapa de barrios y colonias (INE, 2001), foto aérea escala 1:10.000 (JICA, 2013).

La zona de estudio delimitada es de 45,7 has. En la parte superior existe un depósito de coluviones derivado de la formación Padre Miguel. Esta zona, que representa un 16% del área del deslizamiento A y un 4% del deslizamiento B no fue modelada al corresponder a otro tipo de coluvión. Tampoco se modeló el pie de los deslizamientos, por considerar (con base en la geomorfología) que corresponde a depósitos de deslizamientos acumulados en la llanura de inundación del río Choluteca y no propiamente al cuerpo del deslizamiento activo (10% del área del deslizamiento A y 7% del B). La pendiente de la zona es moderada, con un 78,2% del área entre 0 a 10°, un 21,7% entre 10° a 20° y un 0,1% entre 20° a 30° (Figura 56).

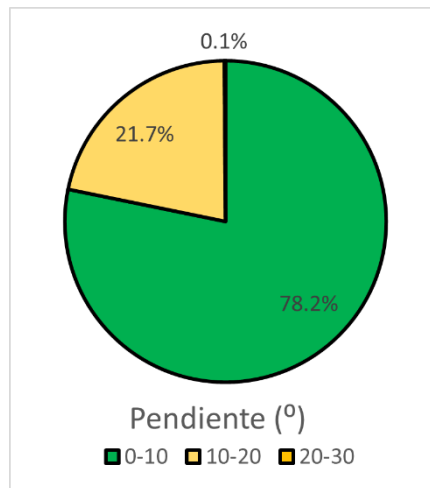


Figura 56. Distribución de superficies para cada rango de pendiente para la zona de estudio de cerro El Berrinche.

El deslizamiento A, conocido como deslizamiento del Berrinche fue inventariado por Lotti (1986). La base de datos de desinventar (Corporación Observatorio Sismológico del Suroccidente, n.d.) identifica eventos en este deslizamiento en los años 1966, 1975, 1976, 1988 y 1989. Este movimiento de ladera tuvo un episodio muy importante de activación durante el huracán Mitch, siendo el movimiento de mayor envergadura que se produjo durante el huracán, con un volumen de unos 6 millones de m<sup>3</sup> (Harp et al., 2002a). El movimiento destruyó por completo la colonia Soto situada encima, que pudo ser evacuada sin víctimas debido a la lentitud del desplazamiento. Se trató de un movimiento complejo con una parte que se comportó como un flujo de lodo que llegó hasta el río Choluteca, aguas abajo del movimiento, (Harp et al., 2002a) y otra parte de deslizamiento rotacional, que permaneció activa y fue estabilizada en el año 2013 por medio de una intervención financiada por JICA. La topografía disponible es del año 2009, anterior a la fecha de realización de las obras de estabilización del deslizamiento A, por lo que permite realizar un análisis del movimiento previo a la estabilización.

El deslizamiento B es de tipo traslacional con un desplazamiento lento que se sitúa sobre la colonia Ramón Amaya Amador, al norte del deslizamiento A. Se activó durante las lluvias del invierno del año 2010, generando fisuras en las viviendas localizadas sobre el bloque deslizado, pero sin destruirlas dada la lentitud del movimiento y la brevedad el periodo en que se mantuvo activo.

Para la modelación en el sector El Berrinche se utilizaron los mismos parámetros que para la colonia Obrera (Tabla 31). El IA obtenido fue del 60% para la modelación realizada con el programa PISA-m empleando los parámetros promedio de los estudios de caracterización de los suelos y del 19% empleando los parámetros por defecto para coluviones. Las modelaciones realizadas con SHALSTAB con los valores promedio y por defecto arrojaron valores de IA del 9% y 0% respectivamente (Figura 57) ([anexo 5](#)).

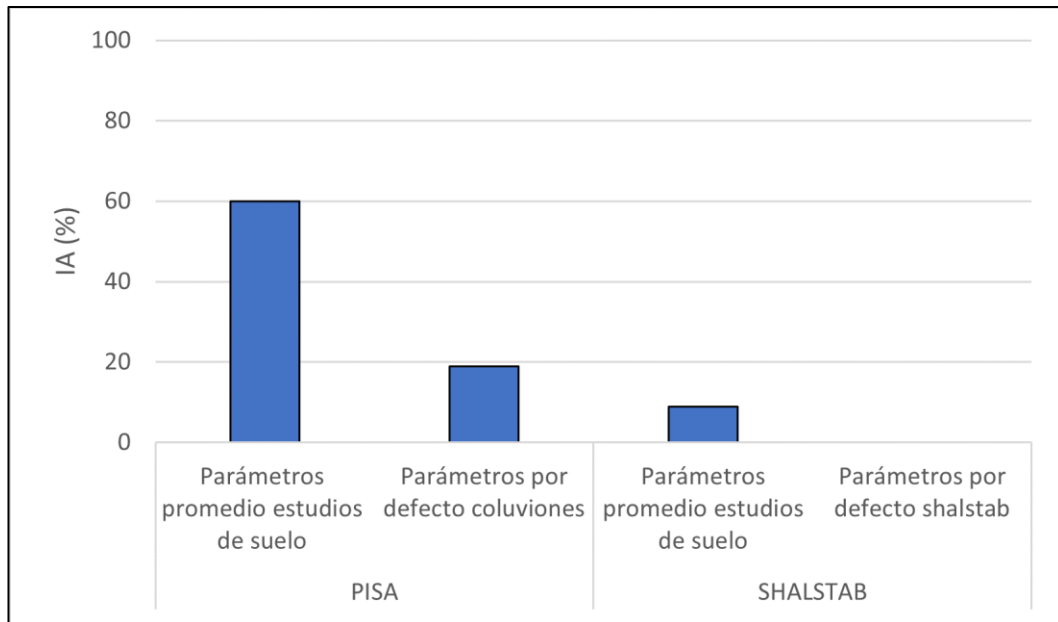


Figura 57. Índice de ajuste obtenido con las modelaciones con PISA-m y SHALSTAB para el deslizamiento en el cerro El Berrinche.

El IA obtenido con el programa PISA-m al emplear los valores promedio de los estudios de suelos es sustantivamente mayor que el obtenido para la colonia La Obrera. De igual forma que en los casos de los estudios de la colonia Nueva Santa Rosa y La Obrera, se aprecia que la coincidencia entre la zona modelada y los deslizamientos del inventario se produce principalmente en la zona del arranque de los deslizamientos, que presentan pendientes mayores (Figura 58). El cuerpo del deslizamiento, caracterizado por pendientes menores, es clasificado por el modelo del talud infinito como moderadamente inestable.

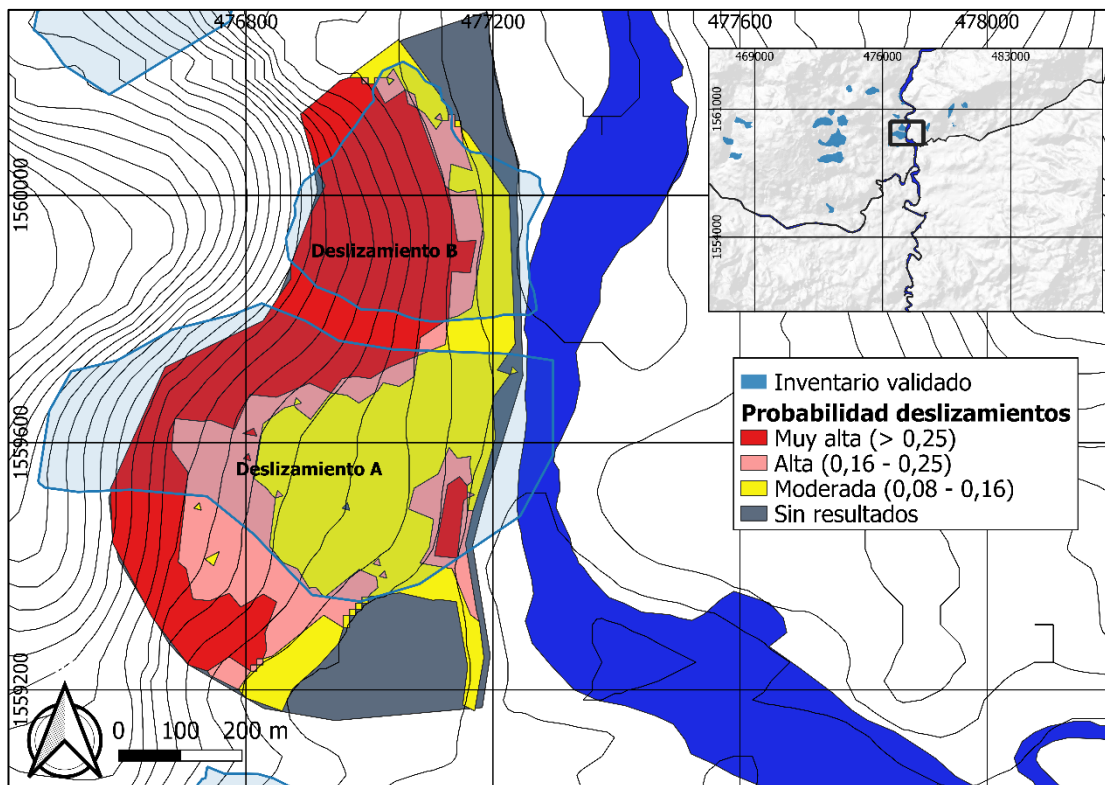


Figura 58. Valores de probabilidad de deslizamiento obtenidos con el programa PISA-m para los deslizamientos situados en el cerro El Berrinche.

Aplicando criterio experto para definir las zonas inestables y considerando como potencialmente inestables las zonas clasificadas por el PISA-m (con los valores promedio de los estudios de suelos) como de muy alta, alta y moderada probabilidad, el 86% del área quedaría clasificada como inestable y se alcanzaría un IA del 91%. De esta clasificación quedarían excluidas únicamente las áreas con pendientes inferiores a 5°, donde el programa PISA-m no realiza cálculos. Estas áreas incluyen el depósito del flujo que se localiza al sur de la zona de estudio y una franja de bajas pendientes correspondiente a la llanura de inundación situada al este del deslizamiento (Figura 59). Esta clasificación con criterio experto genera una sobreestimación limitada, dado que los deslizamientos inventariados cubren un 63% de la zona piloto.

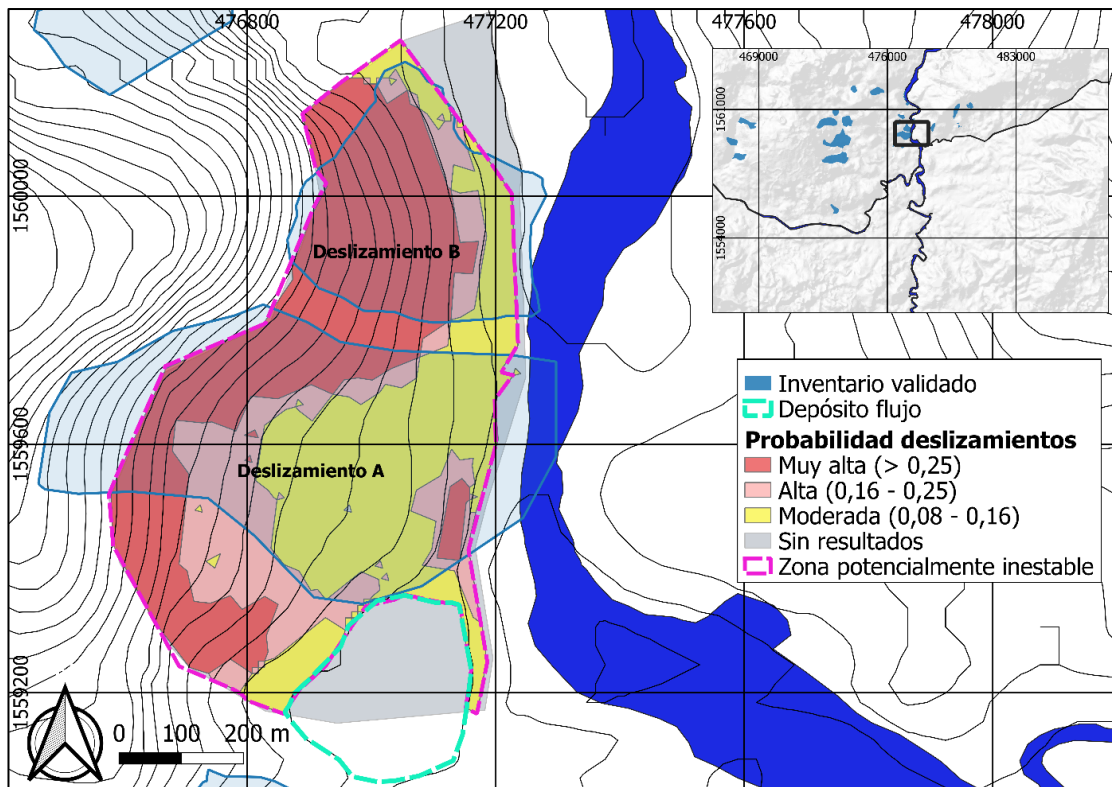


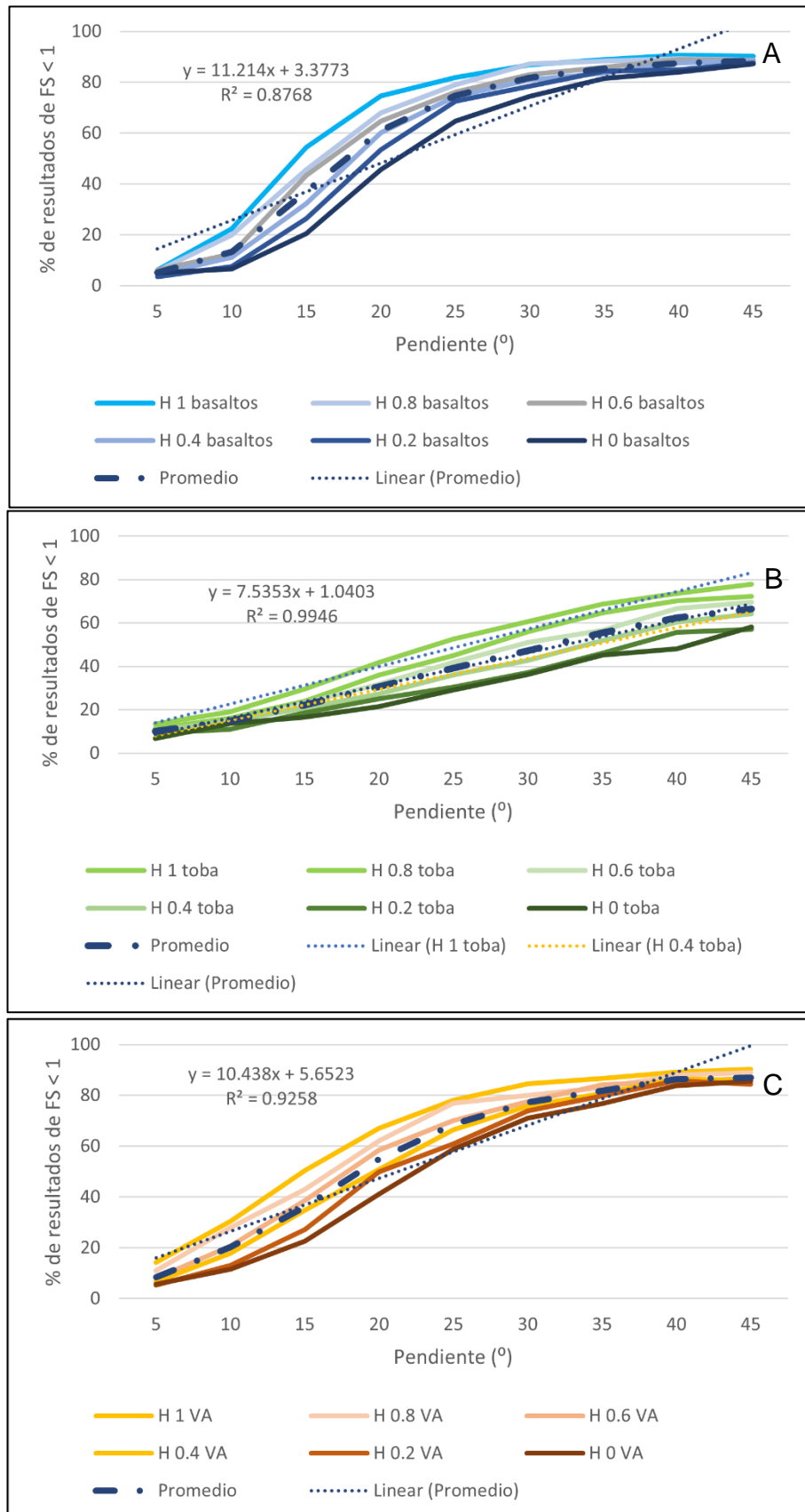
Figura 59. Interpretación geomorfológica de los resultados de probabilidad de deslizamiento obtenidos con el programa PISA-M para los deslizamientos de la colonia Obrera.

### 3.4.2 Análisis de sensibilidad del modelo del talud infinito

Considerando los resultados de los estudios piloto, el análisis de sensibilidad se orientó a determinar la influencia de la pendiente y de la saturación del suelo (representada por el parámetro  $H_w$ ) en los resultados del modelo del talud infinito. Para sintetizar los resultados del análisis de sensibilidad, para cada tipo de suelo se elaboraron gráficos de dispersión agrupados por franjas (Saltelli et al., 2008). Estos gráficos relacionan la pendiente (en intervalos de 5°) con el porcentaje de los 1000 casos modelados de forma aleatoria que arrojan valores de FS menores de 1, para cada uno de los 4 tipos de suelo considerados (coluvión derivado de los basaltos y andesitas, coluvión derivado del Grupo Padre Miguel, suelo residual derivado del Grupo Valle de Ángeles y coluvión con parámetros promedio para coluviones) y para distintos valores de  $H_w$  (analizados en intervalos de 0.2 unidades) (Figura 60).

Para cada uno de los valores de  $H_w$  se elaboró una línea de tendencia. Adicionalmente se estimó el promedio de los porcentajes de FS menores de 1 para todos los valores de  $H_w$  considerados. Se analizó si este promedio sigue una tendencia lineal, por medio del coeficiente  $R^2$  de Pearson. Los valores elevados de la  $R^2$  obtenidos para cada tipo de suelo (superiores a 0.87) (Figura 60 a, b, c, d) y el valor obtenido para el promedio de todos los suelos (0.97) (Figura 60 e),

evidencian la fuerte correlación lineal existente entre la pendiente y el porcentaje de los valores del FS inferiores a 1.



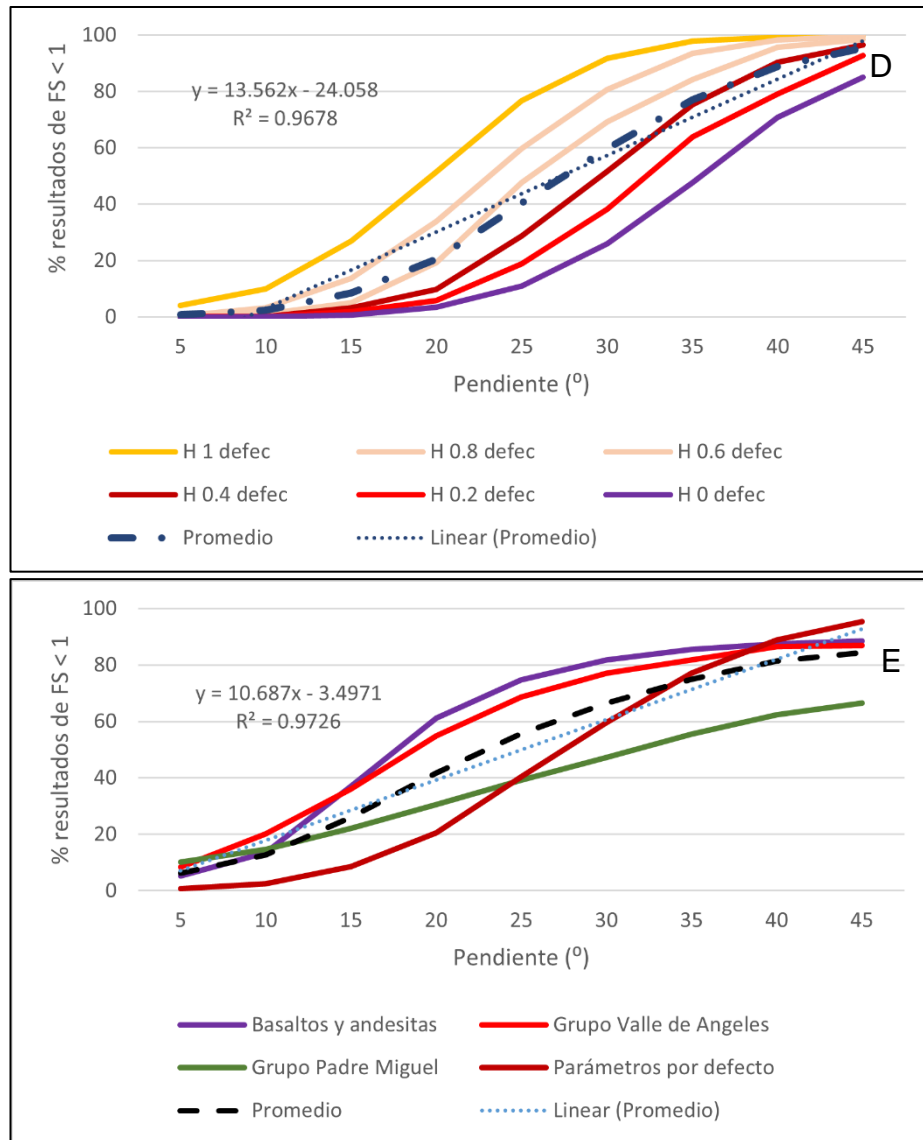


Figura 60. Gráficos de dispersión en los que se relacionan las pendientes (en intervalos de 5°) con el porcentaje de las 1000 modelaciones con valores de FS menores de 1. Cada línea representa un valor de  $H_w$  en intervalos de 0.2 unidades. Se incluye la ecuación de la recta y el valor de  $R^2$ . A. Coluvión derivado de basaltos y andesitas. B. Coluvión derivado del Grupo Padre Miguel. C. Suelo residual derivado de la formación Valle de Angeles. D. Parámetros por defecto para coluviones. E. Promedio de los distintos tipos de suelos.

Considerando el promedio para todos los suelos analizados (columna *promedio* en Tabla 32), el porcentaje de valores de FS inferiores a 1 para 10°, 20° y 30° de pendiente, es del 13%, 42% 66% respectivamente. Es decir, existe una diferencia porcentual del 223% entre los resultados obtenidos para 10° y 20° y del 408% entre los resultados obtenidos para 10° y 30° (Tabla 32). Dado que el modelo del talud infinito estima el FS en un píxel de forma independiente a los píxeles próximos, al existir esta fuerte correlación lineal entre la pendiente y el valor de FS, el modelo tiende a clasificar como inestables los escarpes y pies de los deslizamientos, que se sitúan en zonas con mayores pendientes y como estables las zonas con pendientes menores, a pesar de que pueden formar parte del cuerpo de un único deslizamiento.

Tabla 32. Porcentajes de valores de FS inferiores a 1 para cada valor de pendiente en grados y cada tipo de suelo.

Pendiente (°)	Tipo de suelo				Promedio	Desviación típica
	Basaltos y andesitas	Grupo Valle de Ángeles	Grupo Padre Miguel	Parámetros por defecto		
5	5	8	10	1	6	4
10	13	20	15	2	13	7
15	37	36	22	9	26	13
20	61	55	31	21	42	19
25	75	69	39	40	56	19
30	82	77	47	60	66	16
35	85	82	55	77	75	13
40	88	86	62	89	81	13
45	89	87	66	95	84	12

Con relación a la saturación (medida por el valor  $H_w$ ) existe una relación directa entre este parámetro y el valor del FS. En promedio, considerando todos los tipos de suelos y pendientes analizadas, desde un valor de  $H_w$  de 0 a un valor de 1, el porcentaje de cálculos de FS menores de 1 se incrementa en un 20%, siendo la mayor diferencia obtenida del 66% (correspondiente a las propiedades por defecto de los coluviones) (Tabla 33). Sin embargo, aunque se constata la influencia del parámetro  $H_w$  en el FS, la saturación en la fórmula del talud infinito no actúa como un factor de disparo, es decir no existe un valor crítico a partir del que el FS disminuye de forma brusca al haberse alcanzado un nivel de saturación que genera la activación del movimiento de ladera. De hecho, aún con un valor 0 de  $H_w$ , al aumentar la pendiente se incrementa significativamente el porcentaje de cálculos de FS menores de 1. En promedio, tomando todos los tipos de suelo analizados, para un  $H_w$  de 0, el porcentaje de los cálculos que arrojan un FS menor de 1, varían del 4% para una pendiente de 0 a 79% para una pendiente de 45° (columna promedio en Tabla 34).

Tabla 33. Diferencia entre porcentajes de valores de FS inferiores a 1 entre los valores de  $H_w$  de 0 a 1 para cada rango de pendiente y tipo de suelo.

Pendiente (°)	Hw (1) - Hw(0)			
	Coluvión basaltos y andesitas (%)	Coluvión grupo Padre Miguel (%)	Suelo residual grupo Valle de Ángeles (%)	Propiedades por defecto para coluvión (%)
5	1	7	9	4
10	16	6	19	10
15	34	13	28	26
20	29	20	26	48
25	17	23	19	66
30	12	24	14	66
35	7	24	10	50
40	7	26	5	29
45	3	20	5	15
<b>Promedio</b>				<b>20</b>
<b>Desviación típica</b>				<b>16</b>



Tabla 34. Porcentajes de valores de FS inferiores a 1 para un Hw de 0 para cada rango de pendiente y tipo de suelo y valor promedio de todos los tipos de suelo.

Pendiente (°)	Hw(0)				Promedio (%)
	Coluvión basaltos y andesitas (%)	Coluvión grupo Padre Miguel (%)	Suelo residual grupo Valle de Ángeles (%)	Propiedades por defecto para coluvión (%)	
5	5	7	6	0	4
10	13	14	12	0	8
15	37	17	23	1	15
20	61	22	41	3	28
25	75	29	59	11	41
30	82	36	71	26	52
35	85	45	77	48	63
40	88	48	84	71	72
45	89	58	86	85	79

### 3.4.3 Estimación del factor de seguridad aplicando el modelo del talud infinito de forma probabilista

Para estimar el factor de seguridad aplicando el modelo del talud infinito de forma probabilista para toda la cobertura de coluvión y suelos residuales se aplicaron los parámetros promedio obtenidos de los estudios de suelos disponibles, que fueron los que arrojaron valores más altos de IA en los estudios piloto. Se empleó la función normal para los parámetros que se modelaron de forma probabilista y se asumió de forma conservadora un valor fijo de  $H_w$  de 1 (suelo completamente saturado), de igual forma que en los estudios de las zonas piloto. En el [anexo 6](#) se resumen los parámetros empleados para esta modelación.

La Figura 61 muestra los resultados obtenidos de la modelación, expresados como la probabilidad de que el  $FS < 1$ . A los pixeles sin datos (con pendientes menores de 5°) se les asignó un valor de 0, completando los huecos en la cobertura generada por el programa PISA mediante una máscara del coluvión con un valor único de 0. (Tabla 35).

Tabla 35. Media y desviación típica de que  $FS < 1$  para los distintos tipos de suelos y los deslizamientos.

Cobertura	Media probabilidad FS < 1	Desviación típica
Todo la cobertura de coluviones y suelos residuales	0,37	0,26
Inventario de deslizamientos validado	0,44	0,25
Coluvión de basaltos, andesitas y riolitas	0,42	0,28
Suelo residual grupo Valle de Ángeles	0,4	0,23
Coluvión grupo Padre Miguel	0,3	0,22

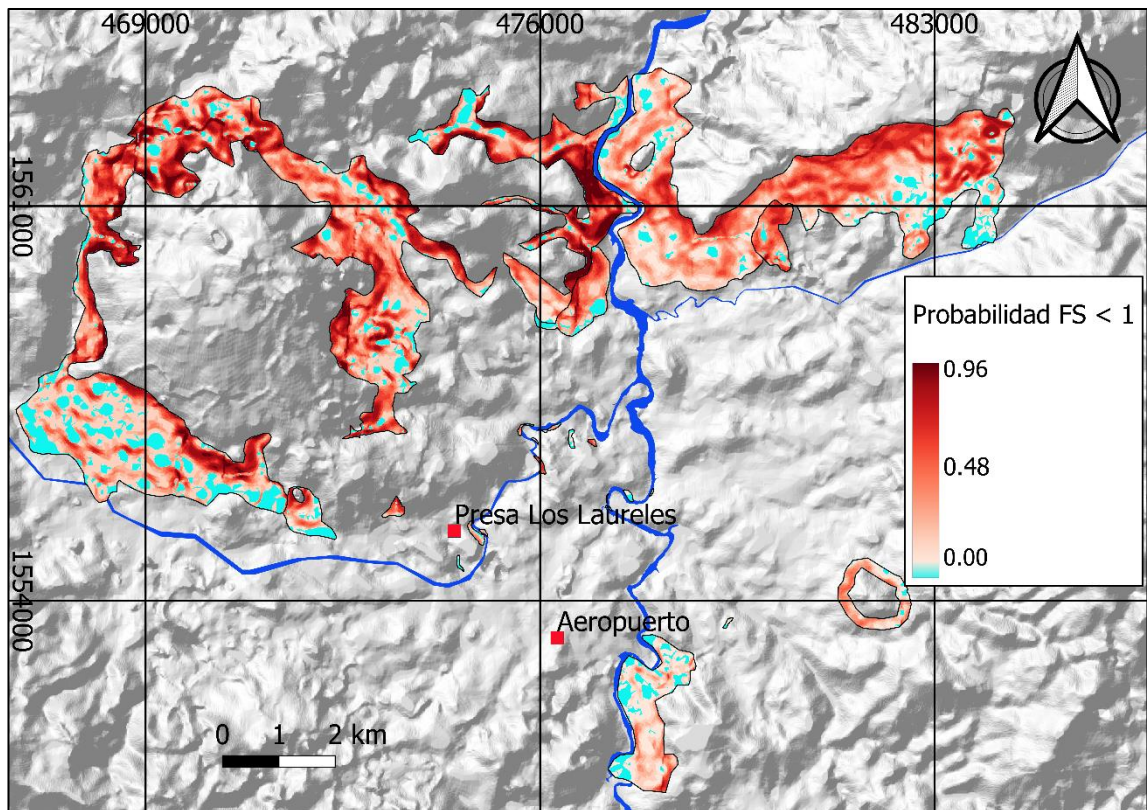


Figura 61. Resultados de la modelación del FS con PISA-m introduciendo los parámetros de forma probabilista.

La Tabla 36 muestra los valores de la distribución del área del coluvión por rango de probabilidad. Se constata que los valores obtenidos de forma probabilista fueron superiores a los que arrojó la modelación determinista en las zonas piloto, pues la modelación probabilista no arrojó valores en el rango de probabilidad muy baja (0 – 0,03) y baja (0,03 – 0,08), rangos que si están presentes en los resultados de las modelaciones en las zonas piloto (3.4.1). El rango con mayor porcentaje en área es el 0,16 – 0,25, con un 17%, seguido del área sin datos que corresponde a un 15%. (Tabla 35).

Tabla 36. Porcentaje de área del coluvión por rango de probabilidad de que  $FS < 1$ .

Rango probabilidad	Área (%)
sin datos	15
0,08 – 0,16	7
0,16 – 0,25	17
0,25 – 0,32	10
0,32 – 0,40	9
0,4 – 0,48	9
0,48 – 0,56	8
0,56 – 0,64	7
0,64 – 0,72	6
0,72 – 0,80	5
0,80 – 0,88	4
0,88 – 0,96	3

Respecto a los valores que arroja la modelación probabilista segmentada por tipo de suelo y para el inventario de deslizamientos (Tabla 35), la media más alta de valor de probabilidad le corresponde al inventario de deslizamientos con un valor de 0,44, seguido del coluvión de basaltos, andesitas y riolitas, con 0,42, el suelo residual derivado del grupo Valle de Ángeles, con 0,4 y, finalmente, el coluvión derivado del grupo Padre Miguel, con 0,3. Estos valores evidencian la capacidad explicativa de la modelación del talud infinito de la distribución

espacial del inventario de deslizamientos validado pues es esta categoría la que muestra valores de probabilidad promedio más altos.

La Figura 62 muestra los resultados de la probabilidad de  $FS < 1$  clasificados en los rangos propuestos por Hammond (1992). Mediante la intersección de este mapa con el inventario validado se pudo estimar el IA para todo el inventario de deslizamientos validado, utilizando la Ecuación 32 aplicada previamente para las zonas piloto. Se obtuvo un IA del 92,1%, significativamente mayor a los valores de las zonas piloto (el mayor valor de IA obtenido en las zonas piloto fue del 76%).

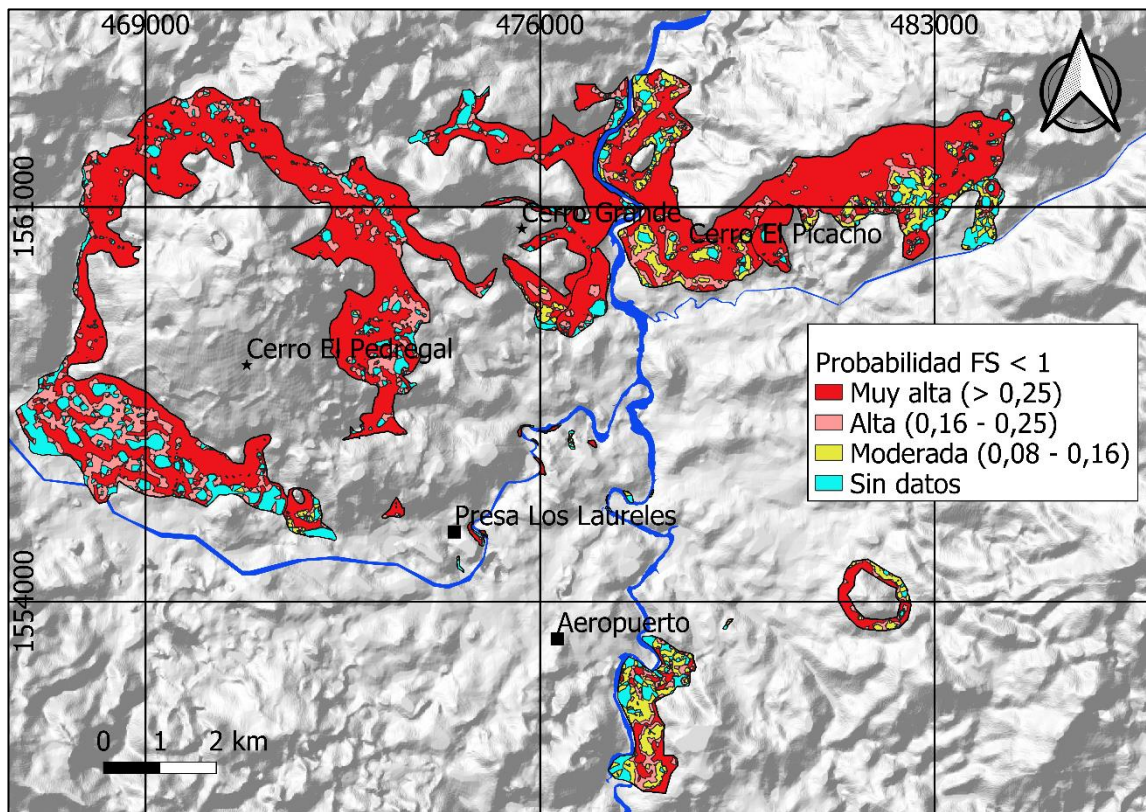


Figura 62. Resultados de la modelación con PISA-m introduciendo los parámetros de forma probabilista y clasificando los resultados según los rangos propuestos por Hammond (1992).

Al analizar la distribución del área de cada cobertura por cada categoría de probabilidad se aprecia que la categoría moderada aparece principalmente en el coluvión derivado del grupo Padre Miguel. De igual forma, se identifica que el inventario de deslizamientos es la cobertura que presenta mayor proporción de área clasificada como de muy alta probabilidad (75,5% del área), seguida por el suelo residual derivado del grupo Valle de Ángeles (74,6%) (Figura 63).

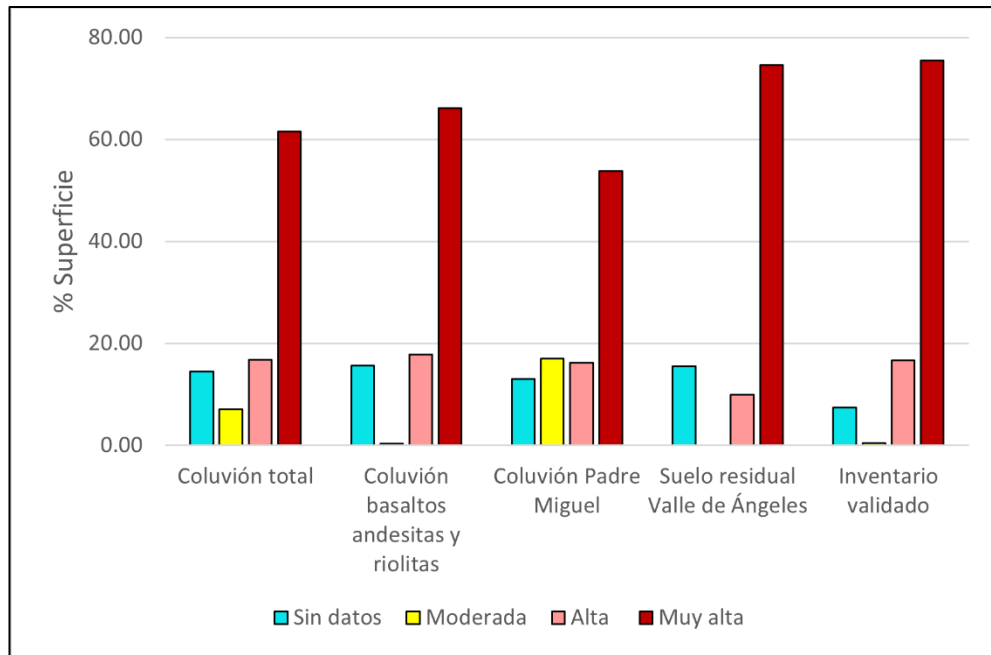


Figura 63. Proporción del área de cada recubrimiento para cada categoría de probabilidad.

Teniendo en cuenta los resultados de los estudios piloto y del análisis de sensibilidad del modelo del talud infinito (3.4.1 y 3.4.2, respectivamente), que evidenciaron que este modelo tiende a subestimar las zonas inestables localizadas en áreas con bajas pendientes, se realizó un análisis geomorfológico para identificar zonas de bajas pendientes, que el programa PISA-m clasificó como estables, y que forman parte del cuerpo de deslizamientos.

Para este análisis se emplearon los resultados del PISA-m, el modelo de sombras (hillshade) y las curvas de nivel cada 10 metros. Las zonas de potencial ocurrencia de deslizamientos que fueron delimitadas de forma manual, aplicando criterio experto, corresponden a polígonos caracterizados por valores de probabilidad de  $FS < 1$  bajos, limitados por escarpes donde el modelo PISA-m identificó probabilidades de  $FS < 1$  altas (por encima de 0,25). En la Figura 64 se muestran los resultados del análisis geomorfológico, habiéndose identificado 14 polígonos de áreas potencialmente inestables, con un área total de 2.861.296 m<sup>2</sup>, lo que equivale a un 7% del área total de coluviones y suelos residuales y con un área promedio por polígono 204.378 m<sup>2</sup>.

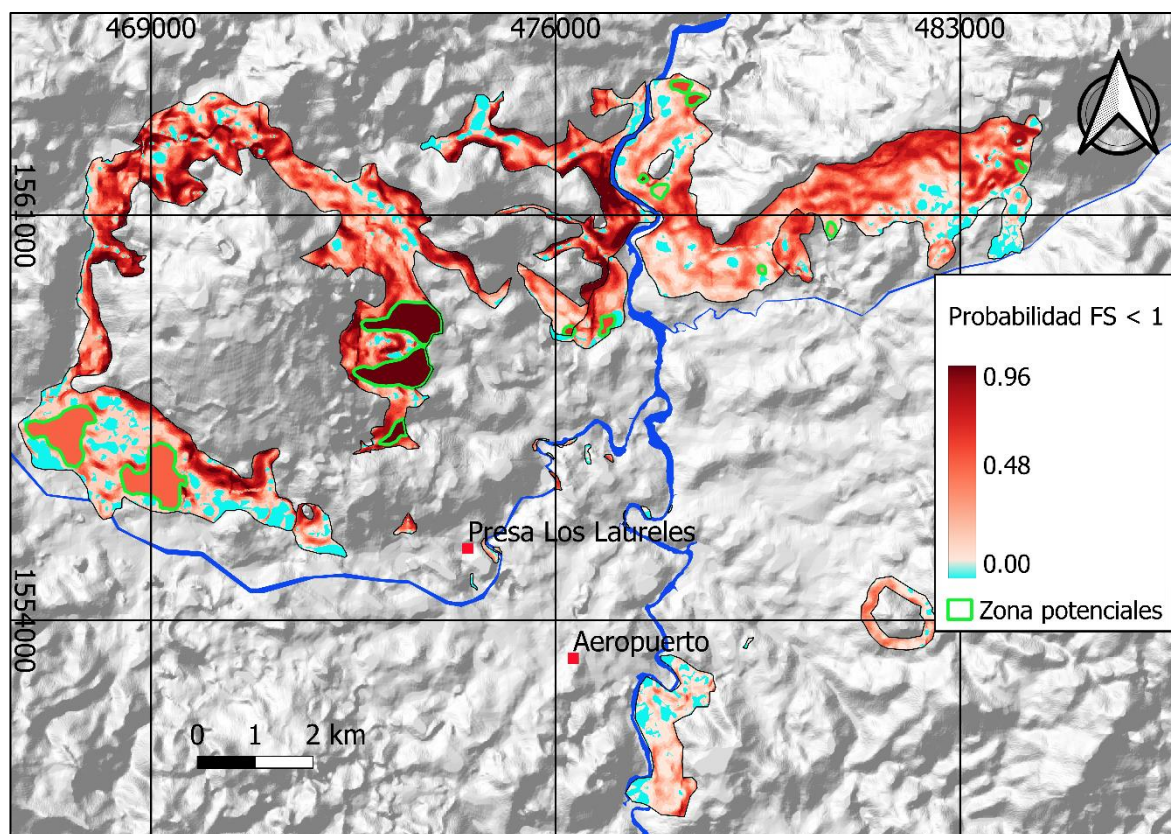


Figura 64. Resultado de la reclasificación con criterio experto de los valores obtenidos mediante PISA-m. Las zonas potenciales corresponden a áreas delimitadas con criterio experto.

### 3.5 Funciones de daño para las viviendas situadas en deslizamientos activos

La Tabla 37 muestra el resultado de cruzar las encuestas de la ONG GOAL con la capa en formato vectorial de las clases sociales (BID, 2015). Se aprecia que se dispone de datos únicamente de viviendas situadas en las clases sociales popular y precaria. Cabe mencionar que estas dos clases representan, en conjunto, en torno al 76% de las viviendas en la proyección para el año 2014 (Tabla 8). La ausencia de datos de viviendas dañadas en barrios de clase media y residencial parece corroborar que son los barrios de más baja clase social los más afectados por los movimientos de ladera.

Tabla 37. Materiales de las paredes por tipo de barrio, registros validos encuesta de ONG GOAL.

Tipo de barrio	Material de las paredes de las viviendas									
	Ladrillo		Bloque		Madera		Otros materiales		Total	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Popular	219	36	93	15	278	46	18	3	608	100
Precario	191	32	136	23	237	40	34	6	598	100
<b>Total</b>	<b>410</b>	<b>68</b>	<b>229</b>	<b>38</b>	<b>515</b>	<b>85</b>	<b>52</b>	<b>9</b>	<b>1.206</b>	<b>100</b>

Los resultados de cruzar el tipo de material de la vivienda y la clase social con los 3 deslizamientos considerados para la construcción de las funciones de vulnerabilidad (1: colonias La Ulloa y José Arturo Duarte; 2: colonia El Edén y 3: colonia el Reparto Arriba) se resumen en la Tabla 38:

Tabla 38. Número de encuestas según el material de las paredes y el tipo de barrios en los 3 deslizamientos analizados.

Tipo barrio	Paredes vivienda	José Arturo Duarte/La Ulloa		Reparto Arriba		Edén		Total	
		Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Popular	Ladrillo	90	51					90	51
	Madera	63	36					63	36
	Bloque	21	12					21	12
	Otros materiales	1	1					1	1
	<b>Total</b>	<b>176</b>	<b>100</b>					<b>176</b>	<b>100</b>
Precaria	Ladrillo	9	29	7	19	6	8	22	15
	Madera	20	65	13	36	63	78	96	65
	Bloque	1	3	13	26	10	13	24	16
	Otros materiales	1	3	3	8	1	1	5	3
	<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>100</b>	<b>36</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>147</b>	<b>100</b>

### 3.5.1 Estimación del error de las encuestas

El número total de viviendas estimado en los 3 deslizamientos fue de 805 (Tabla 39). Aplicando la Ecuación 33 se obtuvo un error muestral del 4,22%. Los valores de las variables empleados para aplicar la Ecuación 33 fueron  $n$ : 323,  $N$ : 805,  $Z$ : 1.96 y  $P$ : 0.5.

Tabla 39. Proporción de las viviendas encuestadas en los 3 deslizamientos considerados.

Deslizamiento	Número total de viviendas	Viviendas encuestadas	Encuestas (%)
Colonia La Ulloa/José Arturo Duarte	555	207	37
Colonia El Edén	104	80	77
Colonia El Reparto Arriba	146	36	25
<b>Total</b>	<b>805</b>	<b>323</b>	

### 3.5.2 Estados de daño y elementos a reponer de las viviendas

El resultado de vincular, con criterio experto, cada estado de daño identificado en las encuestas (daños en paredes, techo, piso, paredes + techo, paredes + piso, piso + techo y paredes + piso + techo) con los elementos de la vivienda que habría que reponer si se alcanza dicho estado de daño, se encuentra en el [anexo 7](#).

### 3.5.3 Estimación de la RMD

Se obtuvieron presupuestos referenciales para 5 tipos de viviendas, 3 con acabados tipo precario y 2 con acabados tipo popular: (a) viviendas de 40 m<sup>2</sup> con acabados de barrios de tipo precario, con paredes de madera (1), bloque (2) y ladrillo (3) y (b) viviendas de 100 m<sup>2</sup> con acabados de barrios de tipo popular, con paredes de bloque (4) y ladrillo (5). A partir de estos presupuestos, agrupados en los 9 elementos definidos previamente, se estableció la RMD para cada vivienda tipo. Los resultados obtenidos se encuentran en el [anexo 8](#) y se resumen en la Tabla 40 y la Figura 65. Se puede apreciar que, aunque existen diferencias en los valores de la RMD para cada estado de daño para las distintas viviendas analizadas, estos siguen una tendencia similar, es decir, las paredes representan para todos los casos un valor sustantivamente mayor que el piso y el techo. Por otra parte, el piso y techo muestran valores de la RMD similares. Además, al estimar el coeficiente de variación de la media y desviación típica de la RMD obtenido para cada estado de daño y para todas las viviendas analizadas se aprecia que dicho coeficiente de

variación esta siempre por debajo del 30%. Esta tendencia y la relación entre el valor de reposición asociado a cada estado de daño se evidencia en la Figura 65.

Tabla 40. Valores de RMD para cada una de las viviendas tipo analizadas por tipo de barrio, media ( $\bar{X}$ ), desviación típica ( $\sigma$ ) y coeficiente de variación (CV).

Estado de daño	Valores de RMD por tipo de vivienda					$\bar{X}$	$\sigma$	CV (%)
	Precaria			Popular				
	Bloque	Ladrillo	Madera	Bloque	Ladrillo			
Techo	0,18	0,19	0,22	0,29	0,30	0,23	0,05	23
Piso	0,22	0,23	0,27	0,39	0,40	0,30	0,09	30
Piso/techo	0,33	0,33	0,39	0,56	0,58	0,44	0,12	28
Paredes	0,69	0,76	0,72	0,54	0,53	0,65	0,11	17
Piso/paredes	0,70	0,77	0,72	0,76	0,76	0,74	0,03	4
Techo/paredes	0,80	0,87	0,84	0,71	0,70	0,79	0,08	10
Piso/techo/paredes	1	1	1	1	1	1	0	0

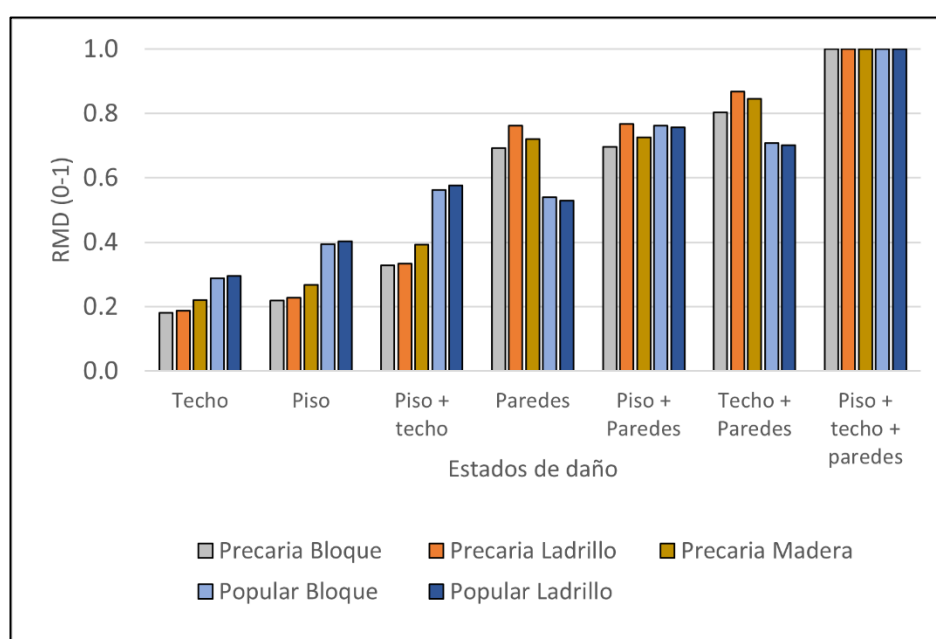


Figura 65. Valores de RMD para cada estado de daño y para los distintos tipos de vivienda considerados.

### 3.5.3.1 Estimación de la RMD según tipo de vivienda y función de vulnerabilidad

Se estimó el porcentaje de viviendas que presentan cada estado de daño para cada uno de los 5 tipos de vivienda considerados. A partir de estos valores del número de vivienda por cada estado de daño se obtuvieron las frecuencias relativas para cada estado de daño (Tabla 41). Se aprecia que el porcentaje de viviendas que no presentan daños es significativo, para todos los tipos de vivienda considerados, con un máximo de viviendas sin daño del 46% para las viviendas de bloque precarias, un mínimo del 28% para las viviendas de madera y un 32% en promedio sin daño considerando todos los tipos de vivienda. El número de viviendas con daño total, es decir, con fisuras en piso, paredes y techo simultáneamente, es relativamente limitado, con un máximo del 27% para las viviendas de ladrillo de tipo precario y con ninguna vivienda con daño total en el caso de las viviendas de bloque de tipo popular.

Tabla 41. Número y porcentaje de viviendas afectadas para cada estado de daño y para los distintos tipos de viviendas considerados. Fuente: encuestas de ONG GOAL.

Estado de daño	Precario						Popular			
	Bloque		Ladrillo		Madera		Bloque		Ladrillo	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Techo	1	4	0	0	3	2	0	0	1	1
Piso	3	13	1	5	27	17	0	0	7	8
Piso/techo	2	8	0	0	13	8	0	0	4	4
Paredes	2	8	1	5	17	11	7	33	16	18
Piso/paredes	2	8	5	23	17	11	3	14	18	20
Techo/paredes		0	1	5	9	6	2	10	6	7
Piso/techo/paredes	3	13	6	27	29	18	0	0	6	7
Sin daño	11	46	8	36	44	28	9	43	32	36
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>100</b>	<b>22</b>	<b>100</b>	<b>159</b>	<b>100</b>	<b>21</b>	<b>100</b>	<b>90</b>	<b>100</b>

Empleando las relaciones establecidas entre estado de daño y el valor de RMD (Tabla 40) y los porcentajes de viviendas en cada estado de daño (Tabla 41) se obtuvo la media y la desviación típica de la RMD para cada tipo de vivienda, expresado como un valor entre 0 y 1 (Tabla 42). Se aprecia que el tipo de vivienda que presenta un valor medio del daño más alto en promedio son las viviendas de ladrillo precario, con un 0,53 de valor de daño. Es decir, en promedio, las viviendas de ladrillo precario presentan daños por deslizamiento que en términos de costo de reposición representan aproximadamente un 53% del valor de la vivienda. Le siguen las viviendas de madera, con un valor de 0,47, las de ladrillo de tipo popular (0,42), las de bloque de tipo popular (0,36) y las de bloque de tipo precario con un (0,3).

Se aprecia que existen diferencias entre el comportamiento de los distintos tipos de vivienda, siendo las viviendas de ladrillo de tipo precario las que presentan peor respuesta promedio ante los deslizamientos, mientras las de bloques presentan la mejor. En el caso de las viviendas de bloque se aprecia que la diferencia en el comportamiento entre las de tipo precario y las de bloque popular es poco significativa. De hecho, la vivienda precaria de bloque muestra un comportamiento ligeramente mejor que la de bloque de tipo popular, con una media de 0,3 frente a 0,36 para la vivienda popular de bloque. Tomando esto en consideración se decidió elaborar una única función de vulnerabilidad para las viviendas de bloque, uniendo los datos de las viviendas de bloque de tipo popular y precario, obteniéndose un valor promedio de RMD de 0,34 (Tabla 42).

Por otro lado, la desviación típica presenta valores altos, cercanos a la media, lo que evidencia que hay una gran variabilidad en los valores de daño entre las distintas viviendas (Tabla 42).



Tabla 42. Porcentajes de viviendas para cada valor de RMD, promedio y desviación típica para los distintos tipos de vivienda analizados. BPR: vivienda de bloque precaria, LPR: vivienda de ladrillo precaria, M: vivienda de madera, BP: vivienda de bloque popular, BPR+BP: vivienda de bloque precaria y popular. Fuente: encuestas ONG GOAL.

Tipo vivienda		Techo	Piso	Piso/techo	Paredes	Piso/paredes	Techo/paredes	Piso/Techo/paredes	Sin daño	$\bar{X}$	$\sigma$
<b>BPR</b>	RMD	0,18	0,22	0,33	0,69	0,70	0,80	1,00	0,00	<b>0,30</b>	<b>0,36</b>
	%	0,04	0,13	0,08	0,08	0,08	0,00	0,13	0,46		
<b>LPR</b>	RMD	0,19	0,23	0,33	0,76	0,77	0,87	1,00	0,00	<b>0,53</b>	<b>0,43</b>
	%	0	0,05	0,00	0,05	0,23	0,05	0,27	0,36		
<b>M</b>	RMD	0,22	0,27	0,39	0,72	0,72	0,84	1,00	0,00	<b>0,47</b>	<b>0,38</b>
	%	0,02	0,17	0,08	0,11	0,11	0,06	0,18	0,28		
<b>BP</b>	RMD	0,29	0,39	0,56	0,54	0,76	0,71	1,00	0,00	<b>0,36</b>	<b>0,32</b>
	%	0,00	0,00	0,00	0,33	0,14	0,10	0,00	0,43		
<b>LP</b>	RMD	0,3	0,4	0,6	0,5	0,8	0,7	1,0	0,0	<b>0,42</b>	<b>0,34</b>
	%	0,0	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,4		
<b>BPR+BP</b>	RMD	0,3	0,4	0,6	0,5	0,8	0,7	1,0	0,0	<b>0,35</b>	<b>0,34</b>
	%	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	0,4		

### 3.5.4 Gestión de la incertidumbre de las funciones

Para estimar los parámetros de la función de distribución Beta (Ecuación 35 y Ecuación 36) se emplearon los valores de la media y desviación típica de la RMD para cada tipo de vivienda (ver resultados en Tabla 43). Con estos valores se realizaron modelaciones aleatorias para los 4 tipos de vivienda analizados, asumiendo que la RMD varía según una función de distribución de probabilidad tipo Beta (Ecuación 34). Se realizaron 1000 cálculos para cada tipo de vivienda. Los valores obtenidos se dividieron en 20 rangos de probabilidad (con un mismo ancho de clase de 0,05 unidades), se estimó la frecuencia de cada rango ([anexo 9](#)) y se acumularon las frecuencias para obtener las curvas de vulnerabilidad (Figura 66).

Se aprecia que las viviendas precarias de ladrillo son las que presentan un comportamiento más deficiente ante los deslizamientos, al ser la curva que se sitúa más a la derecha, es decir, que presentan las probabilidades más altas de alcanzar los distintos valores de RMD. Por otro lado, las diferencias entre los otros tres tipos de viviendas son relativamente bajas. La mayor diferencia en términos de probabilidad acumulada para uno de los rangos analizados es de 0,27 unidades y se produce entre la vivienda de ladrillo popular y precaria ([anexo 9](#)). Si consideramos las diferencias únicamente entre viviendas de ladrillo, madera y bloque, la máxima diferencia es de 0,12 unidades.

Tabla 43. Parámetros de la función Beta para las funciones de vulnerabilidad para cada tipo de materiales de vivienda y para la condición de  $FS < 1$ .

Materiales de la vivienda	Parámetros función Beta	
	$\alpha$	$\beta$
Ladrillo precaria	0,18	0,16
Madera	0,35	0,40
Ladrillo popular	0,46	0,63
Bloque	0,33	0,62

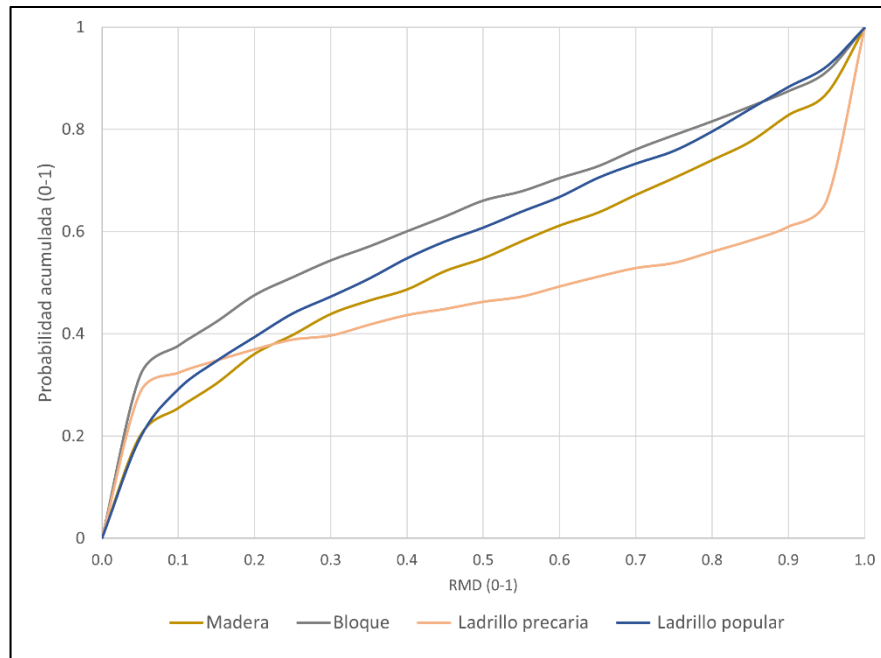


Figura 66. Curvas de vulnerabilidad para los 4 tipos de vivienda considerados.

### 3.6 Estimación probabilista del riesgo por deslizamientos en el MDC

Tal y como se ha descrito en el apartado de metodología, para completar la estimación probabilista del riesgo de deslizamientos se requieren cuatro (4) pasos: (i) la estimación de la amenaza de deslizamientos, (ii) la estimación de la exposición, (iii) la estimación de la vulnerabilidad y el daño y (iv) la estimación del riesgo.

#### 3.6.1 Estimación de la amenaza

Para estimar la amenaza de deslizamientos en cada píxel de la zona de estudio se empleó la Ecuación 41, que permite integrar la probabilidad espacial y temporal y obtener la probabilidad condicional de que un píxel sea afectado por un deslizamiento dado un evento determinado de precipitación, de acuerdo el modelo conceptual de la Figura 23.

La *probabilidad espacial*, el término  $F(FS < 1)$  de la Ecuación 41, es el resultado a nivel de píxel de la aplicación del modelo del talud infinito de forma probabilista por medio del programa PISA-m y la reclasificación posterior de algunas áreas con criterio experto (Figura 64).

La *probabilidad temporal* esta representada por la relación  $\frac{Ta_i}{Ts}$  en la Ecuación 41. El denominador  $Ts$  representa el número de píxeles susceptibles a deslizamientos, que se consideró equivalente al número de píxeles del área de coluviones y suelos residuales, correspondiente a 390.616 píxeles de 10 x 10 metros. El término  $Ta_i$  se estimó para una serie de episodios de deslizamientos obtenidos de la base de datos de desinventar, a los que se asoció una probabilidad de ocurrencia utilizando datos de precipitación antecedente, con base a la metodología de Zêzere et al., (2004).

Como resultado del análisis de la base de datos de desinventar y la información del inventario tipo evento del USGS (2001), se identificaron 72 episodios de deslizamientos en el periodo 1980 - 2012 que ocurrieron en barrios situados sobre los coluviones y suelos residuales. El episodio con mayor número de deslizamientos es el evento de fecha 31 de octubre de 1998, asociado al huracán y tormenta tropical Mitch, con 29 deslizamientos ([anexo 10](#)). Este episodio no se encuentra en la base de datos de desinventar. Para obtener el número de deslizamientos de este episodio se empleó el inventario de tipo evento del USGS (2001), del que se seleccionaron con el SIG los eventos situados sobre la cobertura de suelos residuales y

coluviones, excluyendo los flujos de detritos, que constituyen la mayor parte de los polígonos de este inventario. Los siguientes dos eventos con mayor número de deslizamientos corresponden al 29 y 30 de octubre de 1989, con 20 y 13 deslizamientos, respectivamente ([anexo 10](#)).

Con base en Valenzuela (2017), de los 72 episodios de deslizamiento recopilados en el periodo 1980-2012, se excluyeron aquellos donde la precipitación antecedente de 5 días era menor de 20 mm, con lo que el número de episodios se redujo a 57. Como se puede apreciar en la Tabla 44 el mayor número de episodios corresponde a eventos con 1 y 2 deslizamientos, los cuales suponen el 70% del total de los episodios.

Tabla 44. Número de deslizamientos por episodio registrados en la base de datos desinventar.

Número de deslizamientos	Número de episodios	%
29	1	1,8
20	1	1,8
13	1	1,8
9	1	1,8
7	1	1,8
6	2	3,5
4	3	5,3
3	7	12,3
2	21	36,8
1	19	33,3
<b>Total</b>	<b>57</b>	<b>100</b>

Por medio del análisis estadístico de los máximos anuales de los indicadores de lluvia considerados (1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 30 y 60 días acumulados) para la serie de datos de 1980 a 2019 de la base de datos de la estación meteorológica de la UNAH y aplicando las Ecuación 38 y Ecuación 39, se obtuvieron los parámetros de la función de Gumbel  $\alpha$  y  $\mu$  para cada indicador (Tabla 45). Empleando estos parámetros y las Ecuación 37 Ecuación 40 se estimaron los periodos de retorno para cada episodio de deslizamientos ([anexo 10](#)).

Tabla 45. Parámetros  $\alpha$  y  $\mu$  de la función de Gumbel para los distintos indicadores de lluvia antecedente considerados.

Indicador de precipitación (días)	$\alpha$	$\mu$
<b>1</b>	0,066	55,82
<b>2</b>	0,040	73,76
<b>3</b>	0,036	87,45
<b>5</b>	0,033	100,57
<b>7</b>	0,029	126,47
<b>10</b>	0,025	147,52
<b>15</b>	0,022	180,56
<b>30</b>	0,017	262,73
<b>60</b>	0,011	359,91

A partir de los periodos de retorno de los episodios de deslizamientos se estimaron los periodos de retorno para cada evento con un determinado número de deslizamientos. Los eventos con 7, 6 y 4 deslizamientos se descartaron del análisis, porque se obtuvieron periodos de retorno muy próximos al del evento de 9 deslizamientos.

En el caso del evento con 3 deslizamientos, entre los siete episodios existentes se seleccionó el periodo de retorno mayor obtenido con la metodología de Zêzere et al., (2004). En el caso de los eventos de 1 y 2 deslizamientos existen gran número de episodios para cada tipo de evento, 21 y 19 episodios respectivamente (Tabla 44) y los valores de periodos de retorno obtenidos con el método de Zêzere et al., (2004) muestran una gran dispersión ([anexo 10](#)). Considerando

que el valor del periodo de retorno que más se repite para los episodios de 1 y 2 deslizamientos es 1 año se optó por asignar este periodo de retorno a los eventos con 1 deslizamiento (que es ligeramente inferior al periodo de retorno de 1,3 años para los eventos con 3 deslizamientos) y no considerar los eventos con 2 deslizamientos en el análisis.

Una vez estimado el periodo de retorno para los eventos de deslizamiento considerados (eventos con 29, 20, 13, 9, 3 y 1 deslizamiento), se obtuvo el área afectada para cada evento, multiplicando el número de deslizamientos por el valor promedio del área de los deslizamientos obtenida por el inventario del validado (147.116 m<sup>2</sup>, 1.471 pixeles de 10 x 10 m) y se calculó el valor de la relación  $\frac{Ta_i}{Ts}$  (Tabla 46) de la Ecuación 41, es decir la probabilidad de que una determinada precipitación genere las condiciones para que se active un deslizamiento en un pixel situado en la cobertura de coluviones y suelos residuales.

Tabla 46. Eventos caracterizados a partir de datos históricos de deslizamientos, periodo de retorno y área deslizada. Para estimar el área deslizada ( $Ta_i$ ) se empleó el valor del área promedio del inventario de deslizamientos que es de 1,471 pixeles (pixel 100 m<sup>2</sup>).  $Ts$  es el área del coluvión y suelos residuales, que corresponde a 390.617 pixeles.

Periodo de retorno (años)	Número de deslizamientos	Área deslizada (pixeles) ( $Ta_i$ )	$\frac{Ta_i}{Ts}$
125	29	42.664	0,109
6	20	29.423	0,075
4	13	19.125	0,049
2	9	13.240	0,034
1,3	3	4.413	0,011
1	1	1.471	0,004

La probabilidad de que un pixel sea afectado por un deslizamiento para cada uno de los periodos de retorno considerados, se obtiene aplicando la Ecuación 41. En la práctica, para cada periodo de retorno se multiplica la probabilidad espacial, que corresponde al mapa en formato raster de la probabilidad de que el  $FS < 1$  (Figura 64), por la probabilidad temporal para el periodo de retorno considerando, representada por un mapa donde todos los pixeles tienen asociado el valor de  $\frac{Ta_i}{Ts}$  que corresponde a dicho período de retorno (Tabla 46). Los mapas resultantes de este proceso se multiplicaron posteriormente por el valor de la pérdida probable para la condición de que el  $FS < 1$ , para estimar las pérdidas probables para cada periodo de retorno considerado. En el apartado 3.6.4 se describe el proceso realizado para integrar el análisis de la amenaza con la exposición y la vulnerabilidad y estimar las pérdidas probables.

### 3.6.2 Estimación de la exposición

La Figura 67 muestran la distribución de los tipos de barrio en función de la calidad de la vivienda dentro del área del coluvión. Se aprecia que las viviendas precarias constituyen la tipología predominante de construcción en las zonas que se encuentran sobre depósitos de coluviones y suelos residuales.

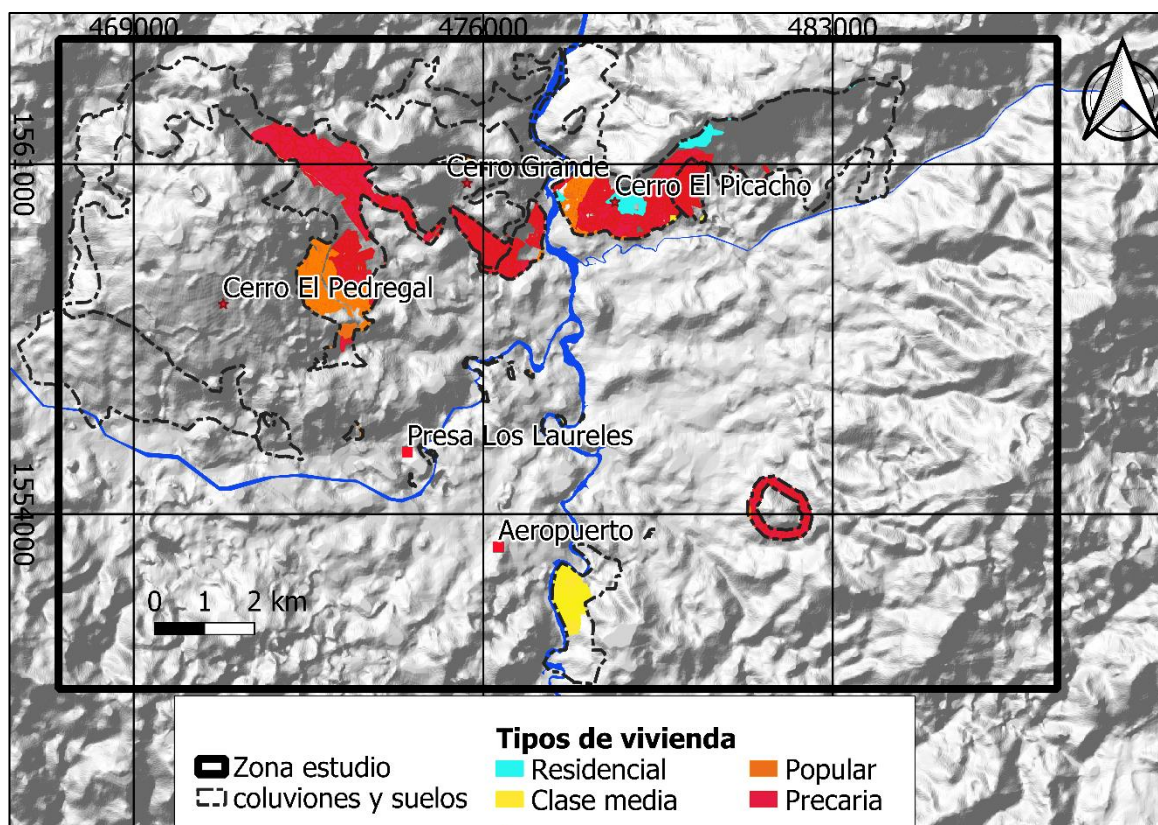


Figura 67. Tipos de vivienda según la calidad constructiva de los barrios asentados sobre áreas con recubrimiento de coluvión o suelos residuales. Fuente BID (2015).

Aplicando la Ecuación 43 y los supuestos descritos en el apartado de metodología se realizó la proyección de la vivienda, población y valor de reposición por  $m^2$  de construcción por tipología de construcción. Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 47 y están detallados en el [anexo 11](#). El valor total expuesto es de 1.255 millones de dólares del año 2020. Aunque la población localizada en barrios precarios y residenciales constituye el 67% y 2% de la población expuesta, respectivamente, el valor expuesto asociado a los barrios precarios representa únicamente el 18% de todo el valor expuesto, frente al 30% de los barrios residenciales. Estas diferencias tan significativas se asocian con las marcadas diferencias en el valor del  $m^2$  construcción, que, en los barrios residenciales, es un 2.680% mayor que en las colonias caracterizadas por vivienda precaria.

Tabla 47. Viviendas, población y valor económico expuestos a los deslizamientos traslacionales y rotacionales en el MDC. Como área expuesta a deslizamientos se consideró la cobertura de coluvión y suelos residuales.

Tipos de barrios	Área (ha)	Viviendas expuestas 2020	Población expuesta 2020	Población expuesta 2020 (%)	Área viviendas (miles $m^2$ )	Valor $m^2$ vivienda	Valor expuesto (millones US\$)	% Total
<b>Residenciales</b>	43,7	1.197	3.755	2	305,8	1.246,0	381	30
<b>Clase media</b>	56,2	3.170	11.638	7	337,4	940,5	317	25
<b>Popular</b>	132,7	9.431	39.316	24	929,1	357,5	332	26
<b>Precaria</b>	606,6	24.072	109.566	67	4.852,9	46,3	224	18
<b>TOTAL</b>	<b>839,3</b>	<b>37.870</b>	<b>164.275</b>	<b>100</b>	<b>6.425</b>		<b>1.255</b>	<b>100</b>

Considerando que la proyección de población total para el año 2020 para el MDC es de 1.345.117 habitantes y 328.879 viviendas (BID, 2015), se obtiene que la población y viviendas expuestas estimadas representan un 12% y 11,5% del total respectivamente. En relación a la proporción que representa el valor económico expuesto del valor total de las viviendas del MDC, se proyectó al año 2020 el valor total expuesto del estudio BID (2015), que es de 27.067

millones de dólares para 2015, usando la misma metodología utilizada para actualizar los valores por m<sup>2</sup>, (incluyendo la devaluación promedio anual) obteniéndose un valor total de reposición del stock de vivienda del MDC para 2020 de 30.195 millones de dólares. El valor del stock total de vivienda del MDC que estaría expuesto a deslizamientos transaccionales y rotacionales sería del 4.2% (1.255 millones de dólares).

### 3.6.3 Estimación de la vulnerabilidad y el daño

La proporción entre los tipos de vivienda para cada tipo de barrio, se estimó a partir de los supuestos descritos en el apartado de metodología de forma que las proporciones totales fueran similares a las existentes para toda la zona de estudio (Tabla 7). Los valores aparecen resumidos en la Tabla 48.

Tabla 48. Distribución de tipos de vivienda por tipo de barrio.

Tipo de barrios	Total de viviendas (%)	Proporción de materiales por tipo de barrio (%)		
		Ladrillo	Bloque	Madera
Residencial	9		100	
Clase media	15	86	14	
Popular	50	94	4	2
Precaria	26	18.3	16.3	65
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>65</b>	<b>17</b>	<b>18</b>

### 3.6.4 Estimación del riesgo

El valor de la pérdida probable para cada una de las 30 unidades homogéneas dada la condición de que el  $FS < 1$  se estimó aplicando la Ecuación 45, tomando en consideración las proporciones de materiales de las paredes de la vivienda por tipo de barrio (Tabla 48) y los parámetros de las funciones de vulnerabilidad para cada tipo de vivienda (Tabla 43). Los valores obtenidos por tipo de barrio se resumen en la Tabla 49 y en el [anexo 11](#) para cada una de las 30 unidades. Es importante destacar que, al tratarse de una estimación aleatoria, los valores obtenidos varían cada vez que se actualiza la hoja y, por tanto, los valores que aparecen en la Tabla 49 y el [anexo 11](#) corresponden a uno de los posibles resultados del cálculo.

Como es previsible, la relación del valor de la pérdida esperada (la esperanza matemática de la pérdida) con respecto al valor expuesto es menor para los barrios residenciales (36%) y mayor para los precarios (51%), presentando el mismo valor para los barrios residenciales y de clase media (44%) (Tabla 49). El promedio de la relación entre la pérdida esperada y el valor expuesto por tipo de barrio es del 44%, con una desviación típica del 6% (Tabla 49). Cuando el análisis se realiza a nivel de cada una de las 30 unidades homogéneas ([anexo 11](#)) el valor es similar con un promedio del 46% y una desviación típica del 5%.

Tabla 49. Relación entre el valor expuesto y la pérdida probable para la condición de  $FS < 1$  por tipo de viviendas.

Tipos de viviendas	Valor expuesto (millones US\$)	Pérdida esperada para condición $FS < 1$ (millones US\$)	Valor expuesto por tipo de vivienda (%)
Residenciales	381	137	36
Clase media	317	139	44
Popular	322	146	44
Precaria	224	113	51
<b>TOTAL</b>	<b>1.255</b>	<b>535</b>	<b>43</b>
<b>Promedio</b>			<b>44</b>
<b>Desviación típica</b>			<b>6</b>

En la Figura 68 se aprecia cuáles son las zonas que concentran el mayor valor de la pérdida probable dada la condición que el  $FS < 1$ . Se aprecia que los barrios que concentran el mayor valor de pérdida probable son los barrios residenciales situados al norte de la zona de estudio,

en las laderas del cerro El Picacho, que presentan rangos de pérdidas probables entre 25.188 a 1.044.164 dólares americanos.

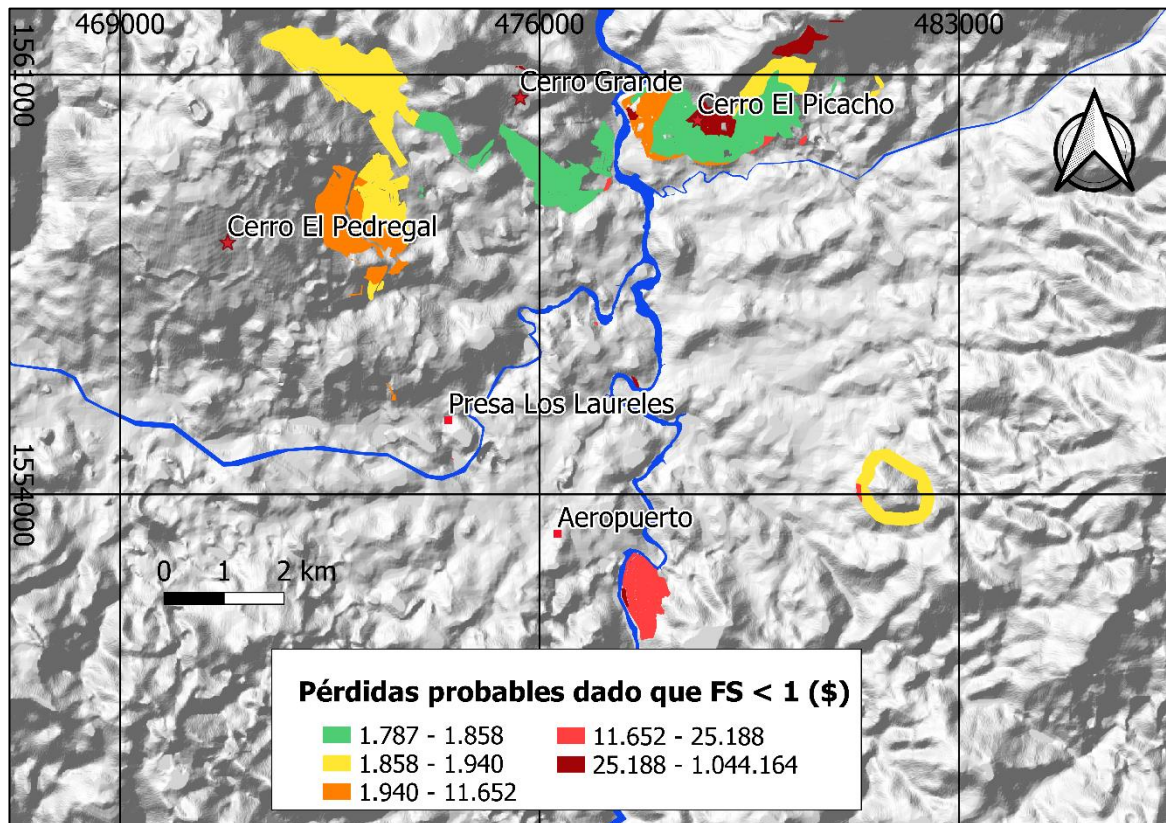


Figura 68. Distribución de las pérdidas probables en dólares americanos para la condición de  $FS < 1$  para las 30 unidades homogéneas.

A partir de la Esperanza matemática de la pérdida probable para cada unidad se estimó la pérdida probable a nivel de pixel aplicando la Ecuación 46.

El valor de la pérdida probable a nivel de pixel dada la condición de  $FS < 1$  se combinó con la probabilidad condicional de que  $FS < 1$  para cada periodo de retorno por medio de la Ecuación 47. Para aplicar dicha ecuación, los mapas de probabilidad de  $FS < 1$  (Figura 64), de probabilidad de disparo a nivel de pixel para el escenario considerado (valor  $\frac{T a_i}{T_s}$ , Tabla 46) y de distribución de pérdidas probables dada la condición de que el  $FS < 1$  (Figura 68) se multiplicaron para obtener el resultado de las pérdidas probables para cada uno de los periodos de retorno considerados (125, 6, 4, 2, 3 y 1 año). Dado que la única variable que se modifica es la probabilidad de disparo a nivel de pixel, todos los mapas presentan la misma distribución espacial de los valores de pérdidas probables, modificándose únicamente la escala. La Figura 69 muestra el resultado de la estimación de pérdidas probables para el periodo de retorno de 125 años.

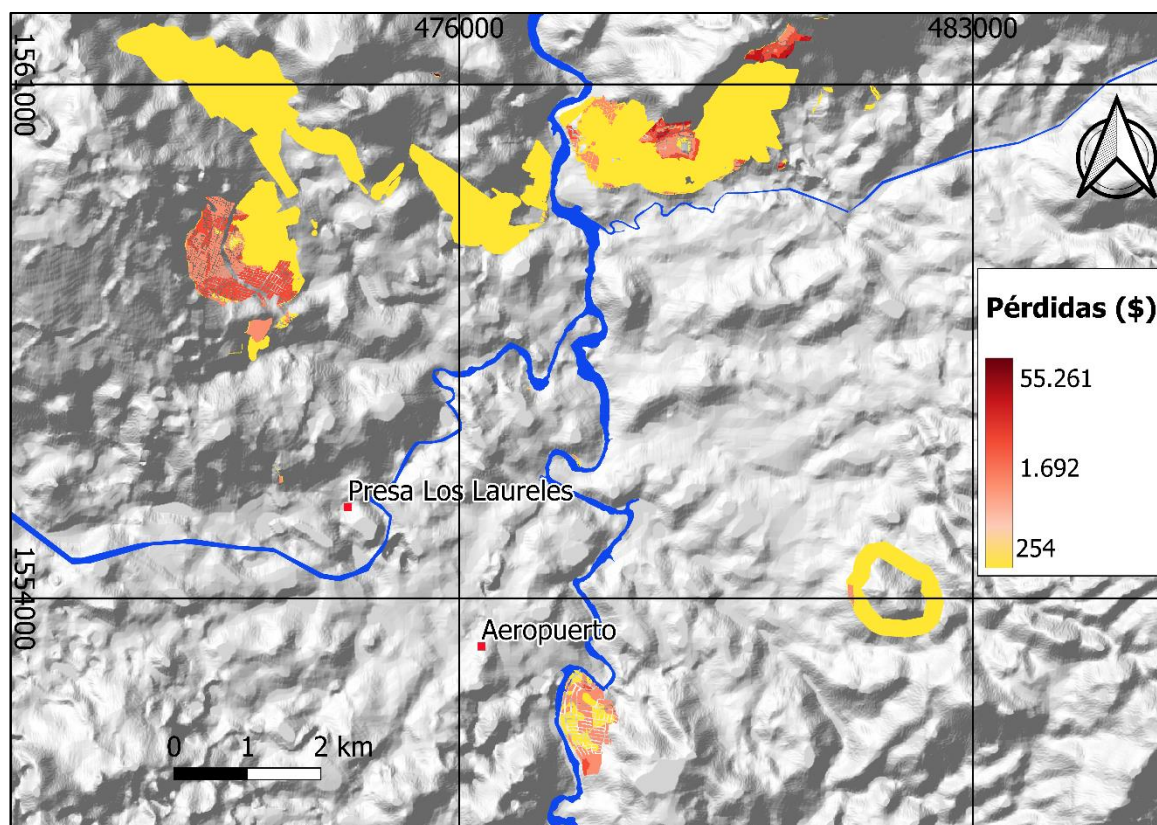


Figura 69. Pérdidas probables, expresadas en dólares americanos a nivel de pixel, para un periodo de retorno de 125 años.

Una vez obtenidas las coberturas en formato raster de las pérdidas probables para cada uno de los periodos de retorno considerados se estimó el valor total de las pérdidas para cada periodo de retorno (Ecuación 48), así como el valor máximo y mínimo, la media y la desviación típica a nivel de pixel (Tabla 50).

Tabla 50. Pérdidas probables totales para los 6 periodos de retorno considerados y estadísticas a nivel de pixel.

Periodo de retorno	Probabilidad anual de excedencia	Total (miles \$)	Máximo (\$)	Media (\$)	Desviación típica (\$)
125	0,008	21.291,9	55.261,60	253,95	719,00
6	0,166	14.650,3	38.024,00	174,74	494,73
4	0,250	9.571,6	24.842,37	114,16	323,22
2	0,500	6.641,5	17.237,56	79,21	224,27
1,3	0,769	2.148,7	5.576,85	25,63	72,56
1	1,000	781,39	2.027,94	9,31	26,38

Los valores de pérdidas probables y las probabilidades anuales de excedencia se emplearon para construir la curva de excedencia de pérdidas (Figura 70). La Pérdida Anual Esperada (PAE) (Ecuación 49) se estimó como el área bajo la curva de excedencia de pérdidas siguiendo el procedimiento por intervalos que se describe en la Tabla 19. El valor obtenido de la PAE fue de 7,26 millones de dólares americanos (Tabla 51).



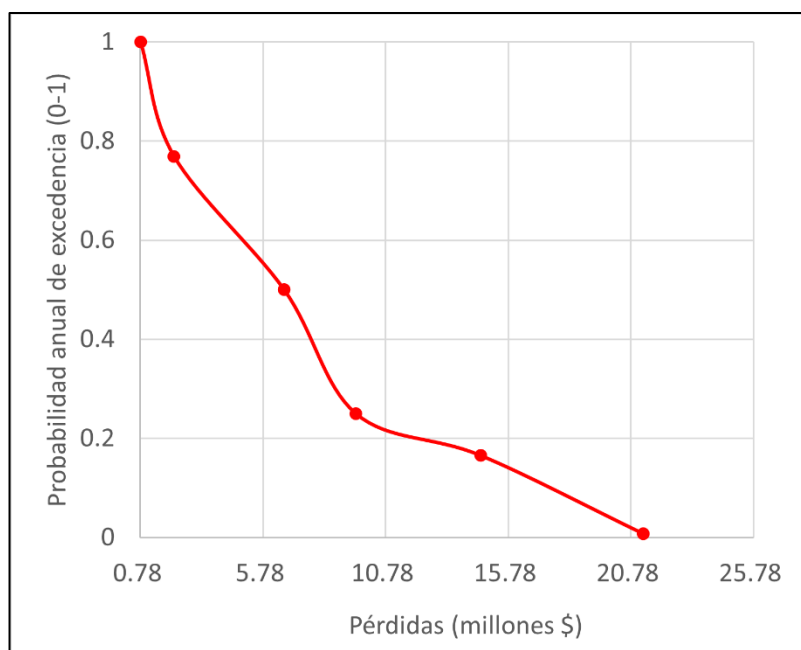


Figura 70. Curva de excedencia de pérdidas por deslizamientos para la zona de estudio.

Tabla 51. PAE por deslizamientos estimada a partir de la curva de excedencia de pérdidas con el método de los intervalos.

Pérdidas			Probabilidad			Pérdida anual esperada intervalo (PAEI) (\$)
Límite inferior (\$)	Límite superior (\$)	Valor índice (\$)	Límite inferior	Límite superior	Probabilidad	
781.353	2.148.722	1.295.728	1	0,769	0,23	299.313
2.148.722	6.641.504	3.777.664	0,769	0,5	0,27	1.016.191
6.641.504	9.571.579	7.973.060	0,5	0,25	0,25	1.993.265
9.571.579	14.650.377	11.841.759	0,25	0,166	0,08	994.707
14.650.377	21.291.881	17.661.656	0,166	0,008	0,16	2.790.541
21.291.881	n/a	21.291.881	0,008	0	0,008	170.335
<b>PAE TOTAL</b>						<b>7.264.354</b>

### 3.7 Diseño de medidas para reducir el riesgo de deslizamientos

Los deslizamientos en el área de estudio son activados por eventos de precipitación. Considerando la evidencia empírica que muestra la efectividad de los sistemas de drenaje superficiales para evitar los deslizamientos en contextos de clima tropical, similares tipos de deslizamientos y condiciones de informalidad (Anderson et al., 2011), este apartado se centra en el diseño de este tipo de medidas.

#### 3.7.1 Propuesta de medidas

##### 3.7.1.1 Delimitación de microcuencas

Se delimitaron un total de 20 microcuencas en las áreas de coluvión y suelos residuales (Figura 71), de las cuales 4 (números 1, 13, 15 y 20) corresponden a las áreas que serán drenadas por los canales interceptores. Las áreas de estas microcuencas y sus parámetros principales se detallan en el [anexo 12](#). El promedio del área de las microcuencas es de 631.554 m<sup>2</sup> (63 ha), con una desviación típica de 46.8760 m<sup>2</sup> (47 ha).

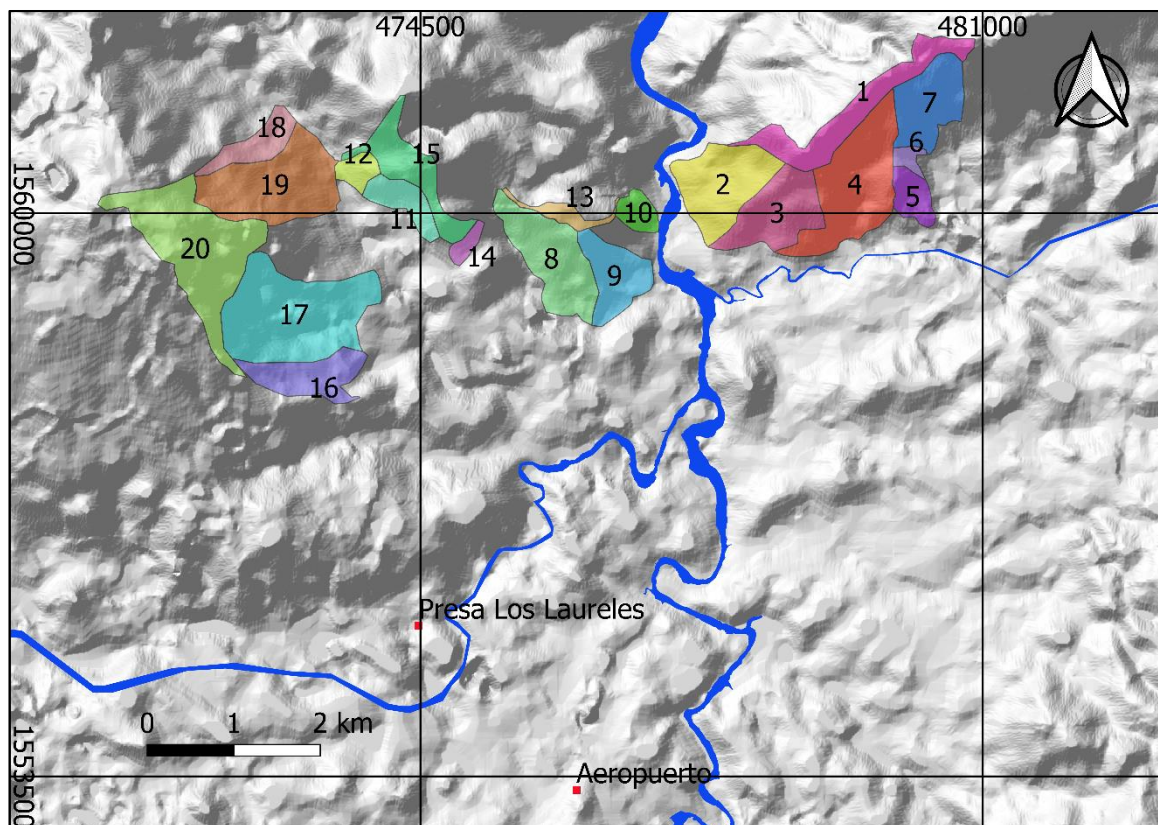


Figura 71. Microcuencas hidrográficas consideradas en este trabajo.

El valor mínimo de tiempo de concentración obtenido empleando la Ecuación 50 fue de 1,78 minutos y el máximo de 11,27 minutos (anexo 12). Es decir, las microcuencas presentan tiempos de concentración bajos, por debajo de 30 minutos, que permiten que los caudales puedan ser estimados aplicando la fórmula racional (INTEMA, 2002).

### 3.7.1.2 Diseño del sistema de drenaje

La Figura 72 muestra el trazado del sistema de drenaje elaborado. En total se trazaron 170 tramos de canales, 4 canales de tipo interceptor, 15 de tipo primario y 151 de tipo secundario (Tabla 52), lo que supone un total de 92.9 km de canales (anexo 13).

Tabla 52. Resumen de los elementos del sistema de canales propuesto.

Tipo de canal	Nº de tramos	Longitud total (m)
Interceptor	4	10.959,27
Principal	15	14.905,33
Secundario	151	67.125,92
<b>TOTAL</b>	<b>170</b>	<b>92.990,52</b>

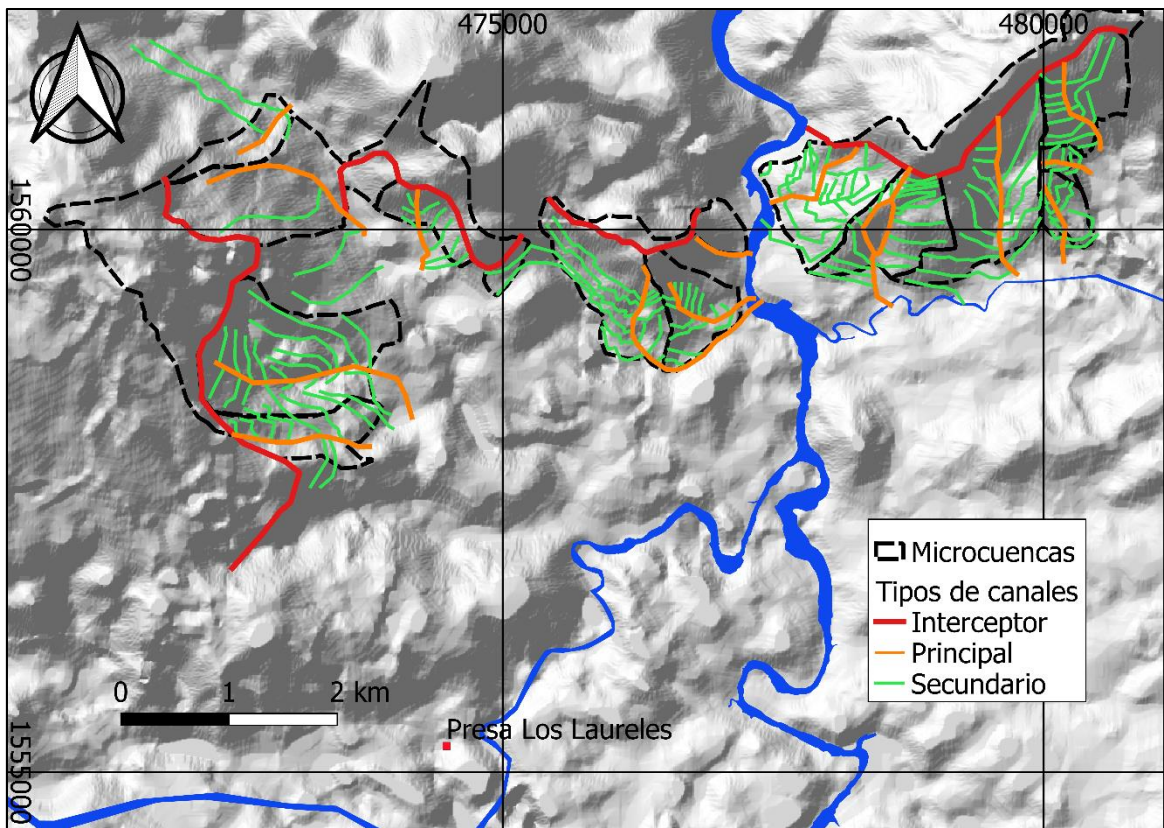


Figura 72. Tipos de canales y posición del sistema de drenaje propuesto.

### Dimensionamiento

El sistema de drenaje se diseñó para un periodo de retorno de 10 años. La precipitación de diseño para cada microcuenca, para este periodo de retorno de 10 años, se obtuvo por medio de la Ecuación 51. Los parámetros empleados para aplicar la Ecuación 51 se resumen en la Tabla 53. Los resultados obtenidos se encuentran en el [anexo 12](#).

Tabla 53. Parámetros de las curvas intensidad/duración/retorno empleados para estimar la intensidad en mm/h de la lluvia de diseño.

Período de retorno de 10 años		Parámetro característico de la estación
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>n</i>
2696	14,5	0,9012

Una vez se obtuvo la precipitación de diseño para cada microcuenca se estimó el caudal de diseño para cada canal empleando la fórmula racional (Ecuación 52). Los resultados del caudal de diseño para cada canal se resumen en el [anexo 13](#).

### Presupuesto

La recopilación de la información de los presupuestos de los canales de mampostería de la AMDC permitió obtener valores para 11 secciones tipo de canal, siendo la menor de un ancho de 0,3 m por una profundidad de 0,4 metros y la mayor de 0,9 m por 0,8 m ([anexo 14](#)). Todos los canales tienen un ancho en sus paredes de mampostería de 0,25 m. En la Figura 73 se aprecia la recta obtenida por medio de la extrapolación lineal de los valores de recopilados de la sección del canal y su costo por metro lineal. La correlación presenta una  $R^2$  de Pearson de 0,9836, lo que confirma la significativa relación lineal entre ambas variables. En la Tabla 54 se encuentran las 11 secciones recopiladas y sus costos, así como los costos por metro lineal estimados empleando la ecuación de la recta para 9 secciones adicionales.

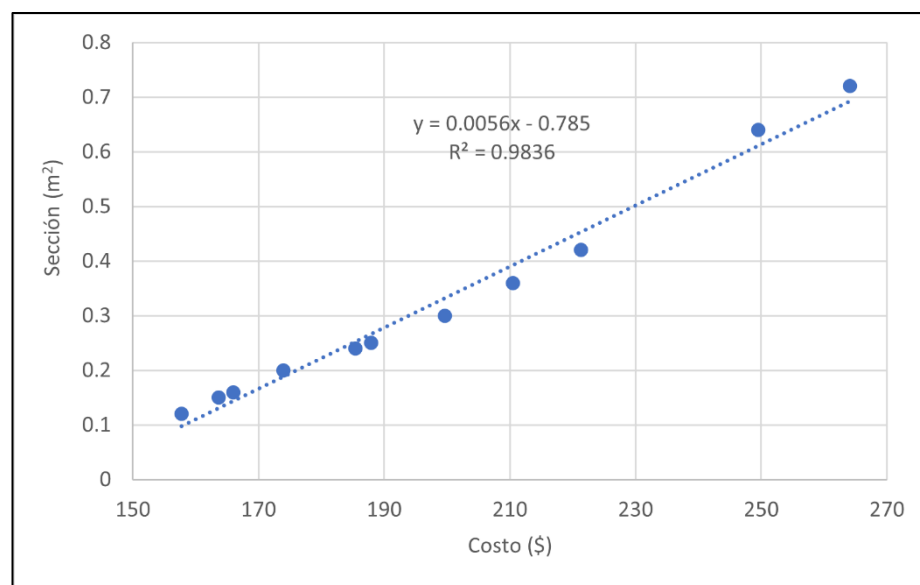


Figura 73. Correlación lineal entre las secciones de los elementos de drenaje y el costo. Incluye el valor de la  $R^2$  y la ecuación de la recta.

Tabla 54. Principales parámetros de los canales y costo por metro lineal.

Sección alto x ancho (m)	Sección (m <sup>2</sup> )	Perímetro (m)	Perímetro mojado (m)	Presupuesto (\$/m)	Metodología estimación costo
0,3 x 0,4	0,12	1,1	0,11	158	Datos provistos por el AMDC
0,4 x 0,4	0,16	1,2	0,13	166	
0,3 x 0,5	0,15	1,3	0,12	164	
0,4 x 0,5	0,2	1,4	0,14	174	
0,5 x 0,5	0,25	1,5	0,17	188	
0,4 x 0,6	0,24	1,6	0,15	185	
0,6 x 0,5	0,3	1,6	0,19	200	
0,6 x 0,6	0,36	1,8	0,20	210	
0,6 x 0,7	0,42	2	0,21	221	
0,8 x 0,8	0,64	2,4	0,27	250	
0,9 x 0,8	0,72	2,5	0,29	264	Estimado
0,9 x 0,9	0,81	2,7	0,3	285	
1 x 1	1	3	0,33	319	
1,2 x 1,2	1,44	3,6	0,4	397	
1,4 x 1,4	1,96	4,2	0,47	490	
1,6 x 1,6	2,56	4,8	0,533	597	
1,8 x 1,8	3,24	5,4	0,6	719	
2 x 2	4	6	0,67	854	
2 x 3,2	6,4	7,2	0,89	1283	

Empleando las Ecuación 53 y Ecuación 54 se estimó la sección necesaria para poder conducir el caudal de diseño, dada la pendiente de cada sección. El promedio de caudal obtenido fue de 4,31 m<sup>3</sup>/s, el máximo caudal de 51.24 m<sup>3</sup>/s y el mínimo de 0.06 m<sup>3</sup>/s. En el [anexo 13](#) se detallan los resultados obtenidos. Considerando los costos identificados en la Tabla 54 se estimó el presupuesto del sistema de drenaje. El valor obtenido fue de 38.412.879,13 dólares americanos ([anexo 13](#))

### 3.7.2 Estimación del beneficio

Los beneficios de las medidas de reducción del riesgo se estimaron como pérdidas anuales evitadas. Se asumió que la construcción de los canales de drenaje diseñados para un periodo de retorno de 10 años evitaría por completo los eventos de deslizamiento hasta, al menos, un periodo de retorno de 6 años. Para estimar la reducción de los daños o pérdidas directas con

medidas de reducción del riesgo se empleó el método de los intervalos. El cálculo realizado se resume en la Tabla 55, obteniéndose un valor de daños o pérdidas directas anuales con la implementación de las obras de reducción del riesgo de \$2.960.876 dólares americanos. Los daños o pérdidas directas anuales evitadas se obtienen como la diferencia entre los daños con y sin medidas de reducción del riesgo, es decir, la diferencia entre el valor obtenido en la Tabla 51 y la Tabla 55, que corresponde a \$4.303.477 dólares americanos. La Figura 74 muestra gráficamente las pérdidas evitadas por la implementación de las medidas de reducción del riesgo.

Tabla 55. Pérdidas anuales por deslizamientos estimadas para el área de estudio considerando las medidas de reducción del riesgo planteadas.

Pérdidas		Probabilidad			Pérdida anual esperada intervalo (PAEI) (\$)	
Límite inferior (\$)	Límite superior (\$)	Valor índice (\$)	Límite inferior	Límite superior	Probabilidad	
14.650.37	21.291.881	17.661.656	0,166	0,008	0,16	2.790.541
21.291.881	n/a	21.291.881	0,008	0	0,008	170.335
<b>PAE TOTAL</b>						<b>2.960.876</b>

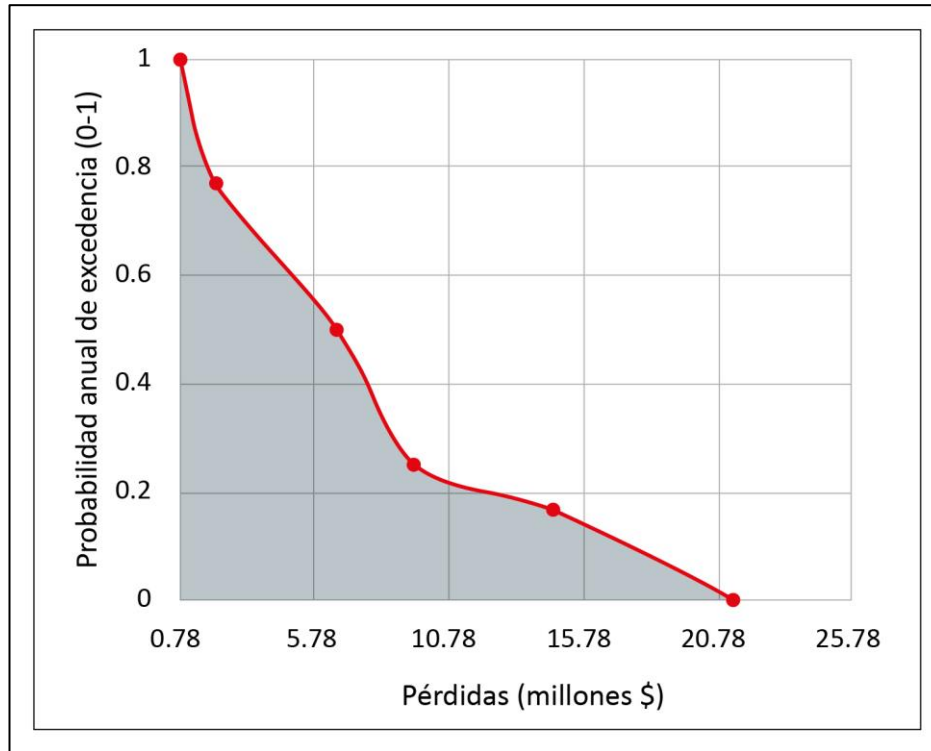


Figura 74. Representación gráfica de las pérdidas anuales evitadas. El área sombreada bajo la curva de excedencia de pérdidas representan las pérdidas económicas evitadas con la implementación de las medidas de reducción de riesgo.

En la estimación de los beneficios totales en términos de pérdidas anuales evitadas se consideró, además de los daños o pérdidas directas, un valor de pérdidas indirectas (Mechler, 2005, 2016). El valor de las pérdidas o daños indirectos para las viviendas se estimó en un 10% de los daños, teniendo en cuenta los datos históricos de los daños y pérdidas causados por eventos climáticos a las viviendas para la región de Centroamérica en el periodo 1972-2010 (Bello et al., 2014). Este porcentaje del 10% se aplicó a las pérdidas directas sin medidas de reducción del riesgo y con medidas de reducción del riesgo y se recalcularon las pérdidas evitadas como el diferencial entre ambos valores. El valor resultante de pérdidas anuales evitadas (incluyendo los daños y pérdidas) es de \$4.733.825 de dólares americanos.

### 3.7.3 Análisis costo/beneficio

El valor obtenido de la proporción de mano de obras no calificada por metro lineal del canal para el canal de dimensiones de 0,3 m x 0,4 m fue de 0,166 (Tabla 56). Este factor de 0,166 se aplicó para estimar la proporción del total de la inversión que corresponde a mano de obra (6,378,737 dólares americanos). A este valor de la mano de obra se le aplicó el factor de reducción correspondiente al precio social de la mano de obra, aplicando la Ecuación 55 y el Factor de Corrección de 0,634 (Rojas, 2019), obteniendo un valor de la inversión, corregido considerando el precio social de la mano de obra no calificada de 36.078.262 dólares americanos.

Tabla 56. Estimación de la proporción que representa la mano de obra no calificada de un metro lineal de canal de sección de 0.3 m x 0.4 m.

Elemento del canal	Presupuesto (Lempiras /m)	Proporción mano de obra no calificada (adimensional)	Costo mano de obra no calificada (Lempiras)
Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0	0,72	34,56
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9	0,011	0,50
Acarreo de Material (Desperdicio)	171,77	0,21	36,07
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	383,49	0,72	276,12
Cuneta Rectangular de Mamposteria E=25cm, A=40cm, P=50cm Emplastillado	1.327,39	0,12	159,29
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatas (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73	0,03	4,25
Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye acarreo)	505,6	0,21	106,17
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2 y resane	1.505,0	0,04	60,20
Caja Colectora de aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5	0,24	27,48
<b>TOTAL</b>	<b>4.243,4</b>		<b>704,64</b>
<b>Proporción del precio por metro que representa la mano de obra no calificada</b>			<b>0,166</b>

En la tabla Tabla 57 se resumen los principales valores utilizados en el ACB para el escenario denominado “mejor estimado”.

Tabla 57. Principales elementos del ACB y valores utilizados para el escenario denominado “mejor estimado”.

Elementos	Valor utilizado
Tasa de descuento	12%
Periodo de retorno para el que se reducirían las pérdidas	Hasta el periodo de retorno de 6 años
Pérdidas anuales evitadas en el año 1 del proyecto (\$)	2.366.912,75 (Se supuso que al completarse el 50% de la obra el primer año se proveería el 50% del beneficio)
Pérdidas anuales evitadas a partir del año 1	Valor de las pérdidas anuales evitadas en el año 1 (\$4.733.825,49) con un incremento anual del 2%
Periodo de retorno de diseño del drenaje.	10 años
Mantenimiento anual	2% del costo de la inversión inicial
Costo de la inversión (\$)	36.078.262,56 (costo total de la inversión aplicando la reducción por el precio social de la mano de obra)

Tras realizar el análisis con los parámetros de la Tabla 57 se realizó una sensibilización modificando algunas de las variables del análisis. Para la sensibilización se consideraron los siguientes escenarios: (i) sin incluir el precio social, (ii) sin considerar el incremento en la exposición, (iii) sin considerar las pérdidas indirectas y (iv) aumentando el costo de mantenimiento del 2% al 3% del valor de la inversión inicial. Los resultados de la sensibilización se resumen en la Figura 75 y la Tabla 58. En el [anexo 15](#) se incluyen los flujos

para cada uno de los escenarios. Se aprecia que dos escenarios, el mejor estimado y el estimado con precios sociales, son costo-eficientes y viables pues presentan un Valor Actual Neto (VAN) mayor de 1 y un TIR mayor del 12% (Mechler, 2005; Mechler, 2016; Barandiarán et al., 2019). El mayor valor de VAN se obtiene con el mejor estimado con un valor de \$2.663.563,03 dólares americanos.

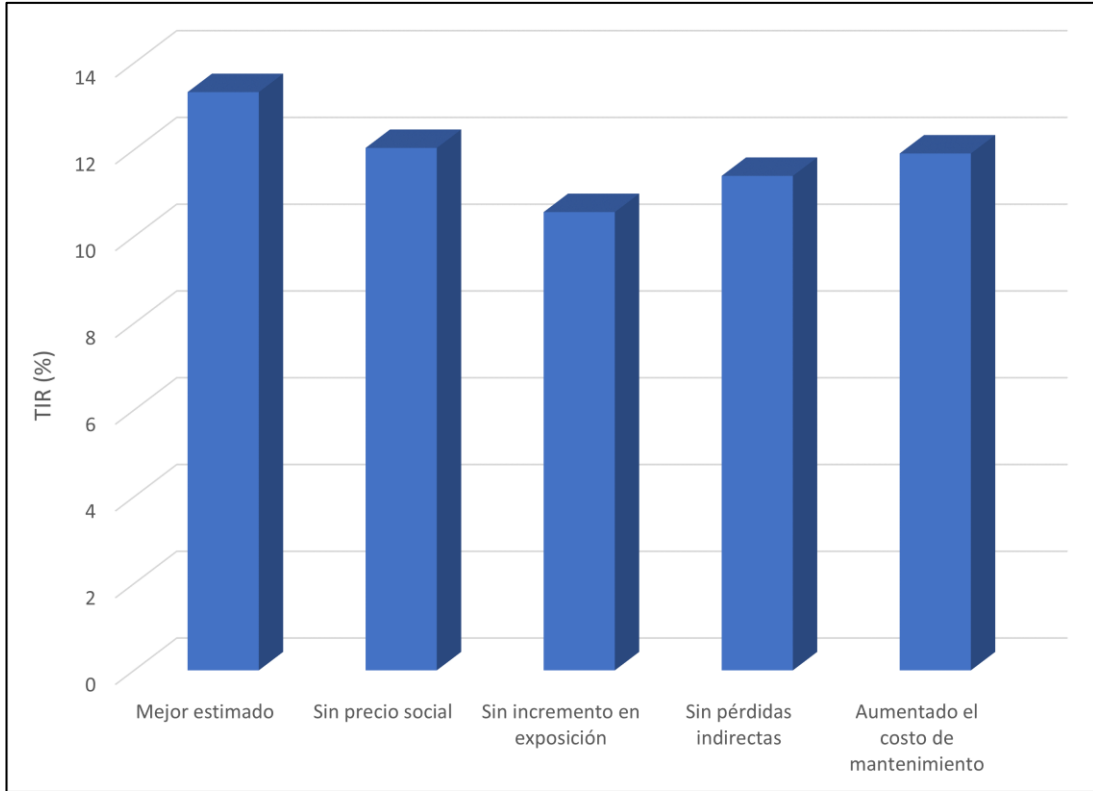


Figura 75. Valores de la Tasa Interna de Retorno para los diferentes escenarios analizados sensibilizando los parámetros del ACB.

Tabla 58. Valores de VAN y TIR obtenidos para diferentes escenarios realizados sensibilizando las principales variables del análisis costo/beneficio. En las columnas se identifican las variaciones en las variables consideradas para la sensibilización.

	Mejor estimado	Sin precio social	Sin incremento en exposición	Sin pérdidas indirectas	Aumentado el costo de mantenimiento
<b>TIR (%)</b>	13.3	12.0	10.6	11.4	11.9
<b>VAN (\$)</b>	2.663.563,03	86.742,65	-2.585.953,64	-1.198.685,31	-174.272,52

## 4 DISCUSIÓN

### 4.1 *Diferencias entre los inventarios de movimientos de ladera*

Aunque todos los inventarios previos recopilados en la zona de estudio y el inventario validado elaborado durante el presente estudio se desarrollaron utilizando metodologías similares, es decir, fotointerpretación de pares estereoscópicos de fotos aéreas, el nivel de coincidencia entre ellos es bajo (Suárez y Domínguez-Cuesta, 2021b). Cabe recordar que, en el caso de inventario validado en esta investigación, se realizó una validación mediante trabajo de campo que estuvo ausente en varios de los inventarios previos. Estos bajos niveles de coincidencia entre distintos inventarios de movimientos de ladera realizados en la misma área son análogos a los obtenidos en una comparación previa entre los inventarios de una porción (16 km<sup>2</sup>) del área de estudio, que encontró que solo el 10% de los movimientos de ladera fueron mapeados de manera similar (Van Westen et al., 2008).

Los valores altos de error de mapeo obtenidos en el presente estudio, tanto en la comparación entre los inventarios previos (> 79% para cualquier comparación entre pares de inventarios), como entre estos y el inventario validado (> 84%) están dentro del rango de otros estudios comparativos entre inventarios de movimientos de ladera, para los que se encontraron niveles de error de 66-81% (Carrara et al., 1992; Galli et al., 2008; Fiorucci et al., 2011; Mondini et al., 2014). En el caso del MDC, al igual que se ha mencionado para otras comparativas previas, el alto error de mapeo entre los inventarios está asociado a diferentes causas: subjetividad para mapear los movimientos de ladera activos, errores de digitalización (Carrara et al., 1992; Galli et al., 2008; Van Westen et al., 2008) y las diferencias en la resolución espacial y espectral de las imágenes utilizadas (Fiorucci et al., 2018).

Considerando que los inventarios de Lotti (1986), JICA (2002) y el nuevo inventario muestran una distribución espacial similar (medida por el IIC y los mapas de densidad), se infiere que una de las principales causas del valor alto del error de mapeo podría estar asociado a la subjetividad para identificar movimientos de ladera activos. Así, algunos de los movimientos de ladera mapeados por los inventarios de Lotti (1986) y JICA (2002) corresponderían a movimientos inactivos, mientras que el nuevo inventario muestra únicamente los movimientos activos. Cabe señalar que el trabajo de campo permitió ajustar la cartografía previamente realizada mediante fotointerpretación y confirmar o descartar la existencia de actividad reciente en los deslizamientos.

Por otro lado, la baja coincidencia entre el nuevo inventario y el inventario de UPI-JICA (2014) se puede atribuir a la falta de verificación de campo en la elaboración de este último, ya que el 69% de las formas de deslizamientos recogidas en este inventario se ubican en áreas caracterizadas por afloramientos rocosos, por tanto, sin suelos de tipo coluvión o residuales, donde la presencia de deslizamientos traslacionales y rotacionales es altamente improbable.

Las causas de las diferencias entre el inventario validado y el de USGS (2002) son de naturaleza diferente. La mayoría de los polígonos del inventario de USGS (2002), particularmente los de menor área (< 1000 m<sup>2</sup>), que representan el 75% del inventario, corresponden a flujos de detritos superficiales (profundidad de 1-2 m) que fueron activados por las lluvias de excepcional intensidad caídas durante el huracán Mitch (Harp et al., 2002a). Los flujos de detritos no forman parte del nuevo inventario y mapa de susceptibilidad elaborado, que se centra en deslizamientos traslacionales y rotacionales. Este enfoque en los deslizamientos se justifica desde la perspectiva de la gestión del riesgo, dado que, como se evidenció durante el huracán Mitch, los deslizamientos (rotacionales y traslacionales) concentraron la mayor parte de las pérdidas humanas y económicas en el área de estudio (Harp et al., 2002a). Por otro lado, el enfoque en un tipo particular de movimientos de ladera contribuye a evitar un error común en el mapeo de susceptibilidad, que es realizar el análisis de diferentes tipos de movimientos de ladera de forma



conjunta, cuando es previsible que cada tipología de movimiento de ladera se asocie a diferentes factores causales (Van Westen et al., 2003).

Es importante mencionar que, en las visitas de campo, no se pudieron identificar flujos de detritos activados recientemente. Esta falta de actividad puede deberse a que dichos procesos se activan únicamente en eventos de precipitación extrema poco frecuentes, como fue la precipitación asociada al huracán Mitch en el MDC, con un periodo de retorno de la lluvia acumulada estimado por el presente estudio de 125 años.

## ***4.2 Importancia de la cobertura de coluviones y suelos residuales***

La cobertura de coluviones y suelos residuales presenta una significativa capacidad para explicar la distribución espacial de los deslizamientos existentes en la zona de estudio, lo que fue evidenciada por el método del peso de la evidencia y la comparación del mapa de susceptibilidad derivado de esta cobertura con mapas previos (Suárez y Domínguez-Cuesta, 2021b). Así, se ha observado que todas las celdas donde existe coincidencia entre 4 o 5 inventarios intersectan la capa de coluvión y suelos residuales (Figura 27).

Este análisis confirma la relevancia de la presencia de coluvión para explicar la ocurrencia de deslizamientos, previamente señalada por diferentes autores (Montgomery y Dietrich, 1994; González de Vallejo et al., 2002; Zêzere et al., 2004; Domínguez-Cuesta et al., 2010). Por tanto, dado que los coluviones fueron cartografiados según criterio experto, mediante trabajo de campo y fotointerpretación, los hallazgos confirman la importancia de los métodos de mapeo directo para llevar a cabo un análisis estadístico de susceptibilidad a deslizamientos, como ya fue indicado previamente por diferentes autores (Van Westen et al., 2003; Corominas et al., 2014; Reichenbach et al., 2018).

Asimismo, el análisis realizado confirmó la baja capacidad explicativa de las variables utilizadas con mayor frecuencia en los estudios de susceptibilidad a movimientos de ladera, es decir: litología, pendiente, distancia a ríos y riachuelos. Esta circunstancia confirma una de las limitaciones identificadas por diversos autores en este tipo de estudios, que es la selección de variables que presentan baja capacidad explicativa de la distribución espacial de los movimientos (Chung y Fabbri, 2003; Van Westen et al., 2003; Corominas et al., 2014; Reichenbach et al., 2018). En todo caso, ello no excluye el hecho de que, la litología, la pendiente o la erosión de los ríos hayan podido jugar un papel destacable en la activación de algunos de los movimientos de ladera en el área de estudio, pero no tienen una capacidad explicativa significativa respecto a los inventarios de movimientos de ladera existentes.

En el caso de la variable pendiente, cabe destacar que, en contra de lo que cabría esperar, las clases que tienen mayor peso están asociadas con pendientes más bajas. Esta condición, que ya había sido puesta de manifiesto en estudios previos que aplicaron esta metodología (Van Westen et al., 2003), está relacionada con el hecho de que muchos de los deslizamientos incluidos en el inventario han estado activos durante un tiempo dilatado, habiéndose desplazado ladera abajo desde su ubicación original hacia zonas de menor pendiente. Por otro lado, el propio proceso de generación de los coluviones, que supone un movimiento lento de las partículas y su acumulación en las partes bajas de las laderas, contribuye a que los deslizamientos generados en este tipo de suelos tengan lugar en pendientes relativamente bajas (Fakundiny, 1970) (ver Tabla 24 y Figura 33Figura 34).

## ***4.3 Limitaciones del modelo del talud infinito***

La aplicabilidad del modelo del talud infinito para explicar la distribución espacial de los deslizamientos con relación a la cobertura de coluviones y suelos residuales se analizó por medio de una serie de estudios piloto en deslizamientos (Suárez y Domínguez-Cuesta, 2021a). La selección de las zonas piloto se llevó a cabo teniendo en cuenta la disponibilidad de información de las propiedades mecánicas de los suelos. Complementariamente, se realizó un

ejercicio de sensibilización de los principales parámetros de la fórmula del talud infinito. A continuación, se discuten los principales resultados de dichos análisis, así como la aplicabilidad del modelo del talud infinito.

### *4.3.1 Muestra de deslizamientos existentes en la zona de estudio*

#### *4.3.1.1 Deslizamiento de la colonia La Ulloa y José Antonio Duarte*

En el deslizamiento sobre coluviones de basaltos y andesitas situado en la zona piloto de las colonias La Ulloa y José Antonio Duarte, el modelo del talud infinito, particularmente la modelación con el programa PISA-m empleando los parámetros promedio obtenidos de los estudios de suelo, clasificó de forma apropiada la mayor parte del deslizamiento (76%). La subestimación del área de deslizamiento se atribuye a que existen secciones del mismo que son activas a pesar de presentar bajas pendientes (menores de 10°). Se infiere que, en el caso del coluvión de basaltos y andesitas, el modelo del talud infinito con los parámetros promedio podría ser apropiado para identificar las zonas potenciales de escarpe de los deslizamientos y parte del cuerpo de dichos deslizamientos, pero podría subestimar las áreas totales de la masa deslizada, en particular las zonas que presentan menores pendientes.

La clasificación por el SHALSTAB de toda el área propensa a deslizamientos como incondicionalmente inestable indica que el coluvión de andesitas y basaltos es inestable, incluso sin alcanzar condiciones de saturación, únicamente teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas y las condiciones de pendientes locales.

#### *4.3.1.2 Deslizamientos de la colonia Nueva Santa Rosa*

Al comparar los resultados obtenidos para la colonia Nueva Santa Rosa con los del deslizamiento de la colonia La Ulloa y José Arturo Duarte se aprecia que existen diferencias significativas entre el valor del IA general obtenido (26% es el valor más alto para la colonia Nueva Santa Rosa, frente a 76% de la colonia La Ulloa, ambos obtenidos con los parámetros geotécnicos promedio). Dichas diferencias se relacionan con los parámetros geotécnicos y la pendiente promedio de cada zona piloto de análisis.

Con relación a los parámetros geotécnicos, la principal diferencia estriba en el ángulo de rozamiento: 11° para el coluvión derivado de los basaltos y andesitas frente a 24° del coluvión derivado del grupo Padre Miguel (Tabla 25). La alta dependencia de los resultados del modelo del talud infinito del ángulo de rozamiento ya había sido identificada en estudios previos (Guimaraes et al., 2003). Otra variable que puede explicar las diferencias en los resultados entre ambas zonas es la pendiente. Mientras que, en el caso de las colonias La Ulloa y José Arturo Duarte, el 47% del área presenta pendientes superiores a 10°, en el caso de la colonia Nueva Santa Rosa, únicamente el 31% del área muestra pendientes superiores a 10°.

Las modelaciones realizadas en estudios anteriores (Suárez y Mora, 2010) en el deslizamiento A de la colonia Nueva Santa Rosa (Figura 43) empleando parámetros geotécnicos similares a los que emplea por defecto el SHALSTAB (cohesión de 3.922 N/m<sup>2</sup> y ángulo de rozamiento de 40°) y aplicando el método de las dovelas aproximado de Janbú y Bishop simplificado con el programa SlopeW, obtuvieron factores de seguridad menores de 1 en condiciones de saturación.

Al comparar estos resultados, obtenidos con el método de las dovelas, con los obtenidos con el modelo del talud infinito se aprecian algunas de las limitaciones de este último. El método de las dovelas estima la resultante para cada dovela y obtiene la resultante final para el deslizamiento en su conjunto, por lo que, aunque algunas dovelas puedan tener una resultante menor por encontrarse en zonas de baja pendiente, al final el análisis en conjunto evidencia la inestabilidad de toda la masa del deslizamiento. Sin embargo, en el modelo del talud infinito se estiman los factores de seguridad en cada píxel, de forma independiente de los píxeles circundantes. Así, en las áreas con pendientes bajas (inferiores a 10°), cuando los suelos

presentan ángulos de rozamiento intermedios (en torno a 20°), el modelo tiende a clasificar las zonas como estables. Esto es particularmente notable en el caso del deslizamiento A de la colonia Nueva Santa Rosa, el cual es un deslizamiento traslacional con una pendiente baja (el 81% del deslizamiento se sitúa sobre pendientes inferiores a 10°). Únicamente el pie del deslizamiento A, que presenta pendientes mayores, es clasificado en las modelaciones realizadas con el PISA como inestable (Figura 47). El método de las dovelas no constituye una alternativa al método del talud infinito, dado que se aplica en secciones transversales sobre deslizamientos individuales y no puede utilizarse de forma simple a escala de cuenca o ciudad. Sin embargo, las diferencias obtenidas con ambos métodos reafirman las limitaciones del método del talud infinito para identificar zonas propensas a deslizamientos en terrenos con pendientes bajas.

Con relación a la reinterpretación del área potencial de inestabilidad empleando criterio experto, se observa que la zona que se identifica como potencialmente inestable en los deslizamientos de la colonia Nueva Santa Rosa no se ha activado como una única masa deslizada, sino que se han producido movimientos puntuales (deslizamientos A y B, Figura 43) probablemente debido a que se han dado condiciones locales de saturación, determinadas por intervenciones antrópicas, que han activado los deslizamientos. Esto se constató en el trabajo de campo realizado en el deslizamiento A, donde la alteración del patrón de drenaje natural, al construir una calle con cunetas que concentraban la escorrentía en el deslizamiento y no estaban conectadas a un sistema de drenaje, contribuyeron a su activación.

#### *4.3.1.3 Deslizamiento de la Colonia La Obrera*

El modelo del talud infinito no explica adecuadamente el movimiento de ladera identificado en la colonia La Obrera, presentando todas las modelaciones realizadas un IA muy bajo, inferior al 10%.

En un estudio anterior (Suárez y Mora, 2010), la modelación realizada con los métodos de las dovelas de Janbú y Bishop simplificado empleando el programa SlopeW y aplicando un ángulo de rozamiento de 13° y una cohesión de 16.671 N/m<sup>2</sup> (propiedades más desfavorables que las propiedades promedio de los estudios de suelo aplicadas en el presente estudio) no se obtuvo ningún círculo de rotura con factor de seguridad menor de 1 (el menor valor obtenido fue de 1.13).

Esta limitada capacidad para explicar el movimiento de ladera existente en la colonia La Obrera, tanto del método de las dovelas como del modelo del talud infinito, puede deberse a que se trata de un movimiento complejo, que combina un deslizamiento traslacional con un flujo de tierra por lo que, un método de análisis basado en el equilibrio límite no logra explicar de forma adecuada el proceso.

Dicho movimiento complejo se habría activado debido a una intervención antrópica (Suárez y Mora, 2010), pues un muro construido para encauzar una quebrada y localizado al pie de la ladera, no contaba con drenajes, lo que provocó la saturación del suelo, alcanzándose su límite plástico y desencadenando el flujo de tierra. Ello se pone de manifiesto por el desplazamiento y rotación de las tumbas en el cementerio que se encuentran en la parte baja del movimiento (Figura 76 b). Tras producirse el flujo en el pie del deslizamiento, en el cuerpo del movimiento se produjo un deslizamiento traslacional, generando un escarpe (Figura 54 y Figura 76 a) que corresponde a la zona que fue clasificada por el modelo del talud infinito como inestable.



Figura 76. Deslizamientos en la colonia La Obrera. A. Escarpe correspondiente a la corona en la cabecera del deslizamiento. B. Desplazamiento de tumbas en el pie del deslizamiento. C. Vista general de la zona deslizada con escombros de las casas destruidas. Fotos propias, septiembre 2010.

#### 4.3.1.4 Deslizamientos del cerro El Berrinche

En el caso de la zona de estudio del cerro El Berrinche el modelo del talud infinito muestra una capacidad explicativa mayor a la de la colonia La Obrera, particularmente en el caso de la modelación realizada con el programa PISA-m para los parámetros promedio (donde se obtiene un IA del 60%). Si se realiza un ajuste basado en la geomorfología y considerando como inestables las zonas clasificadas como de moderada probabilidad por el PISA-m, se puede mejorar sustantivamente el ajuste, aunque al aplicar dicho criterio se podría incurrir en una sobreestimación de la zona potencialmente inestable.

Con relación a la importante activación que tuvo el deslizamiento A del cerro El Berrinche (Figura 55) durante el huracán Mitch, incluyendo la generación de un flujo de tierra, uno de los

factores que pudo contribuir es la existencia de un drenaje de aguas de lluvia situado en la parte superior del deslizamiento. Dicho drenaje concentró el agua de escorrentía procedente de las lluvias excepcionales asociadas al huracán y habría contribuido a la generación del flujo que provocó la desestabilización de toda la ladera (Figura 77).

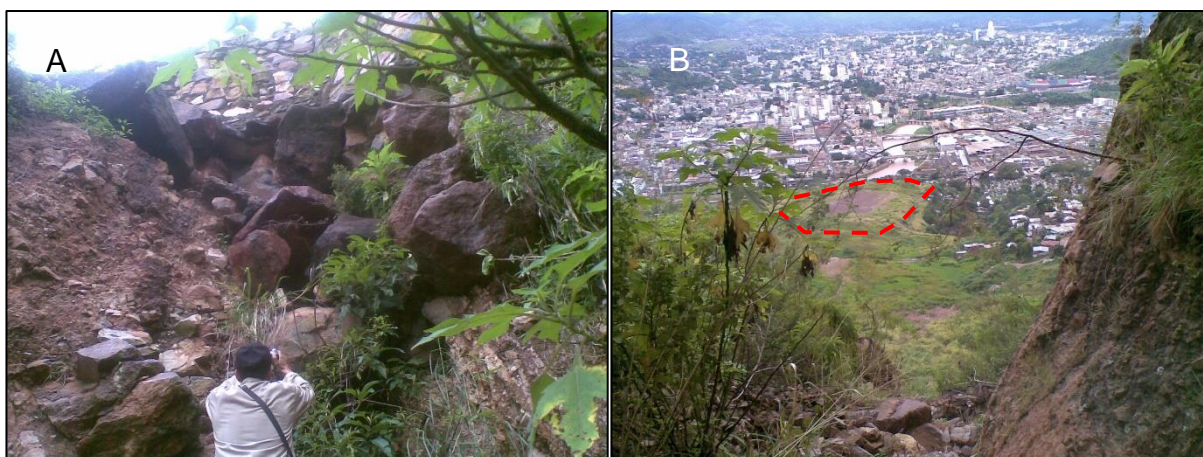


Figura 77. Deslizamiento en el cerro El Berrinche. A. drenaje que descarga sobre la cabecera del deslizamiento A (Figura 55) en el cerro El Berrinche. B. vista desde el drenaje al depósito del flujo de lodo (línea discontinua en rojo). Fotos propias, octubre de 2010.

#### 4.3.1.5 Resultados de los estudios piloto

Los estudios piloto permitieron: (i) comparar entre sí la precisión de las modelaciones realizadas con los programas PISA-m y SHALSTAB, (ii) constatar la alta dependencia del modelo del talud infinito de las variables pendiente y del ángulo de rozamiento interno, (iii) identificar la presencia de movimientos de ladera complejos y verificar la influencia antrópica en algunos de los casos piloto y (iv) comparar la precisión de las modelaciones con dos sets de parámetros de resistencia al corte para cada estudio piloto y modelo aplicado.

#### Comparativa de la precisión de las modelaciones con PISA-m y SHALSTAB

El modelo PISA-m, basado únicamente en la fórmula del talud infinito, presenta un mejor ajuste con los deslizamientos analizados que el modelo SHALSTAB, basado en una versión modificada del modelo del talud infinito y que integra un modelo hidrológico simplificado. Las diferencias entre los resultados obtenidos con ambos modelos son muy significativas. Si se consideran únicamente las diferencias entre los valores de IA obtenidos con los parámetros promedio de los estudios de suelos, en las colonias La Ulloa/José Arturo Duarte, los resultados de PISA-m y SHALSTAB fueron del 76% y 34% respectivamente, en la colonia Nueva Santa Rosa, el modelo SHALSTAB obtuvo valores del 0%, frente a valores del 26% del modelo PISA-m, en la colonia La Obrera el modelo PISA-m arrojó valores de IA del 10%, frente a 0% del SHALSTAB y en el cerro El Berrinche el PISA-m obtuvo un valor del 60%, frente a 9% del SHALSTAB (Figura 78).

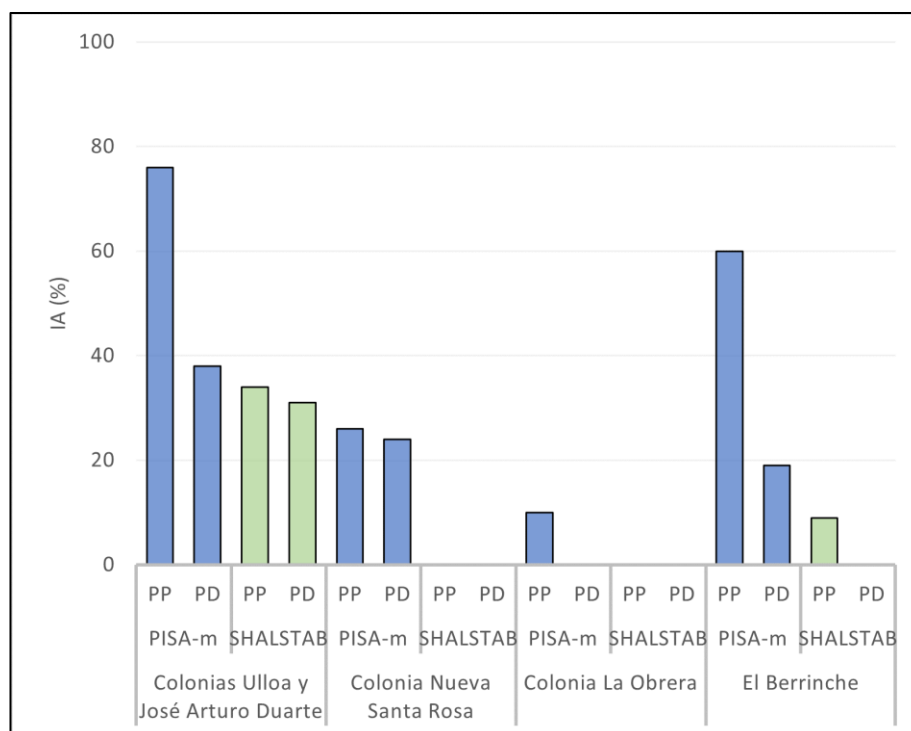


Figura 78. Resultados de IA para las distintas modelaciones realizadas con PISA-m y SHALSTAB en las zonas de estudio piloto con los parámetros promedio de los suelos (PP) y los parámetros por defecto para coluviones (PD).

#### Dependencia de la pendiente

En las colonias La Ulloa/José Arturo Duarte y El Berrinche se aprecia que el modelo tiende a clasificar como estables las zonas de los deslizamientos con pendientes inferiores a  $10^\circ$ . En la Figura 79, se observan las diferencias entre el porcentaje del área con pendientes menores  $10^\circ$  para el Área del Deslizamiento (AD) y para el Área del Deslizamiento Clasificada como Estable (ADCE), esta última corresponde a los resultados obtenidos con el PISA-m aplicando valores promedio de propiedades de los suelos. En el caso de las colonias La Ulloa/José Arturo Duarte la proporción del AD con pendiente menor de  $10^\circ$  es del 51%, mientras que el ADCE con pendiente menor de  $10^\circ$  es del 99%. Para El Berrinche el AD  $< 10^\circ$  representa el 40%, mientras el ADCE  $< 10^\circ$  es del 100%. Este sesgo no es tan evidente en la colonia Nueva Santa Rosa debido, probablemente, a que presenta pendientes menores que las zonas de estudio de las colonias La Ulloa/José Arturo Duarte y El Berrinche.

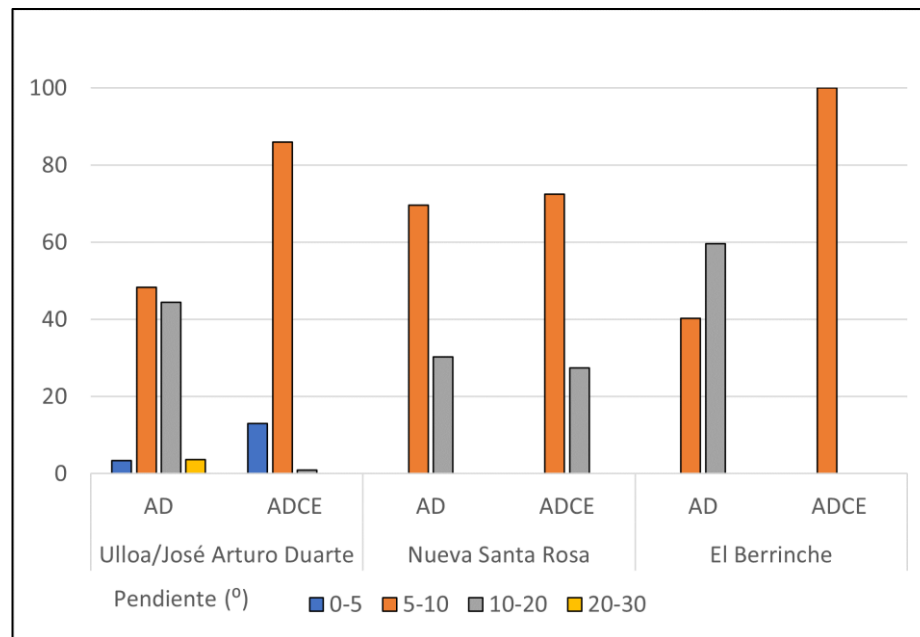


Figura 79. Porcentaje de superficie por rango de pendiente para el Área de Deslizamiento (AD) y el Área del Deslizamiento Clasificada como Estable (ADCE) en tres de las zonas piloto. Los valores del ADCE corresponden a los obtenidos con el PISA-m empleando los valores promedio de los parámetros de los suelos.

Dado que i) los deslizamientos afectan a coluviones y suelos residuales que se caracterizan por presentar pendientes moderadas (37% del área de coluviones y suelos residuales presenta pendientes inferiores a 10°) y que ii) una parte significativa del área de los deslizamientos del inventario se localiza en pendientes bajas (35% del inventario de deslizamientos validado se localiza en pendientes inferiores a 10°), es previsible que el modelo tienda a subestimar las zonas propensas a deslizamientos. Este sesgo puede afectar a las estimaciones del riesgo asociado a los deslizamientos, pues es precisamente en estas zonas con pendientes bajas donde se concentra la población.

#### Dependencia del ángulo de rozamiento interno

Existe una correlación lineal significativa entre los resultados del FS que arroja la fórmula del talud infinito y el ángulo de rozamiento interno. Esta dependencia ya había sido indicada por otros autores (Guimaraes et al., 2003). Para los resultados obtenidos con PISA-m para los dos sets de parámetros de propiedades de los suelos, la correlación lineal entre el ángulo de rozamiento interno y el valor de IA, reflejada por la  $R^2$  de Pearson es de 0,753, mientras que para la cohesión es del 0,58 (Figura 80).

En la zona de estudio, donde como ya se ha indicado los deslizamientos afectan a coluviones con pendientes moderadas depositados en las partes medias y bajas de la ladera, son los materiales con ángulos de rozamiento menores los que muestran mayor propensión a los deslizamientos. En concreto, son los coluviones derivados de las andesitas y basaltos, caracterizados por ángulos de rozamiento muy bajos, los que presentan mayor propensión a los deslizamientos. Coincidentemente las modelaciones realizadas aplicando los parámetros por defecto para coluviones, caracterizados por ángulos de rozamiento mayores y cohesiones muy bajas, arrojan IA más bajos. En los casos de las colonias La Ulloa/José Arturo Duarte, Nueva Santa Rosa y El Berrinche las modelaciones realizadas con el PISA-m con los valores promedio de los estudios geotécnicos arrojaron valores de IA de 50%, 8% y 68% superiores, respectivamente, a los valores obtenidos con las propiedades por defecto para coluviones (Figura 78).

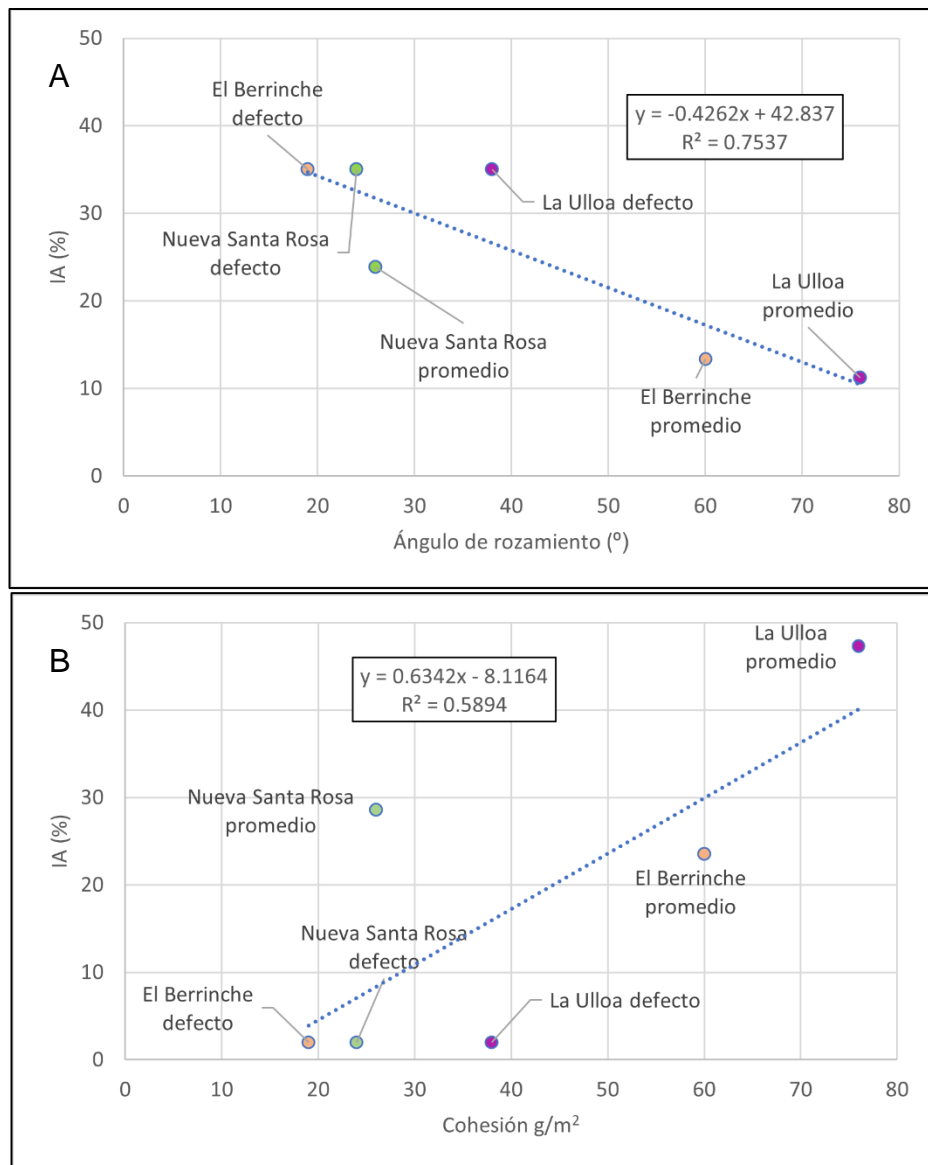


Figura 80. Relación entre los parámetros de resistencia al corte y el IA para los resultados obtenidos con PISA-m de los casos de las colonias La Ulloa/José Arturo Duarte, Nueva Santa Rosa y El Berrinche. Se indican los valores de los parámetros para el promedio de los estudios de suelo (“medio”), así como los valores por defecto para coluviones (“defecto”). Se incluye la ecuación de la recta que correlaciona los puntos y el valor de la R<sup>2</sup>. A. Correlación IA y ángulo de rozamiento interno (grados). B. correlación IA y cohesión (g/m<sup>2</sup>).

Estos resultados contrastan con los de estudios previos, que atribuyen por defecto a los coluviones ángulos de rozamiento promedio y cohesiones bajas, con un comportamiento principalmente friccional (Dietrich y Montgomery, 1998). Se evidencia que, en algunos casos, como en la zona de estudio, los coluviones pueden presentar un comportamiento mecánico controlado por la fracción arcillosa de la matriz, caracterizado por ángulos de rozamiento bajos y cohesiones relativamente altas.

#### Influencia del drenaje pluvial en la activación de los deslizamientos

En los deslizamientos de las colonias La Obrera, Santa Rosa (deslizamiento A) y El Berrinche (deslizamiento A) se identificó la importancia de la influencia antrópica, particularmente se detectaron alteraciones en los patrones naturales de drenaje superficial, lo que contribuyó a activar los movimientos. En el deslizamiento A del cerro El Berrinche y el de la colonia La Obrera se interpreta que esta modificación del drenaje generó en primera instancia un flujo que luego fue seguido por un deslizamiento. Es posible que este tipo de movimientos complejos con intervención antrópica pueda estar en el origen de varios de algunos de los movimientos de



ladera en el MDC. Estas observaciones de campo permiten confirmar la importancia de implementar sistemas de drenaje superficial apropiados, completos y que consideren diseños adaptados para las zonas propensas a movimientos de ladera.

### 4.3.2 Limitaciones para modelar movimientos de ladera en el MDC

Las modelaciones del talud infinito son altamente dependientes de los parámetros geotécnicos que se utilicen, en particular, presentan una fuerte relación lineal con el ángulo de rozamiento interno. Como resultado, en el caso de terrenos con pendientes moderadas, como son los suelos residuales y tipo coluvión analizados, serán los materiales con menores ángulos de rozamiento los que presenten mayor propensión a los deslizamientos. Asimismo, los resultados del modelo del talud infinito tienen una fuerte relación lineal con la pendiente. Al incrementarse la pendiente se incrementa la posibilidad de que el modelo clasifique el terreno como inestable. Debido a este sesgo, el modelo puede subestimar las áreas de potenciales movimientos con baja pendiente cuando forman parte de una masa continua de deslizamiento que presenta distintas pendientes.

La influencia del ángulo de rozamiento en los resultados se relaciona con la propia configuración de la fórmula del talud infinito:

$$FS = \frac{c_r + c_s + [q_t + Y_m D + (Y_{sat} - Y_w - Y_m) H_w D] \cos^2 \beta \tan \emptyset}{[q_t + Y_m D + (Y_{sat} - Y_m) H_w D] \sin \beta \cos \beta}$$

La relación marcada en rojo ( $\cos^2 \beta \tan \emptyset / \sin \beta \cos \beta$ ), donde  $\beta$  es la pendiente y  $\emptyset$  el ángulo de rozamiento, ambos expresados en grados, es determinante para que el resultado de la fórmula tome un valor superior o inferior a 1, pues multiplica la mayor parte de los valores en el numerador y el denominador de la fórmula (a excepción de la cohesión). Dicha relación toma valores  $< 1$  cuando  $\emptyset > \beta$ , valor = 1 cuando  $\emptyset = \beta$  y valores  $> 1$  cuando  $\emptyset < \beta$ . En el [anexo 16](#) se incluye una sensibilización de esta relación que permite visualizar la influencia de los valores de  $\emptyset$  y  $\beta$  en los valores de FS obtenidos.

A pesar de estas limitaciones, se considera que el modelo del talud infinito permite realizar una caracterización adecuada de las zonas propensas a deslizamientos traslacionales y rotacionales en el área de estudio. Principalmente en lo respecta a la identificación de las áreas potenciales de arranque y pie de los movimientos, donde las pendientes son mayores lo que puede ser aplicable para afinar la definición de las zonas propensas a deslizamientos dentro del mapa de distribución del coluvión y suelos residuales.

La combinación del modelo del talud infinito con un análisis basado en criterio experto permitir incorporar las áreas con menores pendientes en las zonas identificadas como de potencial deslizamiento. En términos probabilísticos dicho enfoque plantea generalizar la probabilidad de deslizamiento de la zona de escarpe a toda la zona potencialmente inestable identificada con criterio experto. Esto es coherente desde el punto de vista geométrico y geomorfológico dado que, en caso de activarse el escarpe, se generaría una superficie de rotura que afectaría a una masa de deslizamiento que incluiría zonas con pendientes menores. En resumen, se considera que la interpretación geomorfológica permite subsanar, en alguna medida, las limitaciones del modelo del talud infinito para estimar las probabilidades de que se produzcan deslizamientos en zonas de pendientes menores.

En la práctica, es posible que estas zonas potencialmente inestables delimitadas con criterio experto no se activen como un solo movimiento, sino como deslizamientos puntuales en función de las condiciones de saturación, determinadas en ocasiones por acciones de tipo antrópico, como se pudo constatar en las colonias Nueva Santa Rosa y El Berrinche. Desde el punto de vista de gestión del riesgo, aunque este enfoque puede generar una cierta sobrestimación, se

considera apropiado pues es un enfoque conservador, que contribuye a darles un mismo tratamiento preventivo a zonas que se consideran homogéneas desde el punto de vista de la probabilidad espacial de sufrir movimientos de ladera. En dichas zonas homogéneas se deberían priorizar las medidas para prevenir la activación de los deslizamientos, como gestionar de forma adecuada los drenajes y mantener un monitoreo de cualquier indicio de activación de los deslizamientos.

Las modelaciones evidencian que la variable de altura del nivel freático sobre la superficie de rotura normalizada por el grosor del suelo ( $H_w$ ) no actúa como un factor de disparo de los deslizamientos, aunque contribuye a aumentar la probabilidad de que el  $FS$  sea menor de 1. Se considera éste un hallazgo importante, dado que evidencia que no es posible utilizar la variable  $H_w$  para introducir la probabilidad temporal de disparo del deslizamiento en la fórmula del talud infinito, dado que no se comporta como un factor con un umbral de disparo, sino como un factor que se relaciona de forma lineal con el valor del  $FS$ . Por lo tanto, se decidió utilizar la fórmula del talud infinito únicamente para determinar la probabilidad espacial de los deslizamientos e integrar la probabilidad temporal como un factor independiente.

#### **4.4 Modelo de riesgo de deslizamientos**

En lo referente al análisis de la amenaza, vulnerabilidad y el riesgo, fue preciso desarrollar nuevos abordajes metodológicos, que permitieran, a partir de la información disponible y con una gestión apropiada de la incertidumbre, obtener los resultados, verificar y extraer las conclusiones. La necesidad de desarrollar metodologías adaptadas a la limitada información disponible es característica de los estudios de riesgo asociado a deslizamientos (Zêzere et al., 2004; Bonachea, 2006; Galve et al., 2016; Guillard-Goncalves et al., 2016; Pereira et al., 2017).

Estas limitaciones de información se refieren a diferentes aspectos, como los datos necesarios para analizar la probabilidad espacial, los datos del comportamiento de las variables disparadoras para caracterizar la probabilidad temporal, así como la información de la vulnerabilidad y riesgo de la población e infraestructuras ante estos fenómenos.

##### **4.4.1 Modelo de análisis de la amenaza**

Las metodologías para estimar la probabilidad de la intensidad de los movimientos (1.4.7) son las que abordan de forma más estricta el concepto de amenaza (Ecuación 10). Sin embargo, en el análisis del estado del arte realizado no se identificaron modelos que realicen este análisis a nivel de cuenca o ciudad, sólo para deslizamientos individuales. Por otro lado, los métodos físicos distribuidos probabilistas (1.4.6.4), aunque conceptualmente son robustos, requieren de gran número de datos que permitan caracterizar el comportamiento hidrogeológico de los materiales.

Considerando la información disponible se optó por aplicar un modelo para estimar la probabilidad de la magnitud de los deslizamientos basado en el “análisis de los inventarios de movimientos de ladera” (1.4.6.2). Dicho modelo aborda las limitaciones de las metodologías de análisis de probabilidad espacial (1.4.4) identificadas en el análisis del estado del arte, en particular: (i) la sobre-simplificación de los datos de entrada, (ii) la excesiva generalización de los factores explicativos, (iii) la tendencia a analizar de forma conjunta la susceptibilidad a distintos tipos de movimientos de ladera, (iv) el desconocimiento de las simplificaciones implícitas en los modelos de predicción y (v) la falta de validación de los resultados predictivos. En la Tabla 59 se resume como fueron abordados cada una de estas limitaciones en el presente estudio.

Tabla 59. Limitaciones de los modelos de análisis de la probabilidad espacial de los movimientos de ladera y abordaje en el presente estudio.

Limitación identificada en la literatura	Abordaje en el presente estudio
Sobre simplificación de los datos de entrada.	Se analizó la capacidad de distintas variables para explicar distribución espacial de los deslizamientos traslacionales y rotacionales en la zona de estudio, siendo el mapa de coluviones y suelos residuales la variable analizada que presente más capacidad explicativa.
Excesiva generalización de los factores explicativos.	
Tendencia a analizar de forma conjunta la susceptibilidad a distintos tipos de movimientos de ladera.	El estudio se centró en deslizamientos traslaciones y rotaciones.
Desconocimiento de las simplificaciones implícitas en los modelos de predicción.	Se analizaron las simplificaciones implícitas en el modelo del talud infinito, identificándose que subestima los deslizamientos en zonas de baja pendiente, por lo que se realizaron ajustes a los resultados con criterio experto.
Falta de validación de los resultados predictivos.	Se empleó el método de la curva de éxito para validar la capacidad explicativa del mapa de coluvión y suelos residuales y el Índice de Ajuste para validar la modelación probabilista con el talud infinito.

A diferencia de estudios previos basados en el análisis de inventarios de movimientos de ladera, en los que la probabilidad espacial de los movimientos se obtuvo aplicando métodos estadísticos (Zêzere et al., 2004; Guzzetti et al., 2005, 2006; Jaiswal et al., 2010; Ghosh et al., 2012), en la presente investigación la probabilidad espacial se estimó aplicando un método analítico (el modelo del talud infinito) de forma probabilista. El uso de un método probabilista permitió: (i) gestionar la incertidumbre asociada a los datos de entrada, que es uno de las limitaciones para aplicar métodos analíticos (Guimaraes et al., 2003; Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014) y (ii) obtener valores de probabilidad espacial a nivel de cada pixel, lo que facilita la integración entre la probabilidad espacial y temporal.

#### 4.4.1.1 Limitaciones para establecer la probabilidad temporal

El modelo aplicado para estimar la probabilidad de la magnitud de los deslizamientos se basó en Zêzere et al., 2004 que plantea integrar el análisis de la probabilidad espacial y temporal a nivel de píxel. Este abordaje, al realizar el análisis a nivel de pixel y no requerir estimar la probabilidad del área/volumen de los movimientos, permite evitar que se generen distintos mapas con la probabilidad temporal de las distintas áreas/volumenes posibles de los movimientos de ladera (Guzzetti et al., 2005, 2006; Jaiswal et al., 2010; Ghosh et al., 2012), lo que resulta poco práctico para la toma de decisiones (Guzzetti et al., 2005).

Al emplear la metodología propuesta por Zêzere et al., 2004 para estimar el periodo de retorno de los episodios de deslizamientos a partir de varios indicadores de lluvia antecedente se puso de manifiesto una de las limitaciones de la metodología identificada por el propio autor, que es la asignación del mismo periodo de retorno a eventos con distinto número de deslizamientos. Dicha limitación se resolvió aplicando criterio experto para descartar eventos que no siguen la tendencia general en la relación entre periodo de retorno y número de deslizamientos y asignando al periodo de retorno de 1 año el número de deslizamientos que se repite con mayor frecuencia en la base de datos. En este aspecto, en el apartado 4.6 se recomiendan algunas líneas de investigación para futuros estudios.

Los resultados obtenidos a partir del análisis de la probabilidad temporal de que se produzca el evento disparador de los deslizamientos a nivel de píxel varían de 0,004, para un evento con periodo de retorno de 1 año, hasta 0,109 para un periodo de 125 años. Como era previsible, la

probabilidad temporal, particularmente para eventos frecuentes, es significativamente inferior a la probabilidad espacial. Esta última alcanza valores promedio del 0,37, es decir, 10 veces superiores a los valores de la probabilidad temporal. Por tanto, aunque un terreno tenga propensión a los deslizamientos, caracterizada por su probabilidad espacial, será la presencia del factor de disparo, que corresponde a la probabilidad temporal, la que determinará que se active el movimiento.

Cabe indicar que, aunque el presente estudio plantea un enfoque que permite superar varios de los limitantes identificados previamente para estimar la probabilidad espacial (Tabla 59), persisten limitantes respecto a la estimación de la probabilidad temporal. Al emplear, de igual forma que diversos estudios previos (Zêzere et al., 2004; Guzzetti et al., 2005, 2006; Jaiswal et al., 2010; Ghosh et al., 2012), la probabilidad temporal de que se produzca un deslizamiento a nivel de pixel para estimar la probabilidad del evento disparador se puede estar generando una dependencia entre la probabilidad temporal y espacial (dado que la activación de un deslizamiento es el resultado de ambas probabilidades). Esto puede generar una subestimación de la probabilidad temporal del evento disparador. Esta subestimación podría compensar en cierta medida la sobreestimación de la probabilidad espacial que se genera al considerar que el terreno está totalmente saturado (2.10.1.1).

Esta dependencia entre variables es una de los limitantes identificadas para este tipo de metodologías basadas en el análisis de los inventarios de movimientos de ladera (Guzzetti et al., 2005). Una alternativa para contribuir a esta independencia es contar con la distribución en el tiempo de variables relacionadas con el disparo de los deslizamientos, como la saturación o el nivel freático, distribuciones que no fue posible obtener en el marco del presente estudio. Sobre este aspecto se profundiza en el apartado de 4.6 de consideraciones generales y futuras líneas de investigación.

#### *4.4.2 Relevancia del modelo de análisis del riesgo*

Como se ha puesto de manifiesto en el apartado anterior, una de las mejoras que incorpora el presente trabajo de investigación en los modelos de análisis de la amenaza de movimientos de ladera basados en inventarios, es caracterizar la probabilidad espacial aplicando un modelo analítico basado en la estimación de la probabilidad de que el  $FS < 1$ .

Otro aspecto destacable que caracteriza el planteamiento conceptual del análisis de riesgo es el abordaje de la intensidad de los movimientos de ladera. En los estudios de la amenaza de deslizamientos basados en inventarios se asume que el área de los movimientos es un proxy de la intensidad (Zêzere et al., 2004; Guzzetti et al., 2005; Zêzere et al., 2008; Jaiswal et al., 2010; Ghosh et al., 2012), sin embargo no se ha identificado evidencia empírica que sustente dicha relación entre el área y la intensidad de los deslizamientos. Como han identificado diversos autores la determinación de la intensidad de los deslizamientos es una de las principales limitaciones para estimar el riesgo asociado a estos eventos (Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014; Galve et al., 2016; Pereira et al., 2017).

En el presente estudio se contó con datos empíricos de los daños causados por los deslizamientos traslacionales y rotacionales, obtenidos de encuestas realizadas por la ONG GOAL sobre deslizamientos activos durante un año en el que las lluvias generaron la activación de diversas inestabilidades. Estos datos empíricos son particularmente escasos en este tipo de estudios (Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014; Galve et al., 2016; Pereira et al., 2017).

Los datos de los daños provocados en las viviendas situadas sobre deslizamientos en un periodo de activación de los mismos permiten analizar la respuesta de las infraestructuras como una variable aleatoria, reflejando dos fuentes de incertidumbre (Crozier y Glade, 2005b; Van Westen et al., 2006; Guillard-Goncalves et al., 2016): (i) la asociada con la respuesta de las

infraestructuras y (ii) la asociada a la intensidad del movimiento a la que están sometidas. La incertidumbre sobre la intensidad a la que están expuestas las infraestructuras es particularmente relevante en el caso de deslizamientos lentos, pues esta intensidad dependerá de cómo se comporte el terreno sobre el que se encuentran las viviendas, pudiendo fisurarse de forma superficial o comportarse como un bloque que se desplaza sin presentar apenas deformación.

El planteamiento conceptual del presente proyecto de investigación integra ambas fuentes de incertidumbre en las funciones de vulnerabilidad elaboradas, realizando el análisis de los términos  $M_i$  y  $V_{ij}$  de la Ecuación 30 para la estimación del riesgo asociado a deslizamientos como una única variable aleatoria. Se considera que este enfoque conceptual es uno de los principales aportes del presente proyecto, pues permite abordar, por medio de datos empíricos, algunas de las principales limitaciones para el análisis del riesgo asociado a deslizamientos.

#### 4.4.3 Parametrización de las funciones de vulnerabilidad

Los resultados de las frecuencias relativas para cada estado de daño (Tabla 41) y la media y la desviación típica de la RMD para cada tipo de vivienda (Tabla 42) evidencian que: (i) no todas las viviendas son destruidas cuando se encuentran sobre deslizamientos lentos, variando el promedio del daño entre 0,47 y 0,3, es decir, es inferior al 50% del costo de reposición de la vivienda, (ii) un número relevante de viviendas no presentan daños, en promedio un 33%, (iii) el daño presenta una variabilidad importante (lo que se pone de manifiesto por los valores de la desviación típica cercanos a la media) y (iv) existen diferencias limitadas entre el comportamiento de los distintos tipos de vivienda, siendo las viviendas de bloque las que presentan menor daño.

El comportamiento, particularmente desfavorable de las viviendas precarias de ladrillo ante los deslizamientos lentos, puede deberse a que dichas viviendas se caracterizan por presentar un defecto constructivo como es la carencia de elementos de confinamiento de las paredes, como vigas y columnas (Yamin et al., 2001) (Figura 81), lo que contribuye a la vulnerabilidad estructural de las viviendas.



Figura 81. Ejemplos de viviendas de ladrillo con grietas originadas por movimientos de ladera en las paredes. Se aprecia que las viviendas no cuentan con columnas o vigas. Fotos cortesía de la ONG GOAL, encuesta del año 2010.

#### ***4.4.4 Estimación del riesgo de deslizamientos***

El valor obtenido de la PAE asociada a los deslizamientos fue de 7,26 millones de dólares americanos, con una población expuesta de 164.275 personas. La evaluación de estos valores es compleja, debido que representan valores futuros probables, por lo que no pueden ser validados comparándolos con datos de pérdidas asociados a eventos históricos, datos que por otro lado son muy escasos (Bonachea, 2006).

Una de las formas de validar estos resultados es compararlo con los valores obtenidos de estimaciones de riesgo por deslizamientos realizadas aplicando otros métodos (Bonachea, 2006). Sin embargo este es el único estudio de riesgo de deslizamiento realizado a la fecha en la zona de estudio.

Existen estudios de pérdidas probables realizados para otra amenaza, como es el estudio de riesgo de inundaciones realizado en el marco del estudio de BID (2015). Dado que la estimación del riesgo de inundaciones se basa en metodologías ampliamente difundidas y validadas (Penning-Rowsell et al., 2005; FEMA, 2011b), la comparación entre los valores obtenidos permite tener una referencia para contextualizar los resultados del presente estudio.

Los resultados de dicho estudio de inundaciones proyectados al año 2020, arrojan un valor de PAE de 6,34 millones de dólares, con una población expuesta de 92.531 personas. Se aprecia que el riesgo expresado en términos de PAE es similar para ambas amenazas (siendo un 14.5% mayor para los deslizamientos). El hecho de que la PAE sea superior para los deslizamientos que para inundaciones se podría atribuir a la diferencia en la población expuesta (un 77% superior para los deslizamientos).

Aunque no se puede considerar una validación externa (dadas las dificultades existentes para validar este tipo de resultados), esta comparación permite establecer que la escala de los resultados de la estimación del riesgo por deslizamientos obtenidos es razonable.

#### ***4.5 Eficiencia del sistema de drenaje de agua superficial***

La mejor estimación del costo/beneficio del sistema de drenaje, incluyendo el precio social de la mano de obra, el incremento anual en la exposición y las pérdidas indirectas, arroja una VAN de 2,6 millones de dólares. Si se excluye de la estimación de los beneficios el incremento de la exposición y las pérdidas indirectas o se aumenta el costo de mantenimiento, no se obtiene un valor positivo de la VAN.

La sensibilidad que muestran los resultados ante variables como el mantenimiento podría considerarse que evidencia una eficiencia limitada para la medida de reducción del riesgo de deslizamientos por medio de la construcción de un sistema de drenaje superficial en el MDC. Sin embargo, al valorar estos resultados hay que tomar en consideración que el diseño del sistema de drenaje se realizó asumiendo que debería construirse todo el sistema de drenaje de aguas superficiales. No obstante, muchas calles del MDC cuentan ya con sistemas de drenajes existiendo algunos canales principales de drenaje superficial por lo que, en la práctica, el costo final del sistema de drenaje sería sustantivamente inferior al considerado en el análisis conceptual planteado en el presente estudio. Por otro lado, no se está considerando como parte de los beneficios la reducción de las inundaciones por efecto de los drenajes pluviales.

#### ***4.6 Consideraciones generales y futuras línea de investigación***

Los resultados del presente proyecto de investigación confirman la importancia del mapeo de coluviones y suelos residuales como un insumo fundamental para el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos, ya indicada por diversos autores (Montgomery y Dietrich, 1994; González de Vallejo et al., 2002; Zêzere et al., 2004; Domínguez-Cuesta et al., 2007).

El principal aporte conceptual de este proyecto de investigación consiste en integrar la intensidad de los deslizamientos como parte del análisis de la incertidumbre asociada al daño de las infraestructuras situadas sobre deslizamientos traslacionales y rotacionales activos (2.9.3.3). La intensidad de los deslizamientos es considerada, junto con la respuesta estructural, uno de los factores de incertidumbre que condicionan el daño a las infraestructuras, daño que es analizado como una variable aleatoria a partir de datos empíricos.

Este enfoque permite resolver una de las principales limitaciones para el análisis de riesgo de deslizamientos en áreas extensas, como es la dificultad para la estimación de la intensidad de los deslizamientos de forma probabilística, es decir, para diversos periodos de retorno o probabilidades (Van Westen et al., 2006; Corominas et al., 2014). Para poder implementar el enfoque propuesto se requiere recopilar datos empíricos de daños causados por deslizamientos traslacionales y rotacionales en las infraestructuras consideradas, recopilación que puede ser un reto dado la carencia de este tipo de datos (Guzzetti et al., 2006; Papathoma-Köhle et al., 2011; Galve et al., 2016; Guillard-Goncalves et al., 2016; Pereira et al., 2017). En este contexto, las funciones de daño generadas en la presente investigación a partir de datos empíricos, pueden constituir una referencia importante para estudios que apliquen la metodología propuesta (3.5.4 y [anexo 9](#)).

Respecto al modelo de análisis de la probabilidad espacial, basado en la aplicación del modelo del talud infinito de forma probabilista, éste permite resolver las principales limitaciones identificadas en la literatura al aplicar modelos estadísticos para el análisis de la probabilidad espacial (4.4.1). Sin embargo, se aprecian algunas limitaciones del modelo del talud infinito para explicar los deslizamientos traslacionales y rotacionales presentes en la zona de estudio, particularmente en las zonas con bajas pendientes. Estas limitaciones se abordaron mediante la aplicación de criterio experto para reducir la subestimación de las zonas de deslizamientos (3.4.3).

Por otro lado, los casos piloto de movimientos de ladera analizados evidenciaron la presencia de movimientos complejos, donde se combinan flujos con deslizamientos traslacionales o rotacionales (casos de La Obrera y cerro El Berrinche) (3.4.1). Este tipo de movimientos complejos requeriría la aplicación de modelos que no se basen en el equilibrio límite y que puedan caracterizar lo distintos comportamientos de los suelos como resultado de las condiciones de saturación. El desarrollo y aplicación de modelos que permitan caracterizar estos procesos con datos de entrada limitados sería una futura línea de investigación.

Con base en los resultados del estudio, en las zonas con coluviones y suelos residuales actualmente deshabitadas, se recomienda la restricción y control de la ubicación de nuevas viviendas e infraestructuras. En las áreas habitadas de coluvión y suelos residuales, se recomienda el monitoreo y control de los indicadores de potenciales deslizamientos, así como invertir en drenaje de aguas pluviales para prevenir la ocurrencia o reactivación de deslizamientos. Además, sería muy recomendable concienciar y educar a la población para que sea consciente de que vive en zonas con alta probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.

En este sentido una línea de investigación en el corto plazo sería la sistematización de indicadores de activación de deslizamientos y la revisión de los umbrales de lluvia que generan deslizamientos en la zona de estudio, empleando como insumos los resultados de este estudio, con el fin de poder construir un sistema de alerta eficiente y focalizado. Por otro lado, se prevé realizar un proceso de transferencia de los resultados del estudio a la AMDC.

Con relación a la probabilidad temporal, la aplicación de criterio experto permitió superar las principales limitaciones del método propuesto por Zêzere et al. (2004). Ésta es una de las temáticas que se considera que deberían ser objeto de futuras líneas de investigación. Una de las opciones prometedoras para estimar la probabilidad espacial de deslizamientos podría ser el análisis de mapas de indicadores de humedad del suelo, como el Porcentaje de Agua Útil,

obtenidos mediante datos satelitales y modelos hidrológicos simplificados, combinados con datos de inventarios de deslizamientos, para establecer la relación entre la humedad y la activación de deslizamientos, en la línea de otros trabajos previos (Valenzuela, 2017; Valenzuela et al., 2018; Domínguez-Cuesta et al., 2021).





## 5 CONCLUSIONES

Este trabajo ha permitido incrementar el conocimiento de la distribución espacial y temporal de inestabilidades de ladera en la zona del MDC. A partir de fotointerpretación y trabajo de campo se ha podido desarrollar un nuevo inventario validado de deslizamientos traslacionales y rotacionales activos, con una superficie total de 4.119.267 m<sup>2</sup> y un área promedio por deslizamiento de 147.116 m<sup>2</sup>.

El trabajo de campo ha sido fundamental para identificar los depósitos de coluvión y suelos residuales presentes en el MDC, así como para caracterizar su relación con los deslizamientos. Además, ha permitido contrastar la validez de los inventarios anteriores, pudiéndose verificar un número inferior al 50% de las inestabilidades recogidas en ellos: 44% del inventario de Lotti, 35% de JICA, 7% de USGS y 6% de UPI-JICA. Estas importantes diferencias se atribuyen a factores como: la integración de diferentes tipos de movimientos de ladera, la subjetividad en la identificación de deslizamientos activos y la limitada verificación en campo en los inventarios previos.

La aplicación del método del peso de la evidencia confirmó la limitada relevancia de la litología, pendiente y distancia a arroyos y ríos como factores condicionantes para explicar la presencia de movimientos de ladera en la zona de estudio. Por el contrario, la distribución de coluviones y suelos residuales en el MDC muestra un peso que, al menos, duplica la de cualquier otra variable, lo que confirma su importancia como factor condicionante.

Los deslizamientos traslacionales y rotacionales activos se concentran en áreas específicas del MDC, en concreto, afectando a depósitos superficiales de coluviones y suelos residuales, que cubren el 15% del área de estudio, 39 km<sup>2</sup>. Los mapas de coluviones y suelos residuales indican que estos depósitos se localizan, principalmente, en las laderas de los cerros El Pedregal, Grande y El Picacho. El mapa de susceptibilidad a deslizamientos elaborado a partir de la cobertura de coluviones y suelos residuales, muestra mayor poder para explicar la distribución espacial del inventario validado que los mapas de susceptibilidad a deslizamientos anteriores, con un Área Bajo la Curva de 88,6% en comparación con 79,8% y 69,8% de los anteriores.

Los estudios piloto pusieron de manifiesto que el modelo del talud infinito aplicado sobre algunos deslizamientos clasifica de forma adecuada la cabecera y algunas partes del cuerpo que presentan pendientes mayores, pero tiende a subestimar la probabilidad de que se produzcan deslizamientos, al clasificar como estables las zonas con pendientes inferiores a 10°, que son habituales en coluviones y suelos residuales, así como en el inventario de deslizamientos. Los resultados del modelo del talud infinito muestran como más inestables los coluviones derivados de andesitas y basaltos, caracterizados por ángulos de rozamiento interno menores y cohesiones mayores.

El análisis a nivel de pixel de la probabilidad espacial de los deslizamientos en la cobertura de coluviones y suelos residuales explica de forma adecuada la distribución espacial del inventario de deslizamientos validado, presentando un IA del 92,1%. Tanto el análisis de la probabilidad espacial (realizado aplicando el modelo del talud infinito ajustado con criterio experto), como el mapa de susceptibilidad coinciden en clasificar el coluvión de basaltos, andesitas y riolitas como el que presenta mayor probabilidad espacial de deslizamientos, seguido del suelo residual derivado del grupo Valle de Ángeles, y del coluvión derivado del grupo Padre Miguel.

Para un periodo de retorno de un año la probabilidad de que la precipitación genere las condiciones para la activación de un deslizamiento en un pixel de 100 m<sup>2</sup> situado en la cobertura de coluviones y suelos residuales se estimó en 0,004. La máxima probabilidad de que en un pixel se produzcan las condiciones para la activación de un deslizamiento como resultado de un determinado evento de precipitación, identificada con base a los episodios históricos,

correspondió al huracán Mitch, con una probabilidad de 0,109 y cuyo periodo de retorno se estimó en 125 años.

A partir de los datos empíricos se elaboraron funciones probabilistas de vulnerabilidad que permiten gestionar la incertidumbre asociada a la respuesta ante los deslizamientos para cuatro tipos de vivienda unifamiliar de un piso: (i) de madera, (ii) de ladrillo precaria, (iii) de ladrillo popular y (iv) de bloque. El daño promedio, expresado en términos del porcentaje del valor de reposición de la vivienda, varía entre el 53%, para las viviendas de ladrillo de tipo precario, y el 30%, para viviendas de bloque. En promedio, el 32% de las viviendas que se sitúan sobre deslizamientos activos no presentan daños.

El número de personas y viviendas expuestas a los deslizamientos traslacionales y rotacionales en el MDC en el año 2020 se estimó en 164.275 personas y 37.870 viviendas, lo que supone el 12 y 11,5% de las personas y viviendas del MDC, respectivamente. El valor económico expuesto, considerando únicamente las viviendas, se estimó en 1.255 millones de dólares americanos, un 4,2% del stock de vivienda del MDC proyectado para el año 2020.

Los resultados de este trabajo han permitido incrementar el conocimiento de la distribución espacial y temporal de las pérdidas asociadas a los deslizamientos en la zona del MDC. La combinación de la probabilidad de deslizamientos, la vulnerabilidad de las viviendas y los valores expuestos permitió cuantificar y representar espacialmente las pérdidas económicas probables asociadas a movimientos de ladera en el MDC, para los periodos de retorno de 1, 1,3, 2, 4, 6 y 125 años. La PAE asociada a deslizamientos en el área de estudio se estimó en 7,26 millones de dólares americanos, siendo la pérdida estimada para un evento con periodo de retorno de 125 años de 21,3 millones de dólares americanos.

En el 50% de los estudios piloto se identificó la influencia del deficiente drenaje de aguas superficiales como un factor que contribuyó de forma directa a la activación de los deslizamientos. Para reducir el riesgo ligado a movimientos de ladera en el MDC, se propuso la construcción de un sistema de canales para el drenaje del agua superficial, una medida costo eficiente para reducir su impacto. La mejor estimación del costo/beneficio para esta medida, considerando un periodo de vida útil de 20 años, arrojó una VAN de 2,6 millones de dólares americanos.

Este trabajo ha sentado las bases para reducir el riesgo ligado a movimientos de ladera en el MDC. En concreto, ha puesto de manifiesto la importancia del trabajo experto de reconocimiento geomorfológico en el campo para centrar las acciones de mitigación del riesgo en las áreas cubiertas por depósitos de coluvión y suelos, que representan el 15% del área de estudio. El apropiado diseño, mantenimiento y monitorización de drenajes superficiales situados sobre los terrenos propensos a deslizamientos se plantean como medidas fundamentales para dicha reducción del riesgo.

## 6 REFERENCIAS

- Agliardi, F., Crosta, G. B., & Frattini, P. (2009). Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(4), 1059–1073. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1059-2009>
- Akbas, S., Blahut, J., & Sterlacchini, S. (2009). Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. *Landslide Processes: From Geomorphological Mapping to Dynamic Modelling, January*, 229–233. [http://eost.u-strasbg.fr/omiv/Landslide\\_Processes\\_Conference/Akbas\\_et\\_al.pdf](http://eost.u-strasbg.fr/omiv/Landslide_Processes_Conference/Akbas_et_al.pdf)
- Alexander, D. (2005). Vulnerability to Landslides. In T. Glade, M. Anderson, & M. J. Crozier (Eds.), *Landslide Hazard and Risk* (1st ed., pp. 175–198). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470012659.ch5>
- Algermissen, S. T. (1972). *A study of earthquake losses in the San Francisco Bay Area: Data and analysis*. US Department of Commerce, National Oceanic & Atmospheric Administration. Environmental Research Laboratories.
- AMDC. (2009). *Informe de evaluación de la colonia Guillén*.
- Anagnostopoulos, G. G., Fatichi, S., & Burlando, P. (2015). An advanced process-based distributed model for the investigation of rainfall-induced landslides: The effect of process representation and boundary conditions. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2015WR016909>
- Anderson, M. G., & Holcombe, E. (2013). Design and good practice for slope drainage. In *Community-based landslide risk reduction: managing disasters in small steps* (pp. 213–259). World Bank.
- Anderson, M. G., Holcombe, E., Blake, J. R., Ghesquire, F., Holm-Nielsen, N., & Fisseha, T. (2011). Reducing landslide risk in communities: Evidence from the Eastern Caribbean. *Applied Geography*, 31(2), 590–599. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.11.001>
- Aparicio, F. J. (2009). Probabilidad y estadística en hidrología. In *Fundamentos de hidrología de superficie* (pp. 239–282). Limusa.
- Argeñal, F. (2010). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Honduras*.
- Ayala Carcedo, F. J., Adreu Posse, F. J., Fe Marques, M., Ferrer Gijón, M., De Simón Gil, A., Fernández Llana, I., Olalla Marañón, C., Gómez Puyuelo, J., Sampedro Quijano, J., & Cienfuegos Ruiz-Morote, F. J. (1991). *Manual de ingeniería de taludes* (F. J. Ayala Carcedo & F. J. Adreu Posse (eds.); 2nd ed.). Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE).
- Ayala Carcedo, F. J., & Corominas, J. (2002). *Mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera usando técnicas SIG* (F. J. Ayala Carcedo & J. Corominas (eds.); 1st ed.). Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE).
- Barandiarán, M., Esquivel, M., Lacambra, S., Suárez, G., & Zuloaga, D. (2019). *Metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID: Documento técnico de referencia para equipos a cargo de proyectos del BID*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18235/0002041>
- Barbat, A. H., Moya, F. Y., & Canas, J. A. (1996). Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones. *Earthquake Spectra*, 12(3), 371–394.

<https://doi.org/10.1193/1.1585889>

- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2002). *TRIGRS—A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Open file report 02-424*.
- Bedford, T., & Cooke, R. (2009a). Probabilistic risk analysis. In *Probabilistic risk analysis: Foundations and Methods* (6th ed., pp. 3–13). Cambridge University Press.
- Bedford, T., & Cooke, R. (2009b). What is uncertainty? In *Probabilistic risk analysis: Foundations and Methods* (6th ed., pp. 17–35). Cambridge University Press.
- Beguería, S. (2006). Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37(3), 315–329. <https://doi.org/10.1007/s11069-005-5182-6>
- Bello, O., Ortiz, L., & Samaniego, J. (2014). *La estimación de los efectos de los desastres en América Latina, 1972-2010*.
- BID. (2015). *Tegucigalpa y Comayagüela: capital sostenible, segura y abierta al público*. [https://issuu.com/ciudadesemergentesysostenibles/docs/plan\\_de\\_accion\\_-\\_tegucigalpa](https://issuu.com/ciudadesemergentesysostenibles/docs/plan_de_accion_-_tegucigalpa)
- Bingham, E. C. (1917). *An investigation of the laws of plastic flow* (No. 13).
- Blandón Sandino, D. Y. (2007). *Evaluación de la susceptibilidad a movimientos del terreno en la zona núcleo de la reserva natural Tisey-La Estanzuela, Estelí*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Bonachea, J. (2006). *Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos* [Universidad de Cantabria]. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/1292>
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists*. Pergamon. <https://www.sciencedirect.com/book/9780080418674/geographic-information-systems-for-geoscientists#book-description>
- Brabb E. (1985). Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. *IVth International Conference and Field Workshop in Landslides*, 17–22.
- Briones-Bitar, J., Carrión-Mero, P., Montalván-Burbano, N., & Morante-Carballo, F. (2020). Rockfall research: A bibliometric analysis and future trends. *Geosciences (Switzerland)*, 10(10), 1–25. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100403>
- Budetta, P. (2002). Risk assessment from debris flows in pyroclastic deposits along a motorway, Italy. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10064-002-0161-6>
- Burrough, P. A. (1986). *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford University Press.
- Cadenas del Llano, F. L. (1998). Movimientos en masa. In *Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y control de erosión* (pp. 245–277). TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, Ediciones Mundi-Prensa.
- Cardona, O. D., Ordáz, M. G., Reinoso, E., & Barbat, A. (2011). Enfoque Integral Para La Evaluación Probabilista Del Riesgo ( Capra ): Iniciativa Para Mejorar La Efectividad De La Gestión Del Riesgo De Desastre. *4CNIS Granada 18-20 Mayo 2011, January 2016*, 2–13.
- Cardona, O. D., Ordáz, M. G., Mahul, O., Ghesquiere, F., & Marulanda, M. (2008). *Modelación de pérdidas por terremoto con fines de protección financiera*.

- Cardona, O. D., Ordáz, M. G., Reinoso, E., & Yamin, L. E. (2011). Enfoque integral para la evaluación probabilista del riesgo (CAPRA): iniciativa internacional para la efectividad de la gestión del riesgo de desastre. *Cuarto Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 13.
- Carr, M. J., Feigenson, M. D., Patino, L. C., & Walker, J. A. (2004). Volcanism and geochemistry in central America: Progress and problems. *Geophysical Monograph Series*, 138, 153–174. <https://doi.org/10.1029/138GM09>
- Carrara, A., Cardinali, M., & Guzzetti, F. (1992). Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC Journal*, 1992–2, 172–183.
- Carrión-Mero, P., Aguilar-Aguilar, M., Morante-Carballo, F., Domínguez-Cuesta, M. J., Sánchez-Padilla, C., Sánchez-Zambrano, A., Briones-Bitar, J., Blanco-Torrens, R., Córdova-Rizo, J., & Berrezueta, E. (2021). Surface and underground geomechanical characterization of an area affected by instability phenomena in zaruma mining zone (Ecuador). *Sustainability (Switzerland)*, 13(6), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su13063272>
- Carrión-Mero, P., Briones-Bitar, J., Morante-Carballo, F., Stay-Coello, D., Blanco-Torrens, R., & Berrezueta, E. (2021). Evaluation of slope stability in an urban area as a basis for territorial planning: A case study. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/app11115013>
- Carrión-Mero, P., Montalván-Burbano, N., Morante-Carballo, F., Quesada-Román, A., & Apolo-Masache, B. (2021). Worldwide research trends in landslide science. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18). <https://doi.org/10.3390/ijerph18189445>
- Carson, M., & Kirkby, M. (1972). *Hillslope Form and Process*. Cambridge University Press.
- Chica Olmo, M., & Luque Espinar, J. A. (2002). Interpolación espacial en la creación de cubiertas SIG. In L. Huerta Lain (Ed.), *Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión de los riesgos geológicos y el medio ambiente* (1st ed., pp. 181–197). Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE).
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1988). Hidrologic statistics. In *Applied hydrogeology* (pp. 350–371). McGraw-Hill Book Co.
- Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G. (2012). Systematic Procedures of Landslide Hazard Mapping for Risk Assessment Using Spatial Prediction Models. In *Landslide Hazard and Risk* (pp. 139–177). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470012659.ch4>
- Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451–472. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b>
- Ciurena, R., Schroter, D., & Glade, T. (2013). Conceptual Frameworks of Vulnerability Assessments for Natural Disasters Reduction. In J. Tiefenbacher (Ed.), *Approaches to Disaster Management - Examining the Implications of Hazards, Emergencies and Disasters* (p. 424). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/55538>
- Coe, J. A., Michael, J. A., Crovelli, R. A., Savage, W. Z., Laprade, W. T., & Nashem, W. D. (2004). Probabilistic assessment of precipitation-triggered landslides using historical records of landslide occurrence, Seattle, Washington. *Environmental and Engineering Geoscience*, 10(2), 103–122. <https://doi.org/10.2113/10.2.103>
- Conte, E., & Troncone, A. (2011). Analytical Method for Predicting the Mobility of Slow-Moving Landslides owing to Groundwater Fluctuations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(8), 777–784.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000486](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000486)

- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitolakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Corominas, J., Copons, R., Moya, J., Vilaplana, J. M., Altimir, J., & Amigó, J. (2005). Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. *Landslides*, 2(4), 343–357. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0022-z>
- Corporación Observatorio Sismológico del Suroccidente. (n.d.). *DesInventar Database*. Retrieved April 26, 2016, from <https://online.desinventar.org/>
- COSUDE-INETER. (2005). *Inestabilidad de Laderas, Mapas de Amenazas, Recomendaciones técnicas para su elaboración*.
- Crosta, G. B., & Frattini, P. (2003). Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(1/2), 81–93. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-81-2003>
- Crozier, M., & Glade, T. (2005a). Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach. In T. Glade, M. Anderson, & M. Crozier (Eds.), *Landslide Hazard and Risk* (1st ed., pp. 1–40). Wiley.
- Crozier, M., & Glade, T. (2005b). The Nature of Landslide Hazard Impact. In T. Glade, M. Anderson, & M. Crozier (Eds.), *Landslide Hazard and Risk* (1st ed., pp. 43–74). Wiley.
- Degraff, J. V., & Romesburg, H. C. (1980). Regional landslide-susceptibility assessment for wildland management: a matrix approach. In D. R. C. & J. Vitek (Ed.), *Thresholds in geomorphology* (pp. 401–414). Allen and Unwin.
- DeRose, R. C. (1996). Relationships between slope morphology, regolith depth, and the incidence of shallow landslides in eastern Taranaki hill country. *Zeitschrift Fur Geomorphologie, Supplementband*, 49–60.
- Dietrich, W. E., & Montgomery, D. R. (1998). SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. *National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement Technical Report, February 1998*.
- Dietrich, W. E., Asua, R. R. de, Orr, J. C. B., & Trso, M. (1998). *A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in forested lands of Northern California* (Issue June 1998). <https://doi.org/10.1029/WS002p0195>
- Domínguez-Cuesta, M. J., Jiménez-Sánchez, M., & Berrezueta, E. (2007). Landslides in the Central Coalfield (Cantabrian Mountains, NW Spain): Geomorphological features, conditioning factors and methodological implications in susceptibility assessment. *Geomorphology*, 89(3–4), 358–369. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.01.004>
- Domínguez-Cuesta, M. J., Jiménez-Sánchez, M., Colubi, A., & González-Rodríguez, G. (2010). Modelling shallow landslide susceptibility: A new approach in logistic regression by using favourability assessment. *International Journal of Earth Sciences*, 99(3), 661–674. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0414-0>
- Domínguez-Cuesta, M. J., Jiménez Sánchez, M., & Rodríguez García, A. (1999). Press archives as temporal records of landslides in the North of Spain: Relationships between rainfall and instability slope events. *Geomorphology*, 30(1–2), 125–132. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00049-5)

- Domínguez-Cuesta, M. J., Quintana, L., Valenzuela, P., Cuervas-Mons, J., Alonso, J. L., & Cortés, S. G. (2021). Evolution of a human-induced mass movement under the influence of rainfall and soil moisture: The Porciles landslide case study (NW Spain). *Landslides*, 18(11), 3685–3693. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01731-4>
- Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. (2009). *Terminología: Términos principales relativos a la reducción del riesgo de desastres*. <https://www.eird.org/esp/terminologia-esp.htm>
- Eugster, S. (2002). *Statistical landslide hazard analysis in Tegucigalpa, Honduras*. University of Bern.
- Fakundiny, R. H. (1970). *Geology of the El Rosario quadrangle, Honduras, Central America* [Universidad de Texas]. <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/11861>
- Faticchi, S., Vivoni, E. R., Ogden, F. L., Ivanov, V. Y., Mirus, B., Gochis, D., Downer, C. W., Camporese, M., Davison, J. H., Ebel, B., Jones, N., Kim, J., Mascaro, G., Niswonger, R., Restrepo, P., Rigon, R., Shen, C., Sulis, M., & Tarboton, D. (2016). An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology. *Journal of Hydrology*, 537(March), 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.026>
- FEMA. (2011a). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model. HAZUS®MH-2.1. Technical Manual*.
- FEMA. (2011b). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Flood Model. HAZUS®MH-2.1. Technical Manual*.
- Fiorucci, F., Cardinali, M., Carlà, R., Rossi, M., Mondini, A. C., Santurri, L., Ardizzone, F., & Guzzetti, F. (2011). Seasonal landslide mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images. *Geomorphology*, 129(1–2), 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.01.013>
- Fiorucci, Federica, Giordan, D., Santangelo, M., Dutto, F., Rossi, M., & Guzzetti, F. (2018). Criteria for the optimal selection of remote sensing optical images to map event landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), 405–417. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-405-2018>
- Forbes, C., Evans, M., Hastings, N., & Peacock, B. (2011). Beta Distribution. In *Statistical Distributions* (4th ed., pp. 55–62). John Wiley & Sons Ltd.
- Fotopoulou, S. D., & Pitilakis, K. D. (2013). Vulnerability assessment of reinforced concrete buildings subjected to seismically triggered slow-moving earth slides. *Landslides*, 10(5), 563–582. <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0345-5>
- Fuchs, S., Heiss, K., & Hübl, J. (2007). Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(5), 495–506. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-495-2007>
- Fuchs, S., Birkmann, J., & Glade, T. (2012). Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: Current approaches and future challenges. *Natural Hazards*, 64(3), 1969–1975. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0352-9>
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2008). Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology*, 94(3–4), 268–289. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.023>
- Galli, M., & Guzzetti, F. (2007). Landslide vulnerability criteria: A case study from Umbria, central Italy. *Environmental Management*, 40(4), 649–664. <https://doi.org/10.1007/s00267-006-0325-4>



- Galve, J. P., Cevalco, A., Brandolini, P., Piacentini, D., Azañón, J. M., Notti, D., & Soldati, M. (2016). Cost-based analysis of mitigation measures for shallow-landslide risk reduction strategies. *Engineering Geology*, *213*, 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.09.002>
- García-Urquía, E. (2016). Establishing rainfall frequency contour lines as thresholds for rainfall-induced landslides in Tegucigalpa, Honduras, 1980–2005. *Natural Hazards*, *82*(3), 2107–2132. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2297-x>
- García-Urquía, E., & Axelsson, K. (2015). Rainfall thresholds for the occurrence of urban landslides in Tegucigalpa, Honduras: An application of the critical rainfall intensity. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*. <https://doi.org/10.1111/geoa.12092>
- García-Urquía, E., & Yamagishi, H. (2017). Landslide Susceptibility Mapping Based on Aerial Photograph Interpretation Inventory for Tegucigalpa, Honduras: An Application of the Matrix Method. In *GIS Landslide* (pp. 163–181). Springer Japan.
- Garza, R. S. M., van Hinsbergen, D. J. J., Rogers, R. D., Ganerød, M., & Dekkers, M. J. (2012). The Padre Miguel Ignimbrite Suite, central Honduras: Paleomagnetism, geochronology, and tectonic implications. *Tectonophysics*, *574–575*, 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.013>
- GEOCONSULT. (2010). *Anexo reporte de perforaciones colonia Guillen*.
- GEOCONSULT. (2018). *Informe Final del Proyecto Suministro e Instalación de Instrumentos y Equipo para el Monitoreo de 6 Bloques de Deslizamiento Priorizados en Tegucigalpa*.
- Ghosh, S., Van Westen, C. J., Carranza, E. J. M., Jetten, V. G., Cardinali, M., Rossi, M., & Guzzetti, F. (2012). Generating event-based landslide maps in a data-scarce Himalayan environment for estimating temporal and magnitude probabilities. *Engineering Geology*, *128*(February), 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.016>
- Glade, T., & Crozier, M. (2005). A Review of Scale Dependency in Landslide Hazard and Risk Analysis. In T. Glade, M. Anderson, & M. Crozier (Eds.), *Landslide Hazard and Risk* (p. 801). John Wiley & Sons Ltd.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Mecánica de suelo. In *Ingeniería Geológica* (pp. 17–117). Pearson Education.
- Gorum, T., Fan, X., Van Westen, C. J., Huang, R. Q., Xu, Q., Tang, C., & Wang, G. (2011). Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. *Geomorphology*, *133*(3–4), 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.12.030>
- Grayson, R. B., Blöschl, G., Western, A. W., & McMahon, T. A. (2002). Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response. *Advances in Water Resources*, *25*(8–12), 1313–1334. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00060-X](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00060-X)
- Grossi, P., Kunreuther, H., & Windeler, D. (2005). An introduction to catastrophe models and insurance. In *Catastrophe modeling: A new approach to managing risk* (pp. 23–42). Springer US.
- Grossi, P., & Windeler, D. (2005). Sources, nature, and impact of uncertainties on catastrophe modeling. In *Catastrophe Modeling: A New Approach to Managing Risk* (pp. 69–91).
- Guillard-Goncalves, C., Zêzere, J. L., Pereira, S., & Garcia, R. A. C. (2016). Assessment of physical vulnerability of buildings and analysis of landslide risk at the municipal scale: Application to the Loures municipality, Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *16*(2), 311–331. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-311-2016>

- Guimaraes, R. F., Montgomery, D. R., Greenberg, H. M., Fernandes, N. F., Gomes, R. A. T., & de Carvalho Junior, O. A. (2003). Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: Application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology*, 69(1–2), 99–108. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00263-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00263-6)
- Gulliver, A., Francescutti, D., & Medeiros, K. (2005). *RuralInvest. Un enfoque participativo para la identificación y preparación de inversiones rurales a pequeña escala. Modulo 2. Formulación y empleo de perfiles de proyecto.* <http://www.fao.org/3/a0322s/a0322s00.htm#Contents>
- Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., & Cardinali, M. (2006). Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, central Italy. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6(1), 115–131. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-115-2006>
- Guzzetti, F., Malamud, B. D., Turcotte, D. L., & Reichenbach, P. (2002). Power-law correlations of landslide areas in central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 195(3–4), 169–183. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00589-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00589-1)
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1–2), 42–66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1–4), 272–299. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>
- Hammond, C. (1992). *Level I stability analysis (LISA) documentation for version 2.0.* [https://books.google.com/sv/books?hl=es&lr=&id=1\\_H3JErGbUAC&oi=fnd&pg=PA2&dq=+Hammond,+C.,+Hall,+D.,+Miller,+S.,+%26+Swetik,+P.+\(1992\).+Level+I+stability+analysis+\(LISA\)+documentation+for+version+2.0.+General+technical+report+INT%3B+285.&ots=ZL0h09gq5N&si](https://books.google.com/sv/books?hl=es&lr=&id=1_H3JErGbUAC&oi=fnd&pg=PA2&dq=+Hammond,+C.,+Hall,+D.,+Miller,+S.,+%26+Swetik,+P.+(1992).+Level+I+stability+analysis+(LISA)+documentation+for+version+2.0.+General+technical+report+INT%3B+285.&ots=ZL0h09gq5N&si)
- Haneberg, W. C. (2004). A rational probabilistic method for spatially distributed landslide hazard assessment. *Environmental and Engineering Geoscience*, 10(1), 27–43. <https://doi.org/10.2113/10.1.27>
- Haneberg, W. C. (2007). *PISA-m, Map-Based Probabilistic Infinite Slope Analysis, Version 1.0.1 User Manual* (Issue March).
- Harp, E., Castaneda, M., & Held, M. D. (2002a). *Landslides Triggered by Hurricane Mitch in Tegucigalpa, Honduras.*
- Harp, E., Held, M. D., Castañeda, M. R., Mckenna, J. P., & Jibson, R. W. (2002b). *Landslide Hazard Map of Tegucigalpa, Honduras.*
- Hernández-Muñoz, A. (1998). Proyecto y ejecución de conducciones. In *Abastecimiento y distribución de agua* (3rd ed., pp. 339–505). Paraninfo.
- Hidalgo, C., & Pacheco, A. (2011). Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: Aplicación Tools for reliability analysis in geotechnical engineering: Application. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18), 79–86.
- Highland, L. (2004). *Landslide types and processes.* <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>
- Holcombe, E., Smith, S., Anderson, M. G., & Wright, E. (2011). *An integrated approach for evaluating the effectiveness of landslide risk reduction in unplanned communities in the Caribbean* (11/270). <http://www.bristol.ac.uk/media-library/sites/cmpo/migrated/documents/wp270.pdf>

- Horn, B. K. P. (1981). Hill Shading and the Reflectance Map. *Proceedings of the IEEE*.  
<https://doi.org/10.1109/PROC.1981.11918>
- Hürlimann, M., Copons, R., & Altimir, J. (2006). Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach. *Geomorphology*, 78(3–4), 359–372.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.02.003>
- ICF. (2018). *Mapa de cobertura forestal de Honduras*.  
<http://www.geoportal.icf.gob.hn/geoportal/main>
- INE. (2001). *Mapa del censo 2001 de Honduras*. Instituto Nacional de Estadística (INE).
- INGEO. (2010). *Resultados corte directo colonia Obrera*.
- INTEMA. (2002). *Manual de referencias hidrológicas para obras de drenaje menor*.
- Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., & Chacón, J. (2007). Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: Examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Natural Hazards*, 41(1), 61–79.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-006-9027-8>
- Irigaray, C., & Chacón, J. (2002). Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante SIG. In F. J. Ayala Carcedo & J. Corominas (Eds.), *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con la técnica SIG. Fundamentos y aplicaciones en España* (1st ed., pp. 21–36). Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE).
- Jaiswal, K., Bausch, D., Rozelle, J., Holub, J., & McGowan, S. (2008). *Hazus® estimated annualized earthquake losses for the United States*.
- Jaiswal, P., Van Westen, C. J., & Jetten, V. (2010). Quantitative landslide hazard assessment along a transportation corridor in southern India. *Engineering Geology*, 116(3–4), 236–250. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.09.005>
- JICA. (2002a). *El estudio sobre el control de inundaciones y prevención de deslizamientos de tierra en el área metropolitana de Tegucigalpa de la república de Honduras*.  
[https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11688462\\_01.pdf](https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11688462_01.pdf)
- JICA. (2002b). *Informe de Apoyo-A Estudio Geológico Informe de apoyo-A*.  
[https://openjicareport.jica.go.jp/617/617/617\\_613\\_11688488.html](https://openjicareport.jica.go.jp/617/617/617_613_11688488.html)
- Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On The Quantitative Definition of Risk. *Risk Analysis*.  
<https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x>
- Kennedy, R. P., & Ravindra, M. K. (1984). Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies. *Nuclear Engineering and Design*, 79(1), 47–68.
- Khan, Y. A., Lateh, H., Baten, M. A., & Kamil, A. A. (2012). Critical antecedent rainfall conditions for shallow landslides in Chittagong City of Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, 67(1), 97–106. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1483-0>
- Künzler, M., Huggel, C., & Ramírez, J. M. (2012). A risk analysis for floods and lahars: Case study in the Cordillera Central of Colombia. *Natural Hazards*, 64(1), 767–796.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-012-0271-9>
- Lari, S., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2014). A probabilistic approach for landslide hazard analysis. *Engineering Geology*, 182(PA), 3–14.  
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.015>
- Lauknes, T. R., Piyush Shanker, A., Dehls, J. F., Zebker, H. A., Henderson, I. H. C., & Larsen, Y. (2010). Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline

- and persistent scatterer interferometric SAR time series methods. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.015>
- Lee, S., Choi, J., & Min, K. (2002). Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environmental Geology*. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0616-x>
- León-Castillo, J., & García-Salas, C. (2019). *Consultoría para el Cálculo del Precio Social de la Mano de Obra en Perú*.
- Llosa, S., & Zodrow, I. (2011). *Disaster risk reduction legislation as a basis for effective adaptation*. [https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/bgdocs/Llosa\\_&\\_Zodrow\\_2011.pdf](https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/bgdocs/Llosa_&_Zodrow_2011.pdf)
- Lo, W. C., Tsao, T. C., & Hsu, C. H. (2012). Building vulnerability to debris flows in Taiwan: A preliminary study. *Natural Hazards*, 64(3), 2107–2128. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0124-6>
- Lotti. (1986). *Mapa geológico del Proyecto de Aguas Subterráneas y Cerro El Chile en Tegucigalpa*.
- Mahdyiar, M., & Porter, B. (2005). The Risk Assessment Process: The Role of Catastrophe Modeling in Dealing with Natural Hazards. In P. Grossi & H. Kunreuther (Eds.), *Catastrophe modeling: a new approach to managing risk* (p. 241). Springer Science + Business Media, Inc.
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687–711. <https://doi.org/10.1002/esp.1064>
- Malhotra, N. (2010). Sampling: Final and Initial Sample Size Determination. In *Marketing Research: An Applied Orientation* (6th ed., pp. 336–370). Pearson Education.
- Mann, P., Rogers, R. D., & Gahagan, L. (2007). Overview of plate tectonic history and its unresolved tectonic problems. In J. Bundschuh & G. Alvarado (Eds.), *Central America: geology, resources and hazards* (1st ed., pp. 201–237). Taylor & Francis. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780203947043>
- Mansour, M. F., Morgenstern, N. R., & Martin, C. D. (2011). Expected damage from displacement of slow-moving slides. *Landslides*, 8(1), 117–131. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0227-7>
- Marjanović, M., Kovačević, M., Bajat, B., & Voženílek, V. (2011). Landslide susceptibility assessment using SVM machine learning algorithm. *Engineering Geology*, 123(3), 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.09.006>
- Martínez, W. (2010). *Informe preliminar. Deslizamiento colonia Guillen, Tegucigalpa*.
- Martínez, W. (2011a). *Evaluación geológica cinco colonias ladera ese extinto volcán el Pedregal, sector oeste Distrito Central*.
- Martínez, W. (2011b). *Geodinámica y Desastres, área el distrito central de Honduras, CA*.
- Mavrouli, O., Fotopoulou, S., Pitilakis, K., Zuccaro, G., Corominas, J., Santo, A., Cacace, F., De Gregorio, D., Di Crescenzo, G., Foerster, E., & Ulrich, T. (2014). Vulnerability assessment for reinforced concrete buildings exposed to landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 265–289. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0573-0>
- Mavrouli, O., & Corominas, J. (2010a). Rockfall vulnerability assessment for reinforced

- concrete buildings. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(10), 2055–2066. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2055-2010>
- Mavrouli, O., & Corominas, J. (2010b). Vulnerability of simple reinforced concrete buildings to damage by rockfalls. *Landslides*, 7(2), 169–180. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0200-5>
- Mechler, R. (2005). *Cost-benefit Analysis of Natural Disaster Risk Management in Developing Countries*. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.475.2075&rep=rep1&type=pdf>
- Mechler, R. (2016). Reviewing estimates of the economic efficiency of disaster risk management: opportunities and limitations of using risk-based cost–benefit analysis. *Natural Hazards*, 81(3), 2121–2147. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2170-y>
- MEF. (2019). *Guía General para la Identificación, Formulación y Evaluación de Proyectos de Inversión*.
- Merz, B., Kreibich, H., Thielen, A., & Schmidtke, R. (2004). Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(1), 153–163. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-153-2004>
- Michel-Kerjan, E., Hochrainer-Stigler, S., Kunreuther, H., Linnerooth-Bayer, J., Mechler, R., Muir-Wood, R., Ranger, N., Vaziri, P., & Young, M. (2013). Catastrophe risk models for evaluating disaster risk reduction investments in developing countries. *Risk Analysis*, 33(6), 984–999. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01928.x>
- Miller, S. M. (1988). A temporal model for landslide risk based on historical precipitation. *Mathematical Geology*, 20(5), 529–542. <https://doi.org/10.1007/BF00890335>
- Moench, M., Mechler, R., & Stapleton, S. (2007). Guidance note on the cost and benefits of disaster risk reduction. *Global Platform for Disaster Risk Reduction*, 29. [https://www.unisdr.org/files/1084\\_Infonote3HLdialogueCostsandBenefits.pdf](https://www.unisdr.org/files/1084_Infonote3HLdialogueCostsandBenefits.pdf)
- Moncada, R., & Yamagishi, H. (2016). Educational Methodologies Implemented in Latin America for Landslide Inventory and Analysis Landslide Inventory and Analysis. *Second Central American and Caribbean Landslide Congress*, 147–152.
- Mondini, A. C., Viero, A., Cavalli, M., Marchi, L., Herrera, G., & Guzzetti, F. (2014). Comparison of event landslide inventories: the Pogliaschina catchment test case, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2(2), 1093–1125. <https://doi.org/10.5194/nhessd-2-1093-2014>
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/93WR02979>
- Mora, R. (2006). *Análisis probabilístico de estabilidad de laderas, subcuenca del río Jucó, Paraíso, Cartago, Costa Rica* (Issue July 2006). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33986.32967>
- Morante, F., Aguilar, M., Ramírez, G., Blanco, R., Carrión, P., Briones, J., & Berrezueta, E. (2019). Evaluation of slope stability considering the preservation of the general patrimonial cemetery of guayaquil, Ecuador. *Geosciences (Switzerland)*, 9(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030103>
- Multihazard Mitigation Council. (2005). *Natural hazard mitigation saves: An independent study to assess the future savings from mitigation activities. Volume 2 - study documentation*.

[https://cdn.ymaws.com/www.nibs.org/resource/resmgr/MMC/hms\\_vol1.pdf](https://cdn.ymaws.com/www.nibs.org/resource/resmgr/MMC/hms_vol1.pdf)

- National Institute of Building Sciences. (1993). *Assessment of the State-of-the-Art Earthquake Loss Estimation Methodologies*.
- National Research Council. (1989). *Estimating losses from future earthquakes*.
- Negulescu, C., & Foerster, E. (2010). Parametric studies and quantitative assessment of the vulnerability of a RC frame building exposed to differential settlements. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(9), 1781–1792. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1781-2010>
- O’Loughlin, E. M. (1986). Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/WR022i005p00794>
- Papathoma-Köhle, M., Kappes, M., Keiler, M., & Glade, T. (2011). Physical vulnerability assessment for alpine hazards: State of the art and future needs. In *Natural Hazards* (Vol. 58, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9632-4>
- Pearce, D. W. (University C. (1983). *Cost-benefit analysis* (2nd ed.). The Macmillan press LTD.
- Penížek, V., & Borůvka, L. (2006). Soil depth prediction supported by primary terrain attributes: A comparison of methods. *Plant, Soil and Environment*, 52(9), 424–430. <https://doi.org/10.17221/3461-pse>
- Penning-Rowsell, E., Johnson, C., Tunstall, S., Tapsell, S., Morris, J., Chatterton, J., & Green, C. (2005). *The Benefits of Flood and Coastal Risk Management: A Handbook of Assessment Techniques*. Middlesex University Press.
- Pereira, S., Garcia, R. A. C., Zêzere, J. L., Oliveira, S. C., & Silva, M. (2017). Landslide quantitative risk analysis of buildings at the municipal scale based on a rainfall triggering scenario. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 624–648. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1250116>
- Peres, D. J., & Cancelliere, A. (2014). Derivation and evaluation of landslide-triggering thresholds by a Monte Carlo approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 4913–4931. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4913-2014>
- Raia, S., Alvioli, M., Rossi, M., Baum, R. L., Godt, J. W., & Guzzetti, F. (2013). Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: a probabilistic approach. *Geoscientific Model Development Discussions*, 6(1), 1367–1426. <https://doi.org/10.5194/gmdd-6-1367-2013>
- Reclamation, & USACE. (2019). Event Trees. In *Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis* (pp. 5–20). Reclamation/USACE. <https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/methodology.html>
- Reginato, G. M. P., Maccarini, M., Kobiyama, M., Higashi, R. A. R., Grando, Â., Corseuil, C. W., & Caraméz, M. L. (2012). Shalstab Application to Identify the Susceptible Areas of Shallow Landslides in Cunha River Watershed, Rio dos Cedros City, SC, Brazil. In: *4 Th International Conference on Geographical Object-Based Image Analysis, GEOBIA, Rio de Janeiro, 2009*, 108–113.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180(March), 60–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- Remondo, J., González-Díez, A., Díaz de Terán, J. R., & Cendrero, A. (2003). Landslide

- susceptibility models utilising spatial data analysis techniques. A case study from the lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain). *Natural Hazards*.  
<https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007202.12543.3a>
- Rodríguez, M. (2010a). *Informe sobre Estudio Sísmico realizado en La Colonia Obrera*.
- Rodríguez, M. (2010b). *Informe sobre Estudio Sísmico realizado en las Colonias El Dorado y Guillen*.
- Rogers, R. D. (2003). *Jurassic-Recent tectonic and stratigraphic history of the Chortis block of Honduras and Nicaragua (northern Central America)*. The University of Texas at Austin.
- Rogers, R. D., Kárason, H., & van der Hilst, R. D. (2002). Epeirogenic uplift above a detached slab in northern Central America. *Geology*. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<1031:EUAADS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<1031:EUAADS>2.0.CO;2)
- Rogers, R. D., Mann, P., Scott, R. W., & Patino, L. (2007). Cretaceous intra-arc rifting, sedimentation, and basin inversion in east-central Honduras. *Special Paper of the Geological Society of America*, 428(05), 89–128. [https://doi.org/10.1130/2007.2428\(05\)](https://doi.org/10.1130/2007.2428(05))
- Rogers, R. D., & O’Conner, E. (1993). *Mapa Geológico de Honduras: Hoja de Tegucigalpa*.
- Rojas, K. W. (2019). *Estimación del precio social de la mano de obra no calificada de un país centroamericano* [Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173354>
- Rosi, A., Tofani, V., Tanteri, L., Tacconi Stefanelli, C., Agostini, A., Catani, F., & Casagli, N. (2018). The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: geomorphological features and landslide distribution. *Landslides*, 15(1), 5–19. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0861-4>
- Salciarini, D., Godt, J. W., Savage, W. Z., Baum, R. L., & Conversini, P. (2008). Modeling landslide recurrence in Seattle, Washington, USA. *Engineering Geology*, 102(3–4), 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.013>
- Salciarini, D., Godt, J. W., Savage, W. Z., Conversini, P., Baum, R. L., & Michael, J. A. (2006). Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy. *Landslides*. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0037-0>
- Saleh, A., & Wright, S. (1997). *Shear strength correlations and remedial measure guidelines for long-term stability of slopes constructed of highly plastic clay soils*. <https://ntlrepository.blob.core.windows.net/lib/21000/21300/21366/PB99113409.pdf>
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). Global Sensitivity Analysis. The Primer. In *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470725184>
- Savage, W. Z., Godt, J. W., & Baum, R. L. (2004). Modeling time-dependent areal slope stability. In W. Lacerda, M. Ehrlich, S. Fontoura, & A. Sayao (Eds.), *Landslides: evaluation and stabilization*. (pp. 23–38). Balkema, Taylor & Francis Group.
- Schulz, W. H., McKenna, J. P., Kibler, J. D., & Biavati, G. (2009). Relations between hydrology and velocity of a continuously moving landslide-evidence of pore-pressure feedback regulating landslide motion? *Landslides*, 6(3), 181–190. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0157-4>
- Sharpe, C. F. S. (1938). *Landslides and Related Phenomena*. Columbia University Press.
- Shelby, M. J. (1980). A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand. *Zeitschrift Für Geomorphologie Stuttgart*, 24(1), 31–51.

- Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J., & Naganuma, T. (2000). Statistical analysis of fragility curves. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12)(December), 1224–1231.
- Sigurðsson, H., Kelley, S., Leckie, R. M., Carey, S., Bralower, T., & King, J. (2000). History of circum-Caribbean explosive volcanism: 40Ar/39Ar dating of tephra layers. *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results*, 165(February), 299–314. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.165.021.2000>
- Suárez, G., & Domínguez-Cuesta, M. J. (2021a). Identificación de zonas susceptibles a deslizamientos en Tegucigalpa, Honduras. Limitaciones del modelo del talud. *Geogaceta*, 69, 51–54. [https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/geo69/Geo69\\_p\\_51\\_54.pdf](https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/geo69/Geo69_p_51_54.pdf)
- Suárez, G., & Domínguez-Cuesta, M. J. (2021b). Improving landslide susceptibility predictive power through colluvium mapping in Tegucigalpa, Honduras. *Natural Hazards*, 105(1), 47–66. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04294-0>
- Suárez, G., & Mora, R. (2010). *Informe de avance de estudios realizados en la colonia Obrera, la residencial El Dorado, la colonia Guillen, El Porvenir, Canal 48, La Serna y la Cassandra.*
- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, Ø. B. (2013). Regional prediction of landslide hazard using probability analysis of intense rainfall in the Hoa Binh province, Vietnam. *Natural Hazards*, 66(2), 707–730. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0510-0>
- UNAH/PNUD. (2010). *Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera.*
- UPI-JICA. (2014). *Mapa de Deslizamientos de tierra de la Capital de Honduras, Tegucigalpa.*
- Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S., & Kaynia, A. M. (2008). A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3–4), 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.011>
- Valenzuela, P. (2017). *Landslide triggering in asturias (NW Spain). Rainfall and soil moisture conditions modelling.* University of Oviedo.
- Valenzuela, P., Domínguez-Cuesta, M. J., Mora García, M. A., & Jiménez-Sánchez, M. (2017). A spatio-temporal landslide inventory for the NW of Spain: BAPA database. *Geomorphology*, 293(May), 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.05.010>
- Valenzuela, P., Domínguez-Cuesta, M. J., Mora García, M. A., & Jiménez-Sánchez, M. (2018). Rainfall thresholds for the triggering of landslides considering previous soil moisture conditions (Asturias, NW Spain). *Landslides*, 15(2), 273–282. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0878-8>
- Van Asch, T. W. J., Van Beek, L. P. H., & Bogaard, T. A. (2007). Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides. *Engineering Geology*, 91(1), 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.12.012>
- Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007097.42735.9e>
- Van Westen, C. J., Van Asch, T. W. J., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation - Why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167–184. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>
- Van Westen, C. J. (1993). *Application of Geographical Information System to landslide*



- hazard zonation* [University of Twente].  
[http://www.itc.nl/library/Papers\\_1993/phd/vanwesten.pdf](http://www.itc.nl/library/Papers_1993/phd/vanwesten.pdf)
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Varnes, D. (1978). Slope Movement Types and Processes. In *Landslides--Analysis and Control* (Issue 176).
- Viland, J. C., Henry, B., Calix, R., & Diaz, C. (1996). Late Jurassic deformation in Honduras. Proposals for a revised regional stratigraphy. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(3–4), 153–160. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(96\)00002-8](https://doi.org/10.1016/0895-9811(96)00002-8)
- Viscusi, K., & Aldy, J. (2003). *The value of a statistical life: a critical review of market estimates throughout the world* (No. 9487). <https://www.nber.org/papers/w9487>
- Vulliet, L., & Hutter, K. (1988). Viscous-type sliding laws for landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(3), 467–477. <https://doi.org/10.1139/t88-052>
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2004). *At Risk, natural hazards, people vulnerability and disasters* (Second). Routledge.
- World Bank United Nations. (2010). *Natural Hazards, UnNatural Disasters : The Economics of Effective Prevention* (1st ed.). World Bank, United Nations. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2512>
- Yamin, L., Cardona, O. D., Merlano, S., & Blandón, C. (2001). *Manual de construcción, evaluación y rehabilitación sismo resistente de viviendas de mampostería*.
- Yamin, L. E., Hurtado, A. I., Barbat, A. H., & Cardona, O. D. (2014). Seismic and wind vulnerability assessment for the GAR-13 global risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10(PB), 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.05.007>
- Yamin, L. E., Ghesquiere, F., Cardona, O. D., & Ordaz, M. G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre. El caso de Bogotá, Colombia*. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19763>
- Yan, G., Liang, S., Gui, X., Xie, Y., & Zhao, H. (2019). Optimizing landslide susceptibility mapping in the Kongtong District, NW China: comparing the subdivision criteria of factors. *Geocarto International*, 34(13), 1408–1426. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1499816>
- Yin, K. L., & Yan, T. Z. (1988). Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. *5th International Symposium on Landslides*, 1269–1272.
- Zêzere, J. L., Garcia, R. A. C., Oliveira, S. C., & Reis, E. (2008). Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*, 94(3–4), 467–495. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.040>
- Zêzere, J. L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M. L., Vieira, G., & Ferreira, A. B. (2004). Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(1), 133–146. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-133-2004>
- Zêzere, J. L., Vaz, T., Pereira, S., Oliveira, S. C., Marques, R., & Garcia, R. A. C. (2015). Rainfall thresholds for landslide activity in Portugal: a state of the art. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3672-0>
- Zhang, L. M., & Ng, A. M. Y. (2006). Probabilistic limiting tolerable displacements for serviceability limit state design of foundations. *Risk and Variability in Geotechnical*

*Engineering: The Institution of Civil Engineers*, 2, 125–135.  
<https://doi.org/10.1680/ravige.34860.0013>



## 7 ANEXOS

Anexo 1. Información geoespacial recopilada.

Anexo 2. Datos de propiedades de los suelos.

Anexo 3. Datos de profundidades de los suelos.

Anexo 4. Datos de clasificación de los suelos.

Anexo 5. Mapas con los resultados de las modelaciones realizadas con el modelo del talud infinito en las áreas piloto.

Anexo 6. Parámetros utilizados para la modelación probabilista con el programa PISA en el área de estudio.

Anexo 7. Supuestos planteados para asociar los estados de daño con el valor de reposición de los elementos de la vivienda.

Anexo 8. Estimación del valor de la RMD para cada vivienda tipo considerada.

Anexo 9. Valores de las curvas de vulnerabilidad ante deslizamientos para los distintos tipos de vivienda.

Anexo 10. Valores de precipitación y periodo de retorno para los episodios de deslizamientos considerados.

Anexo 11. Principales indicadores de las unidades homogéneas y resultados de la modelación probabilista de pérdidas para la condición de  $FS < 1^*$

Anexo 12. Microcuencas urbanas con sus principales parámetros.

Anexo 13. Drenajes trazados con sus principales parámetros y su presupuesto

Anexo 14. Información recopilada de costos de canales de mampostería.

Anexo 15. Flujos de beneficios y costos para los distintos escenarios del análisis costo/beneficio.

Anexo 16. Sensibilización del ratio  $\cos 2\beta \tan \phi / \sin \beta \cos \beta$ .

## Anexo 1. Información geoespacial recopilada.

<b>Tema</b>	<b>Descripción</b>	<b>Escala</b>	<b>Tipo</b>	<b>Autor</b>	<b>Fecha versión</b>
Información base	Información del censo 2001 de los barrios y colonias de Tegucigalpa	1:25000	shape	INE	2001
	Foto aérea de la zona de estudio ortorestituida. Cada foto cubre 216.3 Ha y se cuenta con 143 fotos, ordenadas en 13 líneas con 11 fotos cada línea para una cobertura total de 309 km <sup>2</sup>	1:10000	Imagen	JICA	2013
	Mapa de cobertura forestal y uso de la tierra 2018. Tamaño de pixel de 10 x 10	1:25000	raster	Instituto de Conservación Forestal (ICF)	2018
Topografía	Curvas de nivel cada 10 metros para la zona de estudio	1:25000	shape	INE	2010
Vivienda	Datos de las encuestas del estado de las viviendas levantadas por la ONG GOAL en el año 2010	No aplica	shape	GOAL	2010
	Mapa de unidades homogéneas	1:25000	shape	IDOM	2015
Geología	Hoja geológica de Zambrano	1:50000	shape	Colaboración del Instituto Geográfico Nacional, Secretaria de Comunicaciones, Obras Públicas y Transporte, Cuerpo de Paz y Ministerio de Recursos Naturales	1990
	Hoja geológica de Tegucigalpa	1:50000	shape	Colaboración del Instituto Geográfico Nacional, Secretaria de Comunicaciones, Obras Públicas y Transporte, Cuerpo de Paz y Ministerio de Recursos Naturales.	1990
	Hoja geológica de Talanga	1:50000	shape	Colaboración del Instituto Geográfico Nacional, Secretaria de Comunicaciones, Obras Públicas y Transporte, Cuerpo de Paz y Ministerio de Recursos Naturales	1990

Tema	Descripción	Escala	Tipo	Autor	Fecha versión
Geología	Hoja geológica de Lepaterique	1:50000	shape	Colaboración del Instituto Geográfico Nacional, Secretaria de Comunicaciones, Obras Públicas y Transporte, Cuerpo de Paz y Ministerio de Recursos Naturales	1990
	Hoja geológica de San Juan de Flores	1:50000	shape	Colaboración del Instituto Geográfico Nacional, Secretaria de Comunicaciones, Obras Públicas y Transporte, Cuerpo de Paz y Ministerio de Recursos Naturales	1990
	Hoja geológica de Agalteca	1:50000	shape	Colaboración del Instituto Geográfico Nacional, Secretaria de Comunicaciones, Obras Públicas y Transporte, Cuerpo de Paz y Ministerio de Recursos Naturales	1990
	Mapa geológico elaborado por al empresa Lotti	1:50000	raster	Lotti	1986
	Mapa de litología con pixel 10 x 10 m elaborado como parte del estudio BID (2015), mediante la union de las hojas geológicas y la síntesis de las categorías	1:50000	raster	IDOM	2015
Inundaciones	Mapa de inundaciones del MDC para el periodo de retorno de 5 años	1:10000	shape	JICA	2002
	Movimientos de ladera del estudio de JICA (2002)	1:10000	shape	JICA	2002
	Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera del estudio BID (2015)	1:50000	raster	Joaquín Pérez	2015
Movimientos de ladera	Deslizamientos extraídos por PNUD del mapa de deslizamientos de Lotti (1986)	1:25000	shape	Lotti	1986
	Unión de los inventarios de movimientos de ladera de JICA (2002), USGS (2002), Lotti (1986) y deslizamientos mapeados por PNUD (2010-2011) elaborada por PNUD en 2014. Los polígonos están agrupados en base a su amenaza. Cuando existía superposición de polígonos se seleccionó el más grande	1:25000	shape	PNUD	2014

<b>Tema</b>	<b>Descripción</b>	<b>Escala</b>	<b>Tipo</b>	<b>Autor</b>	<b>Fecha versión</b>
Movimientos de ladera	Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera elaborado por la UNAH para proyecto de PNUD con tamaño de pixel de 10x10 m	1:50000	raster	UNAH	2010
	Inventario de movimientos de ladera realizado por la UPI	1:10000	shape	UPI-JICA	2014
	Movimientos de ladera del estudio de USGS (2002)	1:20000	shape	USGS	2002

Anexo 2. Datos de propiedades de los suelos.

X	Y	Origen (*)	Colonia	Clasificación	Peso específico húmedo (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso específico húmedo (N/m <sup>3</sup> )	Angulo	Cohesion (Kg/cm <sup>2</sup> )	Cohesion (N/m <sup>2</sup> )
<b>Coluvión de basaltos y andesitas</b>									
472713	1558960	P8 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	1925		13	0,18	
		Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	1875		9	0,4	
472772	1559165	P10 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	2049		11	0,54	
472808	1559059	P12a Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	1910		12	0,81	
<b>Promedio</b>					<b>1940</b>	<b>19010</b>	<b>11.25</b>	<b>0,4825</b>	<b>47317</b>
<b>Desviación típica</b>					<b>76</b>	<b>743</b>	<b>1.71</b>	<b>0,26</b>	<b>25876</b>
<b>Suelo residual de Grupo Valle de Angeles</b>									
476692	1558966	P2 Geoconsult	La Obrera	Suelo residual lutita	1566		16	0,03	
		PNUD	La Obrera	Suelo residual lutita	1973		13	0,17	
480110	1560852	P4 Geoconsult	La Canaan	Suelo residual lutita	1999		11	0,52	
<b>Promedio</b>					<b>1846</b>	<b>18091</b>	<b>13.33</b>	<b>0,24</b>	<b>23536</b>
<b>Desviación típica</b>					<b>243</b>	<b>2379</b>	<b>2.52</b>	<b>0,25</b>	<b>24751</b>
<b>Coluvión Grupo Padre Miguel</b>									
475836	1559566	P2 Geoconsult	Colonia La Flor 1	Coluvión toba	1710		10	0,22	
475826	1559509	P6 Geoconsult	Colonia La Flor 1	Coluvión toba	1427		12	0,12	
478590	1560090	P1 Geoconsult	La Cabana	Coluvión toba	1954		15	0,28	
478535	1560118	P2 Geoconsult	La Cabana	Coluvión toba	1884		15	0,98	



478526	1559994	P4 Geoconsult	La Cabana	Coluvión toba	1953	13	0,41	
		PNUD	Nueva Santa Rosa	Coluvión toba	1343	44	0,04	
		PNUD	Nueva Santa Rosa	Coluvión toba	1464	39	0,16	
		Geoconsult Berrinche		Coluvión toba	1290	43	0,12	
				<b>Promedio</b>	<b>1628</b>	<b>15955</b>	<b>23,88</b>	<b>0,29</b>
				<b>Desviación típica</b>	<b>280</b>	<b>2740</b>	<b>15,16</b>	<b>0,30</b>
								<b>28562</b>
								<b>29482</b>

(\*) La notación en la columna de origen corresponde a la notación correlativa de la perforación específica, dentro de cada zona de estudio, de la que se obtuvo la muestra.

Anexo 3. Datos de profundidades de los suelos.

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Origen (*)</b>	<b>Colonia</b>	<b>Tipo coluvión</b>	<b>Profundidad suelos (m)</b>
472557	1559043	P1 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	5
472564	1559137	P2 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	6
472611	1558971	P4 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	7
472648	1559115	P5 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	14,5
472676	1559199	P6 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	9,5
472713	1558960	P8 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	5,5
472749	1559085	P9 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	13,75
472772	1559165	P10 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	16,5
472808	1559059	P12a Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	18,5
472908	1558900	P14 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	32
472925	1558951	P15 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	25
472947	1559032	P16 Geoconsult	La Ulloa	Coluvión basaltos y andesitas	21,5
<i>Promedio coluvión basaltos y andesitas</i>					<b>14,56</b>
<i>Desviación típica coluvión basaltos y andesitas</i>					<b>8,59</b>
476619	1558994	P1 Geoconsult	La Obrera	Suelo residual lutita	16
476692	1558966	P2 Geoconsult	La Obrera	Suelo residual lutita	8,5
476750	1558938	P3 Geoconsult	La Obrera	Suelo residual lutita	6,5
476939	1558995	P4 Geoconsult	La Obrera	Suelo residual lutita	4
476726	1559050	P5 Geoconsult	La Obrera	Suelo residual lutita	6
476733	1558843	P6 Geoconsult	La Obrera	Suelo residual lutita	9,4
PNUD			La Obrera	Suelo residual lutita	9

<i>Promedio coluvión Valle de</i>					
<i>Ángeles en la colonia La Obrera</i>					
<b>8,49</b>					
<i>Desviación típica coluvión Valle de</i>					
<i>Ángeles en la colonia La Obrera</i>					
<b>3,83</b>					
479912	1560180	P1 Geoconsult	Nueva Santa Rosa	Coluvión toba	4,5
479898	1560296	P2 Geoconsult	Nueva Santa Rosa	Coluvión toba	10
479896	1560174	P3 Geoconsult	Nueva Santa Rosa	Coluvión toba	7
		P6 Geoconsult	Nueva Santa Rosa	Coluvión toba	4
		PNUD	Nueva Santa Rosa	Coluvión toba	17
		PNUD	Nueva Santa Rosa	Coluvión toba	13,4
		P4 Geoconsult	Nueva Santa Rosa	Coluvión toba	4
		P5 Geoconsult	Nueva Santa Rosa	Coluvión toba	5
<i>Promedio coluvión Padre Miguel</i>					
<i>colonia Nueva Santa Rosa</i>					
<b>8,11</b>					
<i>Desviación típica coluvión Padre</i>					
<i>Miguel colonia Nueva Santa Rosa</i>					
<b>4,90</b>					
479706	1560180	P3 Geoconsult	Colonia La Flor 1	Coluvión toba	7
475901	1559623	P1 Geoconsult	Colonia La Flor 1	Coluvión toba	6
475836	1559566	P2 Geoconsult	Colonia La Flor 1	Coluvión toba	7,5
475737	1559526	P4 Geoconsult	Colonia La Flor 1	Coluvión toba	2
475954	1559563	P5 Geoconsult	Colonia La Flor 1	Coluvión toba	8,5
475826	1559509	P6 Geoconsult	Colonia La Flor 1	Coluvión toba	13,5
478590	1560090	P1 Geoconsult	La Cabana	Coluvión toba	6,8
478535	1560118	P2 Geoconsult	La Cabana	Coluvión toba	16
476726	1559050	P3 Geoconsult	La Cabana	Coluvión toba	10
478526	1559994	P4 Geoconsult	La Cabana	Coluvión toba	10
478471	1559880	P5 Geoconsult	La Cabana	Coluvión toba	5,55
478446	1560040	P6 Geoconsult	La Cabana	Coluvión toba	6,75
		P3 Geoconsult	La Canaan	Coluvión toba	5
479827	1560228	P4 Geoconsult	La Canaan	Coluvión toba	2
479762	1560209	P5 Geoconsult	La Canaan	Coluvión toba	2

480220	1561151	P1 Geoconsult	La Canaan	Coluvión toba	18
480364	1561026	P2 Geoconsult	La Canaan	Coluvión toba	8
480477	1561189	P6 Geoconsult	La Canaan	Coluvión toba	4
<i>Promedio coluvión Padre Miguel todas las colonias</i>					<b>7,83</b>
<i>Desviación típica coluvión Padre Miguel todas las colonias</i>					<b>4,55</b>

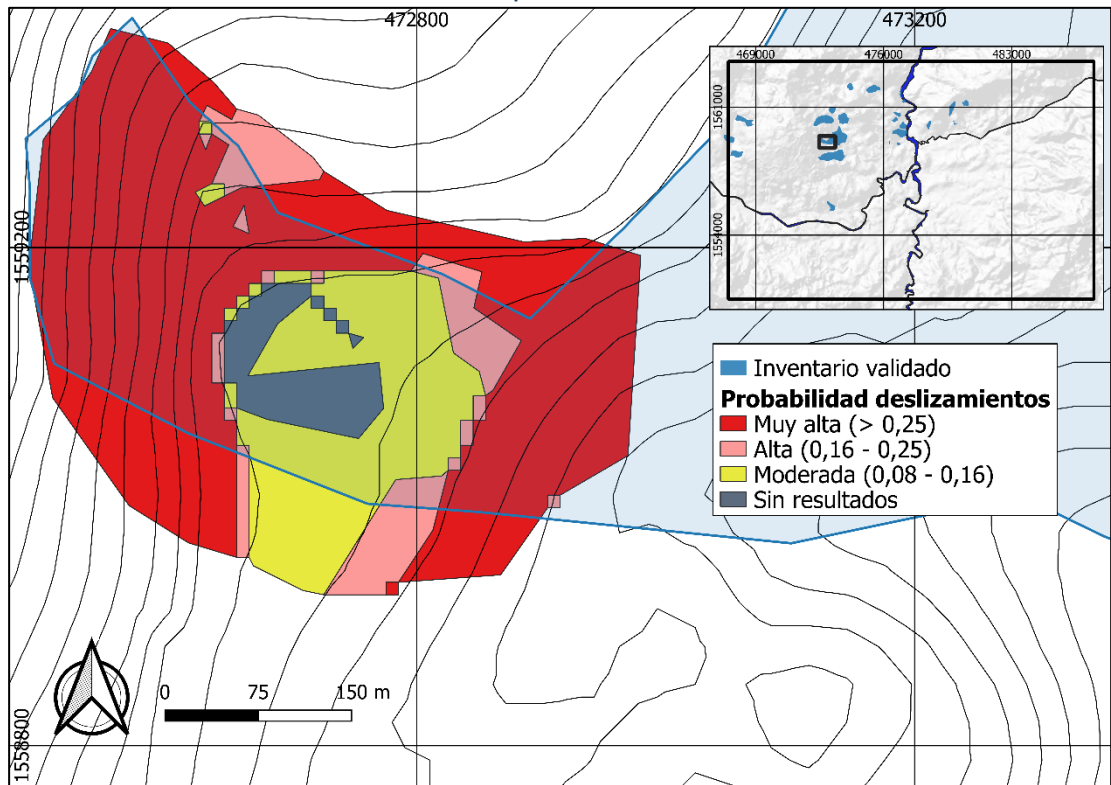
(\*) La notación en la columna de origen corresponde a la notación correlativa de la perforación específica, dentro de cada zona de estudio, de la que se obtuvo la muestra.

Anexo 4. Datos de clasificación de los suelos.

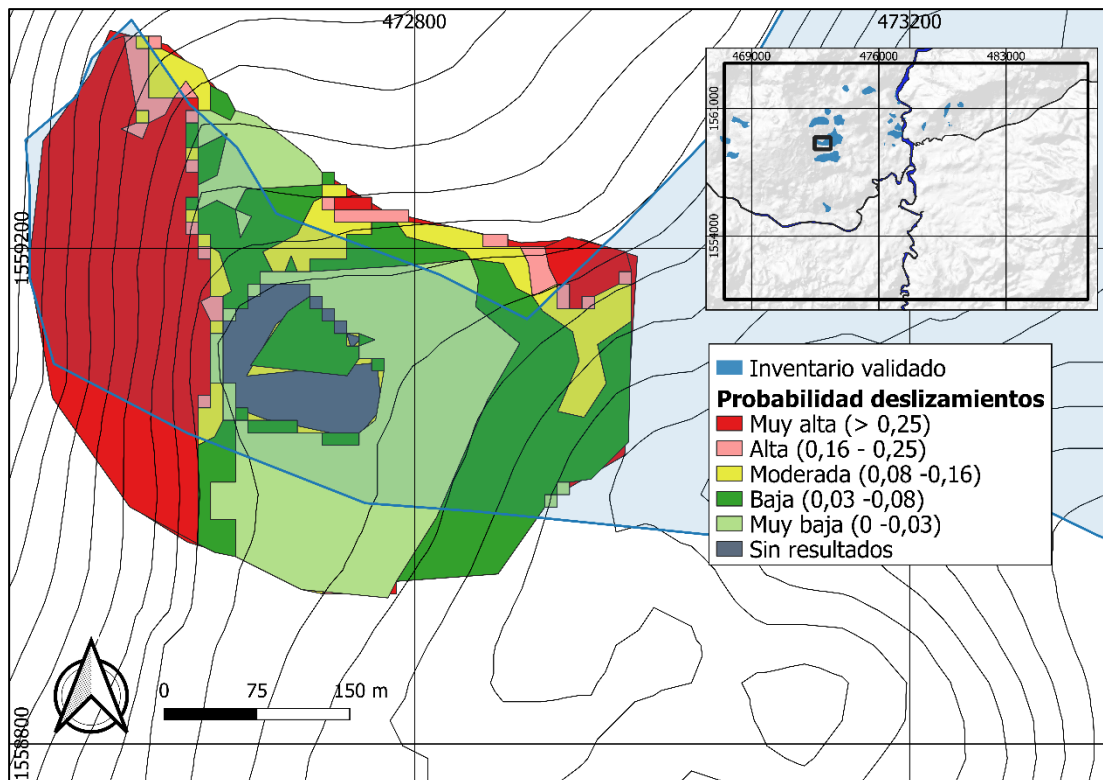
Grupos principales			Símbolo de letras	Descripción del suelo	Coluvión de andesitas y basaltos		Suelo residual del Grupo Valle de Ángeles		Coluvión Grupo Padre Miguel	
					N muestras	%	N muestras	%	N muestras	%
Suelos de grano grueso (Más del 50% del material queda retenido en el tamiz n 200)	Gravas y suelos con grava (más del 50% de la fracción gruesa queda retenida por el tamiz N4)	Grava limpia	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y de arena, con pocos finos o sin finos						
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y de arena, con pocos finos o sin finos						
	Grava con finos (finos en cantidades apreciables)	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	1	6%					
		GC	Gravas arcillosas. Mezcla de grava-arena-arcilla			2	17%	1	50%	
	Arenas y suelos arenosos (más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz N4)	Arena limpia	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, con pocos finos o sin finos						
			SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, con pocos finos o sin finos	1	6%				
		Arena con finos (finos en cantidades apreciables)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena-limo	5	28%	1	8%		
			SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena-arcilla	4	22%	2	17%		
		ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas							

Grupos principales		Símbolo de letras	Descripción del suelo	Coluvión de andesitas y basaltos		Suelo residual del Grupo Valle de Ángeles		Coluvión Grupo Padre Miguel	
				N muestras	%	N muestras	%	N muestras	%
<i>Suelos de grano fino</i> (Más del 50% del material pasa por el tamiz n 200)	<i>Limos y arcilla.</i> Límite líquido menor de 50	CL	Arcillas inorgánicas poco plásticas o de plasticidad mediana, arcillas con gravas, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras			4	33%	1	50%
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas poco plásticas						
	<i>Limos y arcilla.</i> Límite líquido mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, con mica o arena fina de diatomeas o suelos limosos	3	17%	2	17%		
		CH	Arcillas inorgánicas muy plásticas. Arcillas grasas	4	22%	1	8%		
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad mediana o muy plásticas, limos orgánicos						
<i>Suelos muy orgánicos</i>		PT	Turbas, humus, suelos de pantanos con mucha materia orgánica						
				<b>18</b>		<b>12</b>		<b>2</b>	

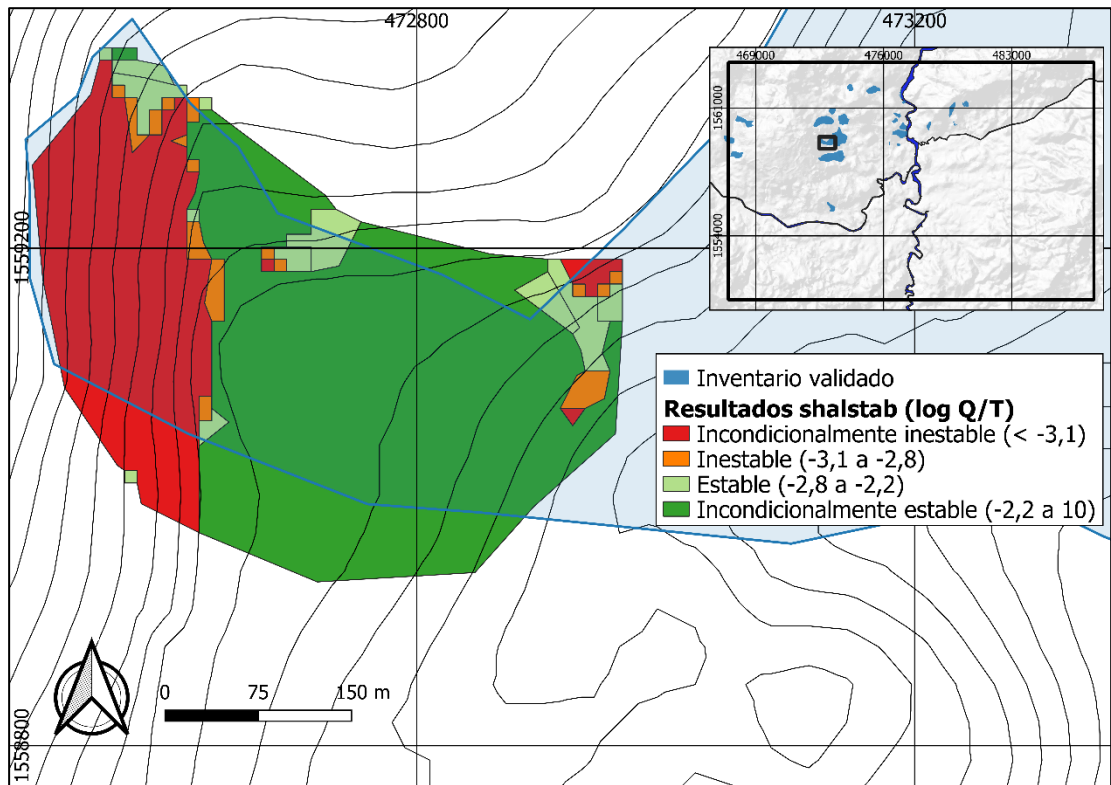
Anexo 5. Mapas con los resultados de las modelaciones realizadas con el modelo del talud infinito en las áreas piloto.



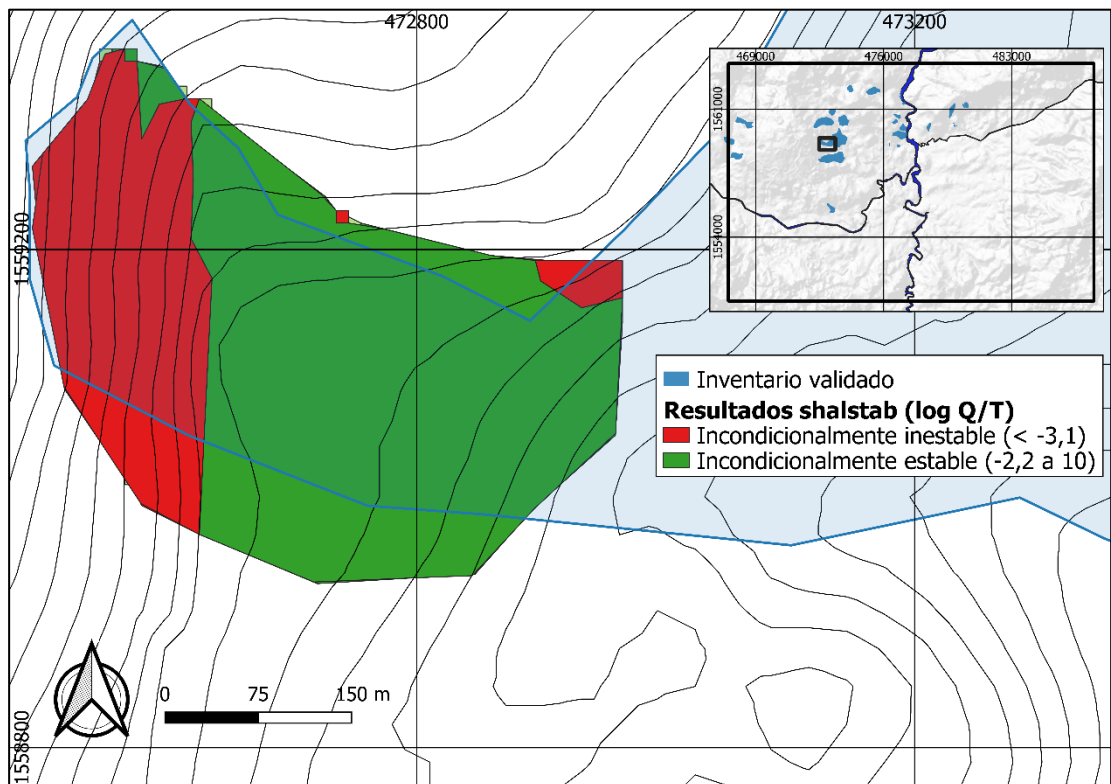
Resultados de la modelación en la zona de las colonias La Ulloa y José Arturo Duarte con el programa PISA-m usando los parámetros geotécnicos promedio.



Resultados de la modelación en la zona de las colonias La Ulloa y José Arturo Duarte con el programa PISA-m usando los parámetros por defecto para coluviones.

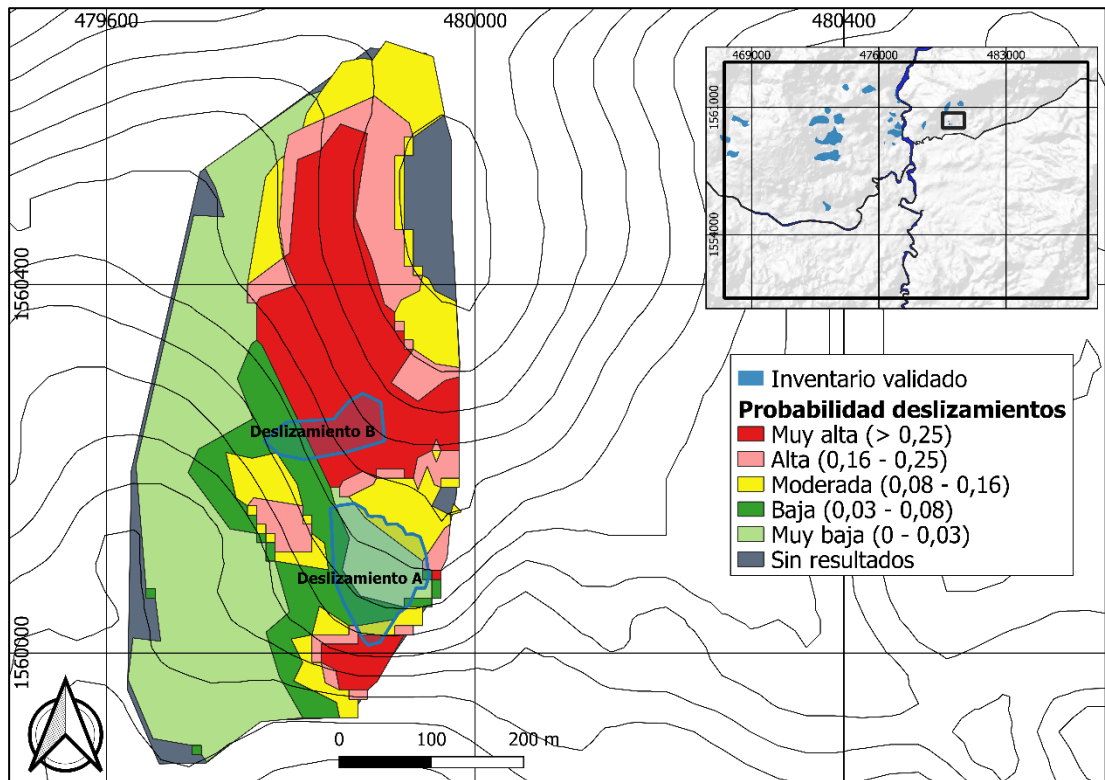


Resultados de la modelación para la zona de las colonias La Ulloa y José Arturo Duarte con la extensión SHALSTAB usando los parámetros geotécnicos promedio.

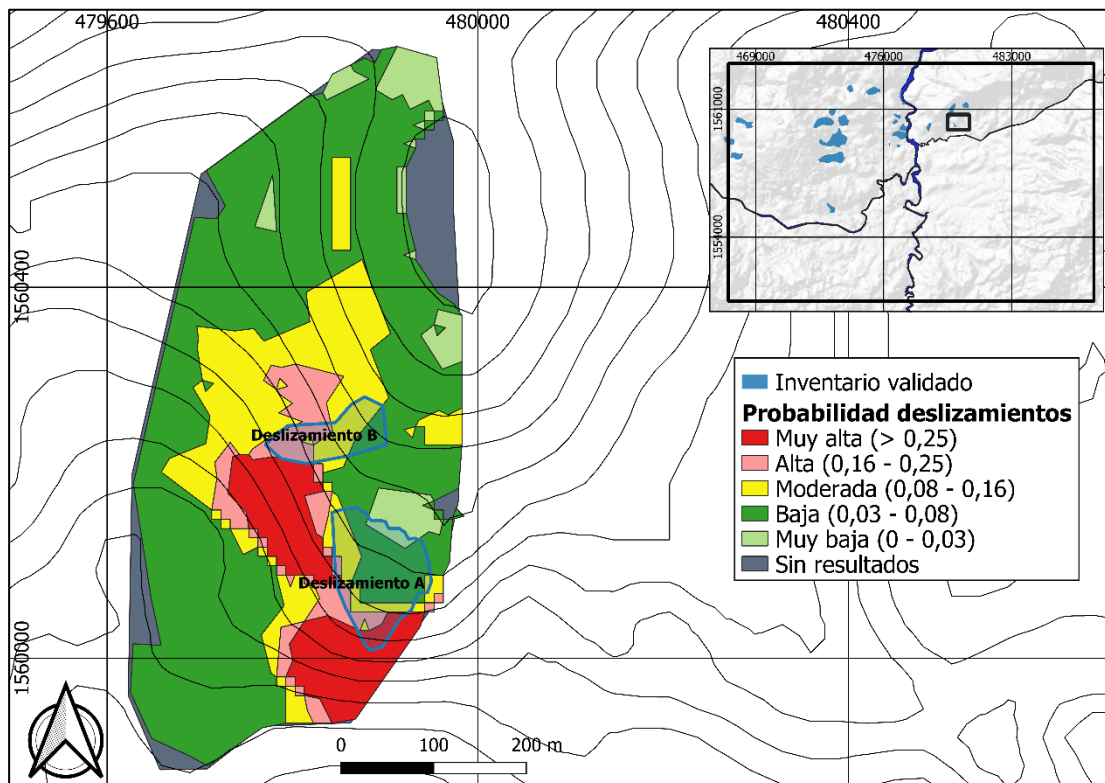


Resultados de la modelación para la zona de las colonias La Ulloa y José Arturo Duarte con la extensión SHALSTAB usando los parámetros por defecto para coluviones.

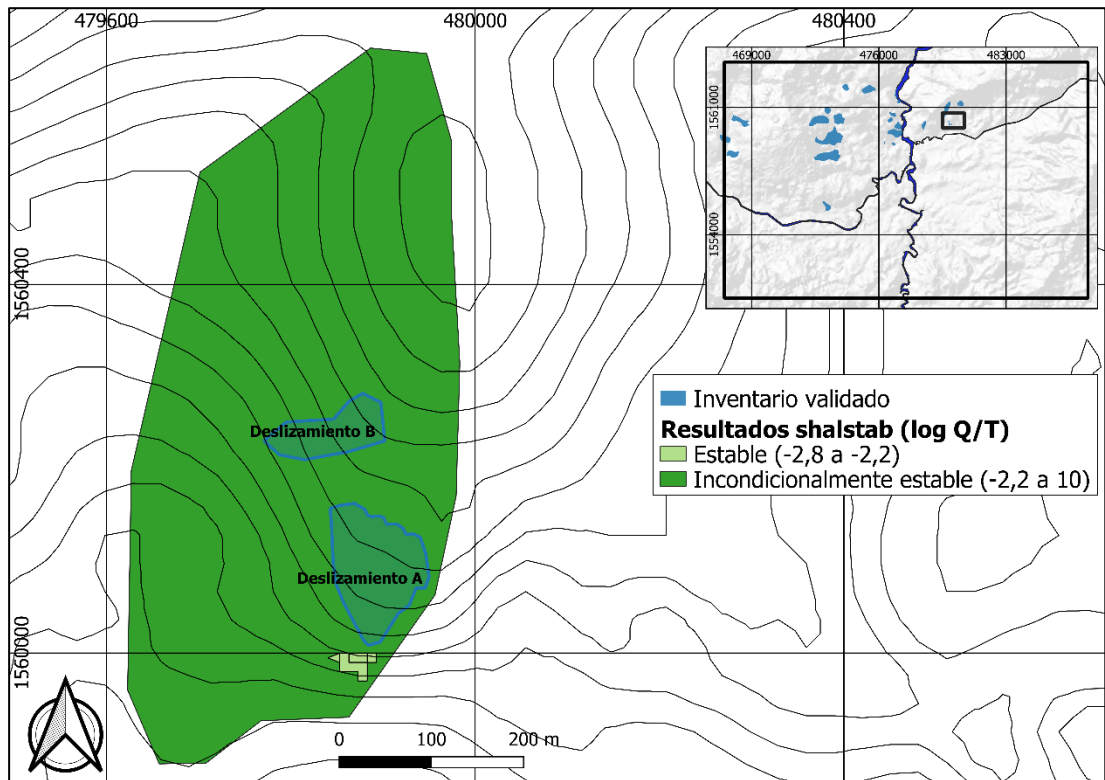




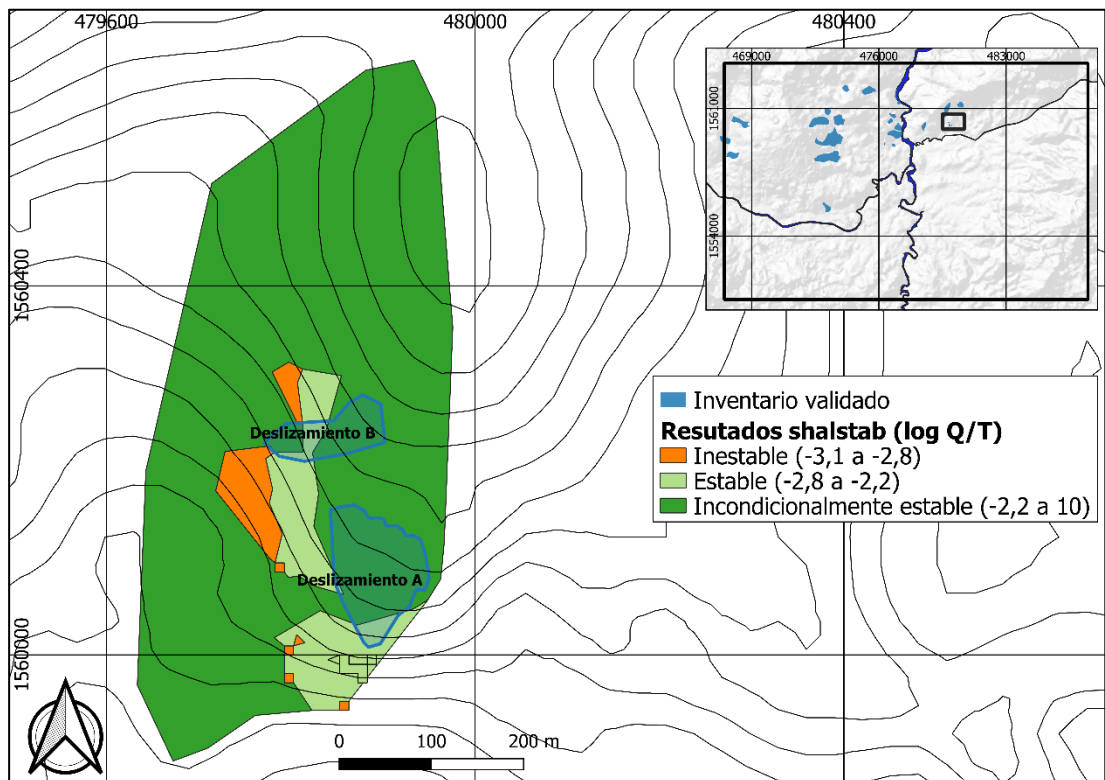
Resultados de la modelación para la zona de la colonia Nueva Santa Rosa con el programa PISA-m usando los parámetros geotécnicos promedio.



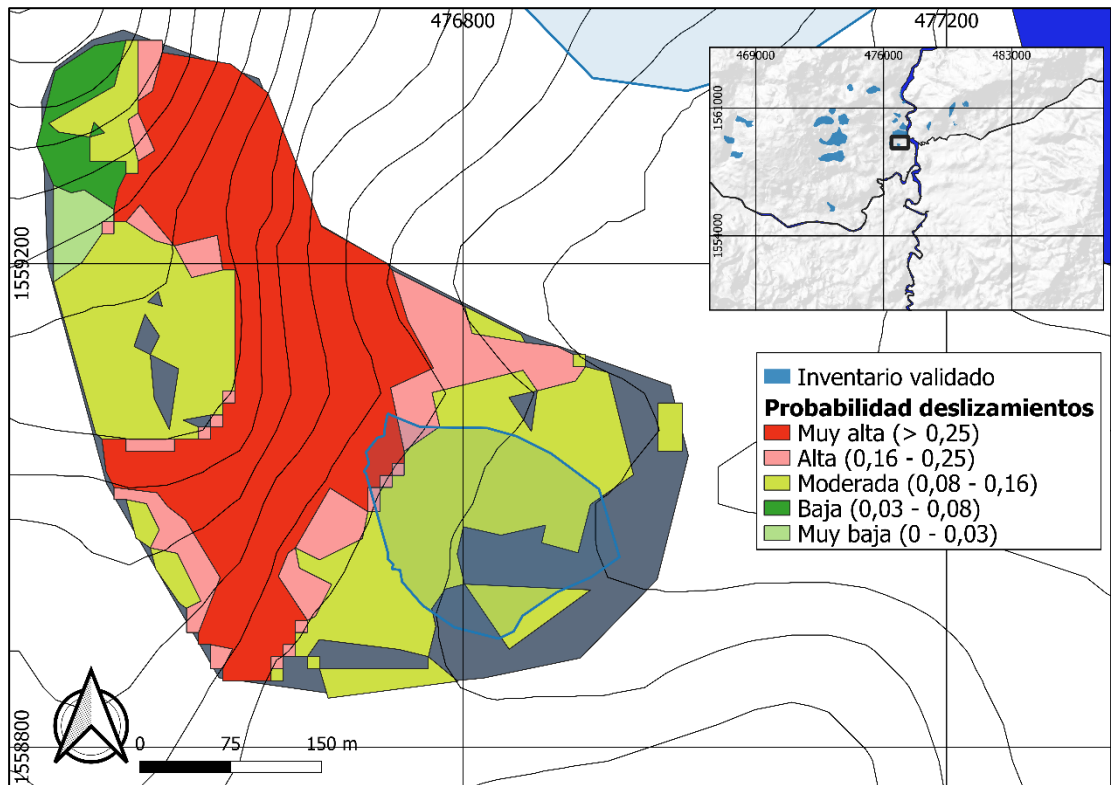
Resultados de la modelación para la zona de la colonia Nueva Santa Rosa con el programa PISA-m usando los parámetros geotécnicos por defecto para coluviones.



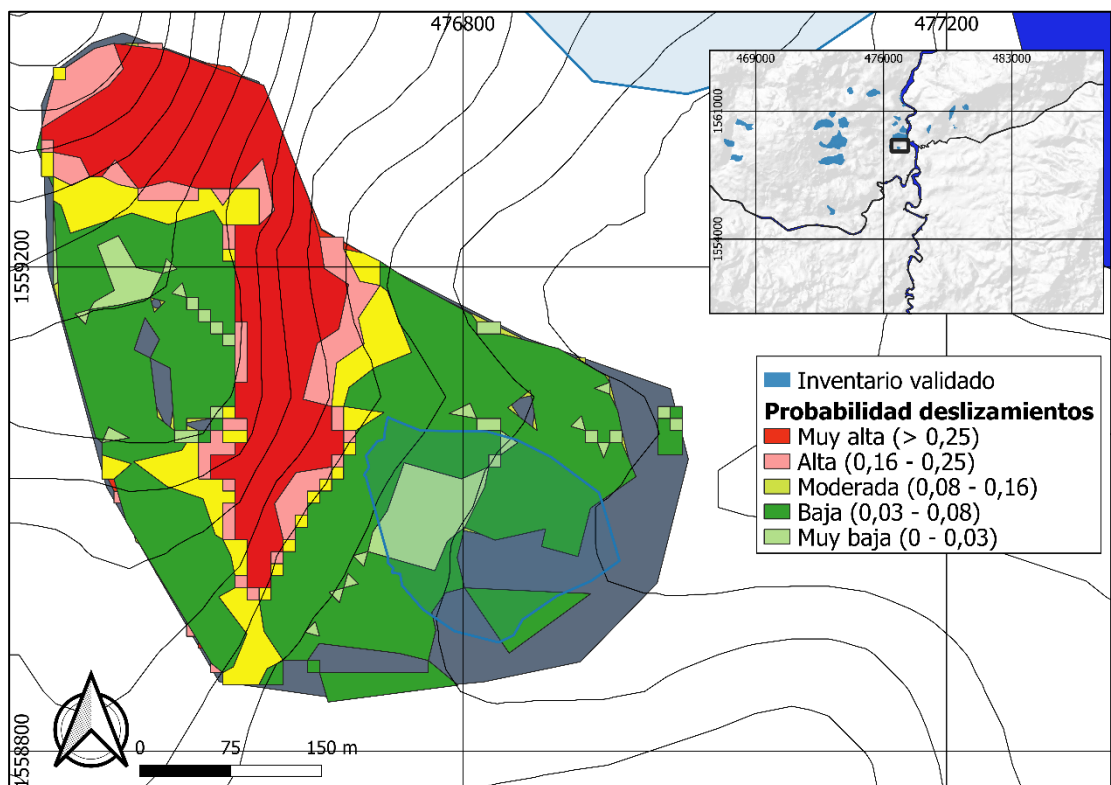
Resultados de la modelación para la zona de la colonia Nueva Santa Rosa con la extensión SHALSTAB usando los parámetros geotécnicos promedio.



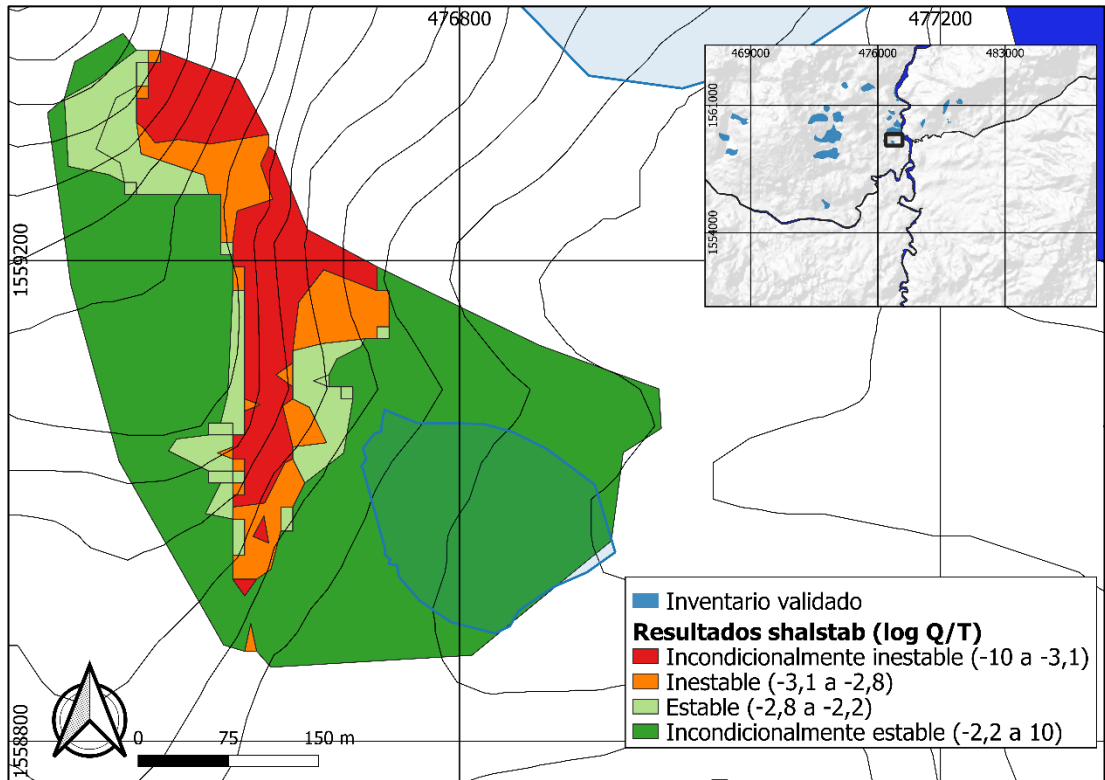
Resultados de la modelación para la zona de la colonia Nueva Santa Rosa con la extensión SHALSTAB usando los parámetros geotécnicos por defecto para coluviones.



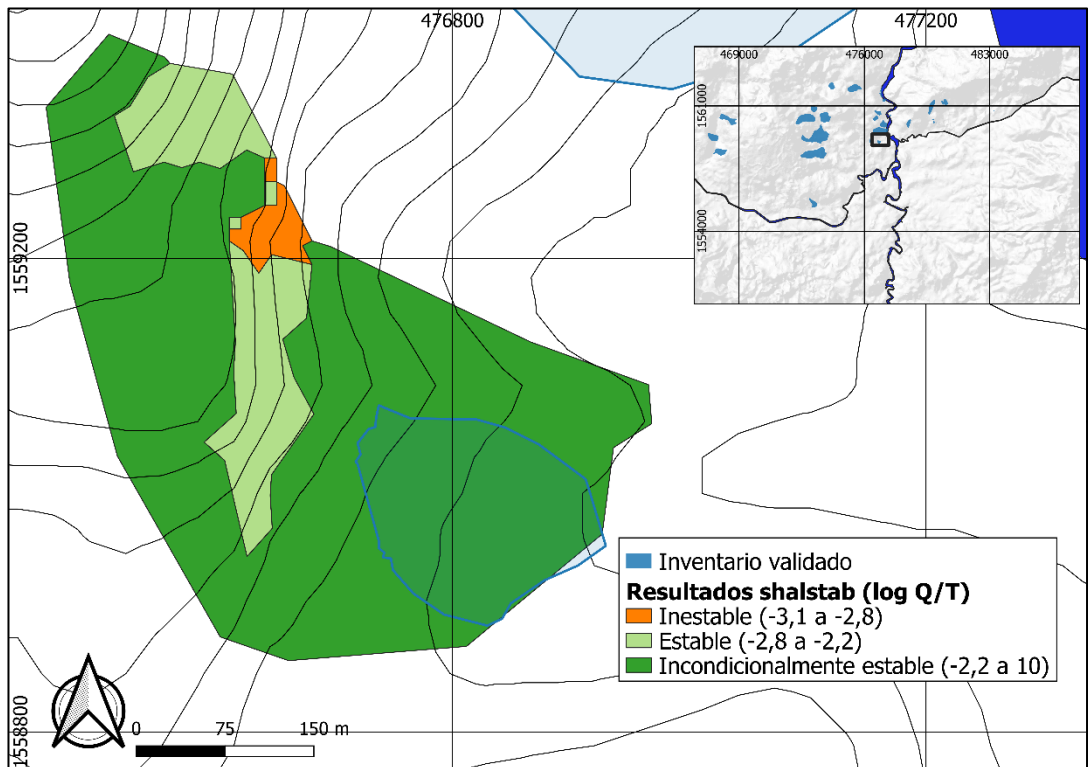
Resultados de la modelación para la zona de la colonia La Obrera con el programa PISA-m usando los parámetros geotécnicos promedio.



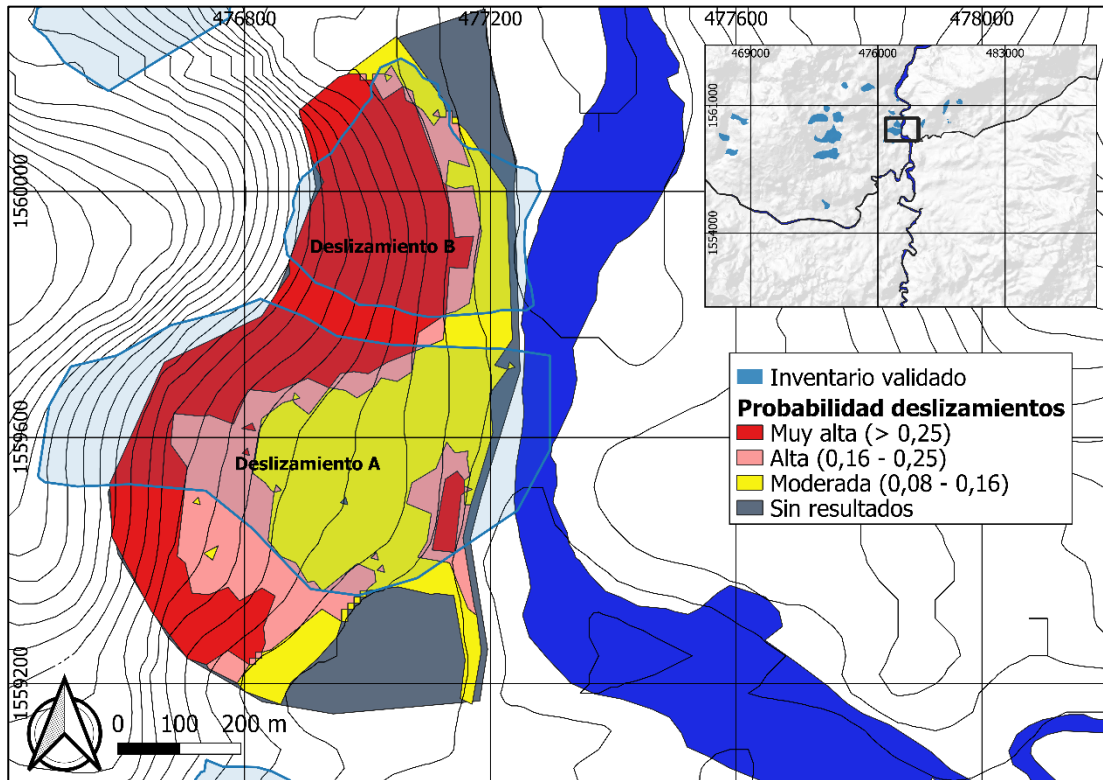
Resultados de la modelación para la zona de la colonia La Obrera con el programa PISA-m usando los parámetros geotécnicos por defecto para coluviones.



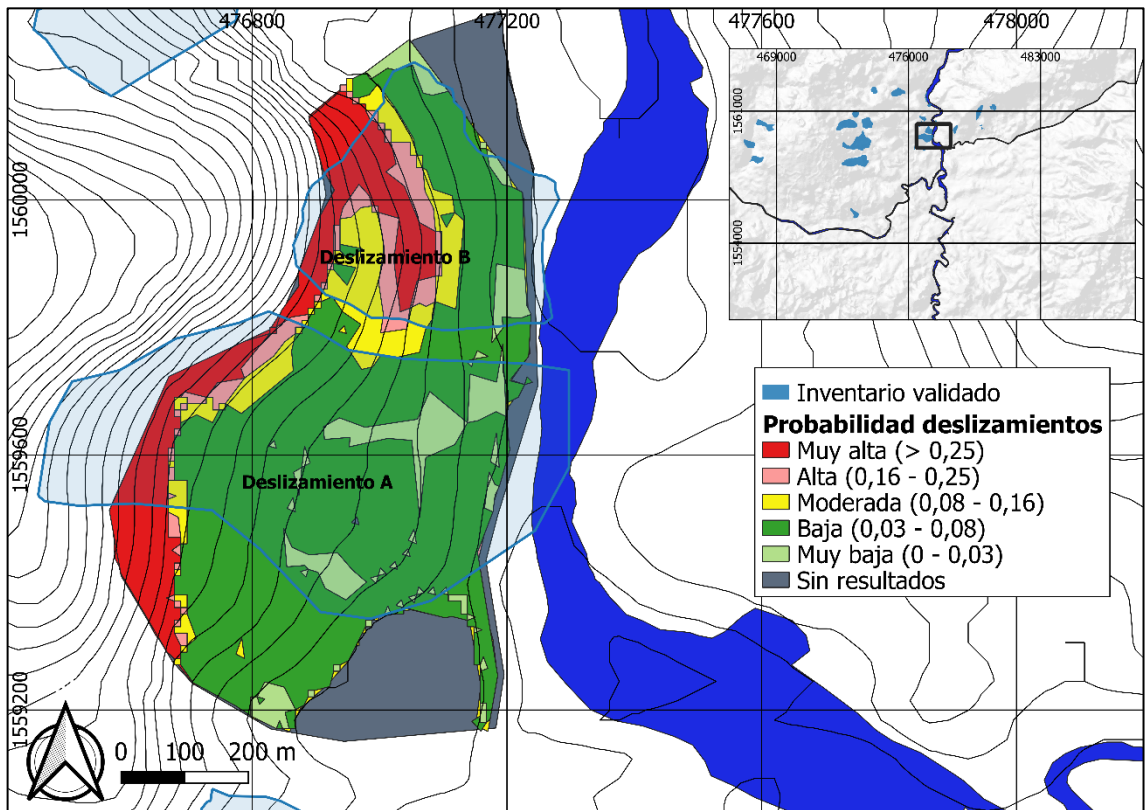
Resultados de la modelación para la zona de la colonia La Obrero con la extensión SHALSTAB usando los parámetros geotécnicos promedio.



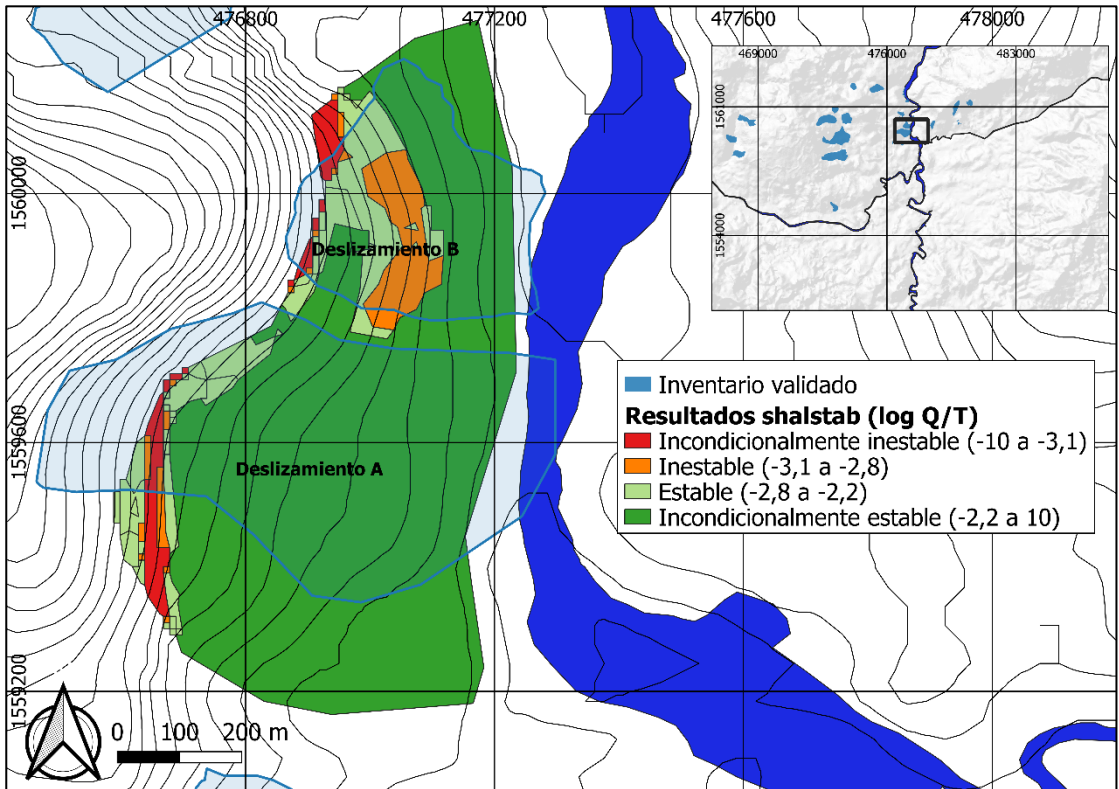
Resultados de la modelación para la zona de la colonia La Obrero con la extensión SHALSTAB usando los parámetros geotécnicos por defecto para coluviones.



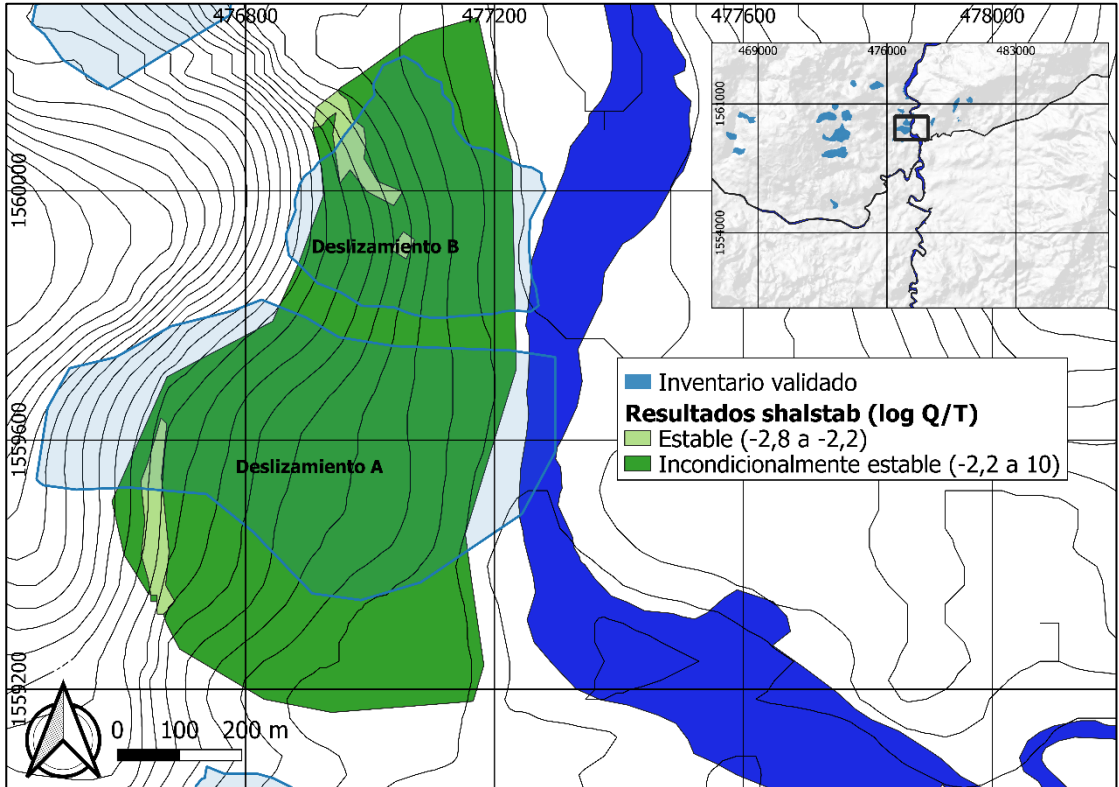
Resultados de la modelación para la zona del cerro El Berrinche con el programa PISA-m usando los parámetros geotécnicos promedio.



Resultados de la modelación para la zona del cerro El Berrinche con el programa PISA-m usando los parámetros geotécnicos por defecto para coluviones.



Resultados de la modelación para la zona del cerro El Berrinche con la extensión SHALSTAB usando los parámetros geotécnicos promedio.



Resultados de la modelación para la zona de la colonia Obrera con la extensión SHALSTAB usando los parámetros geotécnicos por defecto para coluviones.

Anexo 6. Parámetros utilizados para la modelación probabilista con el programa PISA en el área de estudio.

### Parámetros generales de la modelación.

<i>static</i>	<i>probability</i>	Se refiere a que la modelación se realizó sin considerar aceleración sísmica y que los resultados se obtuvieron de forma probabilista
<i>in_format</i>	<i>arc</i>	Tipo de ficheros de entrada (arc ASCII grids)
<i>out_format</i>	<i>arc</i>	Tipo de ficheros de salida (arc ASCII grids)

### Ficheros con los datos de entrada y salida.

<i>dem.asc</i>	Nombre del fichero que contiene el modelo digital de elevación
<i>soils.asc</i>	Nombre del fichero que contiene los suelos y sus parámetros
<i>trees.asc</i>	Nombre del fichero que contiene los tipos de cobertura y sus parámetros
<i>res_set3.asc</i>	Nombre del fichero de salida

### Unidades y condiciones de la modelación.

<i>gw</i>	9810	Peso unitario del agua (N/m <sup>3</sup> )
<i>an</i>	0	Límite de aceleración sísmica en valores de g (0 al no considerarse la aceleración sísmica)
<i>dn</i>	0	Desplazamiento en cm (0 al no considerarse la aceleración sísmica)
<i>IA</i>	0	Intensidad del sismo (0 al no considerarse la aceleración sísmica)
<i>minslope</i>	5	Mínima pendiente para la que realiza cálculos*
<i>z_err</i>	1	Desviación típica de error del modelo digital de elevación*
<i>soils</i>	3	Cantidad de tipos de suelos considerados

### Parámetros de los tipos de suelos considerados.

Parámetro	Función de densidad de probabilidad	Valor medio	Desviación típica	Número aleatorio*	Descripción
<b>Coluvión derivado de basaltos y andesitas</b>					
<i>phi</i>	normal	11,2	1,7	0	Ángulo de rozamiento interno (°)
<i>cs</i>	normal	47317	25876	0	Cohesión (N/m <sup>2</sup> )
<i>d</i>	normal	14	8.5	0	Espesor del suelo (m)
<i>h</i>	none	1	0	0	Coefficiente adimensional de presión de poro (0-1)
<i>gs</i>	normal	22432	877	0	Peso unitario del suelo saturado (N/m <sup>3</sup> )
<i>gm</i>	normal	19010	743	0	Peso unitario del suelo húmedo(N/m <sup>3</sup> )
<b>Coluvión derivado del Grupo Padre Miguel</b>					
<i>phi</i>	normal	24	15	0	Ángulo de rozamiento interno (°)
<i>cs</i>	normal	28562	29482	0	Cohesión (N/m <sup>2</sup> )
<i>d</i>	normal	7.8	4.5	0	Espesor del suelo (m)
<i>h</i>	none	1	0	0	Coefficiente adimensional de presión de poro (0-1)
<i>gs</i>	normal	19237	853	0	Peso unitario del suelo saturado (N/m <sup>3</sup> )
<i>gm</i>	normal	15955	2740	0	Peso unitario del suelo húmedo (N/m <sup>3</sup> )
<b>Suelo residual derivado del Grupo Valle de Ángeles</b>					
<i>phi</i>	normal	13,3	2,5	0	Ángulo de rozamiento interno (°)

<i>cs</i>	normal	23535	24751	0	Cohesión (N/m <sup>2</sup> )
<i>d</i>	normal	8	3,8	0	Espesor del suelo (m)
<i>h</i>	none	1	0	0	Coefficiente adimensional de presión de poro (0-1)
<i>gs</i>	normal	21079	2740	0	Peso unitario del suelo saturado (N/m <sup>3</sup> )
<i>gm</i>	normal	18091	2379	0	Peso unitario del suelo húmedo (N/m <sup>3</sup> )

### Parámetros de las coberturas vegetales consideradas.

<i>trees</i>	1	Número de coberturas de vegetación consideradas
--------------	---	---

Parámetro	Función de densidad de probabilidad	Valor medio	Desviación típica	Número aleatorio*	Descripción
<i>cr</i>	none	0	0	0	Fuerza de las raíces
<i>q</i>	none	0	0	0	Carga de la cobertura forestal

\*Valores recomendados en Haneberg (2007).



Anexo 7. Supuestos planteados para asociar los estados de daño con el valor de reposición de los elementos de la vivienda.

Elemento	Supuestos	Paredes	Techo	Piso	Paredes + Techo	Paredes + piso	Piso + techo	Paredes + Piso + Piso	Agrupación de elementos
Limpieza inicial	Actividades de limpieza. Se considera que habría que ejecutarlas para cualquiera de los estados de daño.	X	X	X	X	X	X	X	Limpieza
Excavaciones	Todos los elementos de la cimentación se considera que sería necesario reponerlos únicamente cuando el daño es total.							X	Cimentación
Rellenos (conformación) y movimientos de material								X	
Elementos de cimentaciones								X	
Elementos estructurales y paredes	Se consideró que este grupo de elementos habría que reponerlos cuando se dañen las paredes	X			X	X		X	Paredes
Soleras y cargadores		X			X	X		X	
Batientes de ventanas		X			X	X		X	
Pared de sobreelevación		X			X	X		X	
Acabados		X			X	X		X	
Ventanas		X			X	X		X	Puertas y ventanas
Puertas		X			X	X		X	
Fundiciones de pisos	Este elemento habría que reponerlo cuando se dañe el piso			X		X	X	X	Pisos
Techos	Estos elementos habría que reponerlos cuando se dañe el techo		X		X		X	X	Techos
Cielo falso			X		X		X	X	
Instalaciones hidrosanitarias	Este elemento habría que reponerlo cuando se dañe cualquier elemento, menos el techo, pues esta instalación atraviesa todos los elementos menos el techo.	X		X	X	X	X	X	Instalaciones hidrosanitarias
Instalación eléctrica	Este elemento habría que reponerlo cuando se dañe cualquier elemento, pues esta instalación atraviesa todos los elementos.	X	X	X	X	X	X	X	Instalación eléctrica
Limpieza final	Estos elementos de limpieza final se consideró que habría que reponerlos si se daña cualquier elemento	X	X	X	X	X	X	X	Limpieza final

Anexo 8. Estimación del valor de la RMD para cada vivienda tipo considerada.

<b>Vivienda de madera</b>									
Elemento agrupado	RMD								
	Presupuesto (Lps)	% del total	Piso (%)	Techo (%)	Paredes (%)	Piso + techo (%)	Piso + Paredes (%)	Techo + Paredes (%)	Piso + techo + paredes (%)
Limpieza	1.055,20	1	1	1	1	1	1	1	1
Cimentación	17.344,74	15							15
Paredes	38.291,86	33			33		33	33	33
Puertas y ventanas	14.404,18	13			13		13	13	13
Pisos	563,44	0,5	0,5			0,5	0,5		0,5
Techos	14.354,06	12		12		12		12	12
Instalaciones hidrosanitarias	8.225,66	17	17		17	17	17	17	17
Instalación eléctrica	19.214,23	7	7	7	7	7	7	7	7
Limpieza final	1.750,00	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
<b>TOTAL</b>	<b>115.203,37</b>	<b>100</b>	<b>26,7</b>	<b>22</b>	<b>72</b>	<b>39</b>	<b>72,5</b>	<b>84</b>	<b>100,0</b>

<b>Vivienda de ladrillo clase precaria</b>									
Elemento agrupado	RMD								
	Presupuesto (Lps)	% del total	Piso (%)	Techo (%)	Paredes (%)	Piso + techo (%)	Piso + Paredes (%)	Techo + Paredes (%)	Piso + techo + paredes (%)
Limpieza	1.055,20	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Cimentación	17.344,74	13							13
Paredes	58.749,56	43			43		43	43	43
Puertas y ventanas	14.404,18	11			11		11	11	11
Pisos	563,44	0,4	0,4			0,4	0,4		0,4
Techos	14.354,06	11		11		11		11	11
Instalaciones hidrosanitarias	8.225,66	14	14		14	14	14	14	14
Instalación eléctrica	19.214,23	6	6	6	6	6	6	6	6
Limpieza final	1.750,00	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

<b>TOTAL</b>	<b>135.661,07</b>	<b>100</b>	<b>22,7</b>	<b>19</b>	<b>76,2</b>	<b>33</b>	<b>77</b>	<b>87</b>	<b>100,0</b>
--------------	-------------------	------------	-------------	-----------	-------------	-----------	-----------	-----------	--------------

### Vivienda de ladrillo clase social

Elemento agrupado	RMD								
	Presupuesto (Lps)	% del total	Piso (%)	Techo (%)	Paredes (%)	Piso + techo (%)	Piso + Paredes (%)	Techo + Paredes (%)	Piso + techo + paredes (%)
Limpieza	25.380,00	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05
Cimentación	35.452,56	7,06							7,06
Paredes	154.073,40	30,67			30,67		30,67	30,67	30,67
Puertas y ventanas	23.500,00	4,68			4,68		4,68	4,68	4,68
Pisos	114.526,38	22,80	22,80			22,80	22,80		22,80
Techos	86.597,34	17,24		17,24		17,24		17,24	17,24
Instalaciones hidrosanitarias	26.395,03	5,25	5,25		5,25	5,25	5,25	5,25	5,25
Instalación eléctrica	32.943,72	6,56	6,56	6,56	6,56	6,56	6,56	6,56	6,56
Limpieza final	3.500,00	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
<b>TOTAL</b>	<b>502.368,43</b>	<b>100</b>	<b>40,4</b>	<b>29,5</b>	<b>52,9</b>	<b>57,60</b>	<b>75,70</b>	<b>70,10</b>	<b>100,0</b>

### Vivienda de bloque precaria

Elemento agrupado	RMD								
	Presupuesto (Lps)	% del total	Piso (%)	Techo (%)	Paredes (%)	Piso + techo (%)	Piso + Paredes (%)	Techo + Paredes (%)	Piso + techo + paredes (%)
Limpieza	1.055,20	1	1	1	1	1	1	1	1
Cimentación	28.648,78	19							19
Paredes	56.202,95	38			38		38	38	38
Puertas y ventanas	14.988,53	10			10		10	10	10
Pisos	652,07	0,4	0,4			0,4	0,4		0,4
Techos	16.449,79	11		11		11		11	11
Instalaciones hidrosanitarias	21.257,48	14	14		14	14	14	14	14
Instalación eléctrica	8.225,69	6	6	6	6	6	6	6	6
Limpieza final	1.250	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>TOTAL</b>	<b>148.730,51</b>	<b>100</b>	<b>21,8</b>	<b>18</b>	<b>69</b>	<b>33</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>100,0</b>

## Vivienda de bloque social

Elemento agrupado	RMD								
	Presupuesto (Lps)	% del total	Piso (%)	Techo (%)	Paredes (%)	Piso + techo (%)	Piso + Paredes (%)	Techo + Paredes (%)	Piso + techo + paredes (%)
Limpieza	25.380,00	<b>4,93</b>	4,93	4,93	4,93	4,93	4,93	4,93	4,93
Cimentación	35.452,56	<b>6,89</b>							6,89
Paredes	166.173,40	<b>32,30</b>			32,30		32,30	32,30	32,30
Puertas y ventanas	23.500,00	<b>4,57</b>			4,57		4,57	4,57	4,57
Pisos	114.526,38	<b>22,26</b>	22,26			22,26	22,26		22,26
Techos	86.597,34	<b>16,83</b>		16,83		16,83		16,83	16,83
Instalaciones hidrosanitarias	26.395,03	<b>5,13</b>	5,13		5,13	5,13	5,13	5,13	5,13
Instalación eléctrica	32.943,72	<b>6,40</b>	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40
Limpieza final	3.500,00	<b>0,68</b>	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
<b>TOTAL</b>	<b>148.730,51</b>	<b>100</b>	<b>39,40</b>	<b>28,84</b>	<b>54,01</b>	<b>56,23</b>	<b>76,27</b>	<b>70,84</b>	<b>99,99</b>

Anexo 9. Valores de las curvas de vulnerabilidad ante deslizamientos para los distintos tipos de vivienda.

<b>Porcentaje acumulado de casos</b>				
<b>RMD</b>	<b>Vivienda madera</b>	<b>Vivienda bloque</b>	<b>Vivienda ladrillo popular</b>	<b>Vivienda ladrillo precaria</b>
<b>0,00</b>	0,001	0,001	0,001	0,001
<b>0,05</b>	0,201	0,319	0,197	0,286
<b>0,10</b>	0,255	0,377	0,292	0,324
<b>0,15</b>	0,303	0,424	0,347	0,348
<b>0,20</b>	0,361	0,476	0,394	0,37
<b>0,25</b>	0,398	0,511	0,44	0,389
<b>0,30</b>	0,439	0,544	0,473	0,397
<b>0,35</b>	0,465	0,571	0,508	0,418
<b>0,40</b>	0,487	0,601	0,548	0,437
<b>0,45</b>	0,523	0,63	0,581	0,449
<b>0,50</b>	0,548	0,661	0,608	0,463
<b>0,55</b>	0,581	0,679	0,639	0,473
<b>0,60</b>	0,612	0,705	0,668	0,493
<b>0,65</b>	0,637	0,728	0,705	0,512
<b>0,70</b>	0,672	0,761	0,733	0,529
<b>0,75</b>	0,705	0,789	0,758	0,539
<b>0,80</b>	0,74	0,816	0,796	0,561
<b>0,85</b>	0,776	0,845	0,84	0,583
<b>0,90</b>	0,828	0,875	0,883	0,61
<b>0,95</b>	0,87	0,913	0,923	0,661
<b>1,00</b>	1,00	1,00	1,00	1,00

Anexo 10. Valores de precipitación y periodo de retorno para los episodios de deslizamientos considerados\*.

		ND	1 día	2 días	3 días	5 días	7 días	10 días	15 días	30 días	60 días	MX	MXE	PROME
31/10/1998	P (mm)	29	129,30	162,70	176,40	202,50	212,00	252,20	279,90	401,00	564,00			
	PR (años)		124,95	36,54	25,94	29,94	12,04	13,70	9,32	11,46	10,32	<b>124,95</b>	<b>125</b>	
9/29/1989	P (mm)	20	28,50	43,50	72,50	114,20	134,20	185,70	258,30	318,80	413,00			
	PR (años)		1,00	1,04	1,22	2,12	1,81	3,09	6,00	3,17	2,36	<b>6,00</b>	<b>6</b>	
9/30/1989	P (mm)	13	3,10	31,60	46,60	116,00	133,00	151,80	236,30	314,50	416,10			
	PR (años)		1,00	1,00	1,01	2,22	1,77	1,69	3,91	2,98	2,42	<b>3,91</b>	<b>4</b>	
9/25/1989	P (mm)	9	1,30	17,00	21,30	35,80	87,10	120,30	187,30	244,10	317,10			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,05	1,16	1,73	1,34	1,25	<b>1,73</b>	<b>2</b>	
8/28/1995	P (mm)	7	8,30	28,10	50,50	110,40	113,90	125,80	182,40	260,50	329,80			
	PR (años)		1,00	1,00	1,02	1,95	1,31	1,22	1,62	1,55	1,33	<b>1,95</b>	<b>2</b>	
9/18/1993	P (mm)	6	24,60	50,90	51,30	58,30	62,70	114,40	126,20	132,60	213,90			
	PR (años)		1,00	1,09	1,02	1,02	1,00	1,12	1,04	1,00	1,01	<b>1,12</b>		
9/21/1989	P (mm)	6	12,90	49,90	64,20	84,30	122,50	123,20	165,90	241,60	297,90			
	PR (años)		1,00	1,08	1,11	1,22	1,48	1,19	1,34	1,31	1,16	<b>1,48</b>	<b>1</b>	
9/27/1989	P (mm)	4	29,00	69,40	70,70	90,70	105,20	167,80	215,30	288,80	369,50			
	PR (años)		1,00	1,44	1,19	1,33	1,19	2,20	2,68	2,12	1,69	<b>2,68</b>	<b>3</b>	
8/29/1988	P (mm)	4	33,80	39,20	41,30	75,80	83,40	117,30	121,10	201,00	287,20			
	PR (años)		1,01	1,02	1,00	1,11	1,03	1,14	1,03	1,06	1,12	<b>1,14</b>		
8/27/1988	P (mm)	4	2,10	27,30	36,60	44,20	63,80	78,10	85,80	163,30	249,10			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,03	<b>1,03</b>		
10/3/1997	P (mm)	3	3,30	3,30	7,50	20,70	65,00	78,00	97,30	131,10	181,40			<b>1,3</b>
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>		
9/3/1995	P (mm)	3	0,00	27,50	79,40	120,90	160,30	220,90	266,50	406,20	480,10			
	PR (años)		1,00	1,00	1,35	2,51	3,16	6,62	7,08	12,49	4,36	<b>12,49</b>		
8/24/1995	P (mm)	3	41,50	45,00	45,00	45,60	63,80	93,50	155,00	201,00	306,70			
	PR (años)		1,08	1,04	1,01	1,00	1,00	1,02	1,21	1,06	1,19	<b>1,21</b>		
6/18/1992	P (mm)	3	30,10	30,40	39,40	45,90	49,90	50,10	62,50	83,30	169,50			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>		
9/20/1989	P (mm)	3	37,00	51,30	62,60	84,50	109,90	151,50	153,00	230,70	286,60			
	PR (años)		1,03	1,09	1,09	1,22	1,25	1,68	1,19	1,21	1,12	<b>1,68</b>	<b>2</b>	

		ND	1 día	2 días	3 días	5 días	7 días	10 días	15 días	30 días	60 días	MX	MXE	PROME
9/1/1989	P (mm)	3	37,00	51,30	62,60	84,50	109,90	151,50	153,00	230,70	286,60			
	PR (años)		1,03	1,09	1,09	1,22	1,25	1,68	1,19	1,21	1,12	<b>1,68</b>	<b>2</b>	
8/31/1988	P (mm)	3	13,00	14,20	48,00	55,50	90,00	108,20	132,80	212,00	277,60			
	PR (años)		1,00	1,00	1,02	1,01	1,06	1,08	1,06	1,10	1,09	<b>1,10</b>		
9/9/2012	P (mm)	2	39,30	50,90	52,90	52,90	52,90	67,10	125,20	170,30	280,90		<b>5</b>	<b>1,95</b>
	PR (años)		1,05	1,09	1,03	1,01	1,00	1,00	1,04	1,01	1,10	<b>1,10</b>		
10/5/2008	P (mm)	2	11,20	45,40	45,40	53,40	73,70	140,70	167,10	224,30	378,70			
	PR (años)		1,00	1,05	1,01	1,01	1,01	1,44	1,35	1,17	1,80	<b>1,80</b>		
10/3/1997	P (mm)	2	3,30	3,30	7,50	20,70	65,00	78,00	97,30	131,10	181,40			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>		
9/2/1995	P (mm)	2	27,50	79,40	98,60	152,00	180,10	262,40	277,80	406,20	480,10			
	PR (años)		1,00	1,82	2,06	6,02	5,15	17,47	8,92	12,49	4,36	<b>17,47</b>		
6/1/1993	P (mm)	2	44,80	70,10	81,70	132,40	145,60	150,60	190,50	296,20	330,70			
	PR (años)		1,15	1,46	1,41	3,40	2,28	1,66	1,81	2,33	1,33	<b>3,40</b>		
5/21/1993	P (mm)	2	0,00	13,00	15,30	41,20	41,20	42,70	127,30	152,30	180,10			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,04	1,00	1,00	<b>1,04</b>		
8/5/1989	P (mm)	2	0,00	0,00	6,40	14,60	14,60	32,40	36,90	43,20	97,40			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>		
9/20/1988	P (mm)	2	21,90	25,20	25,80	128,50	145,90	176,70	196,90	333,70	443,50			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	3,06	2,29	2,59	1,99	3,94	3,08	<b>3,94</b>		
9/6/1988	P (mm)	2	0,20	0,60	1,00	18,80	41,80	82,20	126,40	201,10	269,10			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,04	1,06	1,07	<b>1,07</b>		
8/26/1988	P (mm)	2	25,20	34,50	36,50	52,70	76,00	77,30	98,40	162,40	254,90			
	PR (años)		1,00	1,01	1,00	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00	1,04	<b>1,04</b>		
9/22/1987	P (mm)	2	1,20	96,90	105,00	127,80	133,60	133,70	142,10	185,60	256,70			
	R (años)		1,00	3,07	2,44	3,00	1,79	1,32	1,11	1,02	1,04	<b>3,07</b>		
7/16/1987	P (mm)	2	0,00	6,40	23,40	43,80	44,80	48,70	74,90	125,50	218,40			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	<b>1,01</b>		
5/4/1987	P (mm)	2	9,60	29,60	29,70	30,80	30,80	30,80	30,80	33,40	65,90			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>		
11/6/1985	P (mm)	2	0,00	0,70	1,10	12,30	24,50	37,90	72,20	103,70	208,70			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>		
8/10/1985	P (mm)	2	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10	6,40	24,20	55,50	80,80			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>		

		ND	1 día	2 días	3 días	5 días	7 días	10 días	15 días	30 días	60 días	MX	MXE	PROME
9/3/1984	P (mm)	2	14,70	59,60	76,30	107,50	113,40	113,90	117,00	143,30	341,90			
	PR (años)		1,00	1,21	1,29	1,82	1,31	1,11	1,02	1,00	1,42	<b>1,82</b>		
6/5/1984	P (mm)	2	50,80	56,60	57,60	62,90	108,70	128,50	160,60	160,60	200,40			
	PR (años)		1,33	1,16	1,05	1,03	1,23	1,25	1,27	1,00	1,00	<b>1,33</b>		
6/28/1983	P (mm)	2	0,10	32,60	33,10	33,10	33,10	138,00	207,20	327,40	332,70			
	PR (años)		1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,39	2,34	3,59	1,35	<b>3,59</b>		
6/22/1983	P (mm)	2	0,00	23,10	85,50	108,70	120,10	174,10	247,70	294,30	299,90			
	PR (años)		1,00	1,00	1,52	1,87	1,43	2,47	4,87	2,28	1,16	<b>4,87</b>		
6/17/1983	P (mm)	2	0,50	11,40	61,10	65,40	65,60	139,00	139,10	186,30	191,20			
	PR (años)		1,00	1,00	1,08	1,04	1,00	1,41	1,09	1,02	1,00	<b>1,41</b>		
6/13/1980	P (mm)	2	46,10	50,90	86,30	86,60	88,40	149,50	203,60	350,80	371,30			
	PR (años)		1,18	1,09	1,54	1,26	1,05	1,63	2,21	5,11	1,71	<b>5,11</b>		
10/3/2012	P (mm)	1	10,20	23,50	27,10	27,10	31,20	31,30	42,40	101,90	303,20		<b>4</b>	<b>2,27</b>
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,18	<b>1,18</b>		
8/29/2011	P (mm)	1	5,80	35,30	35,30	38,50	39,90	54,20	60,70	117,00	286,30			
	PR (años)		1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,11	<b>1,11</b>		
5/25/2009	P (mm)	1	11,00	14,50	28,30	28,50	28,50	47,30	49,20	81,90	83,00			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>		
10/20/2008	P (mm)	1	6,10	24,90	37,90	61,20	62,70	94,40	114,50	281,60	424,30			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,03	1,00	1,03	1,01	1,95	2,60	<b>2,60</b>		
9/9/2008	P (mm)	1	0,00	0,00	0,10	26,80	29,20	76,30	106,30	164,50	304,40			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00	1,18	<b>1,18</b>		
11/1/1998	P (mm)	1	89,70	219,00	252,40	283,30	294,20	341,40	351,40	488,90	653,70			
	PR (años)		9,75	349,02	404,25	430,33	121,38	119,42	42,65	50,68	27,28	<b>430,33</b>		
7/30/1996	P (mm)	1	1,60	47,50	57,30	57,40	61,00	75,70	87,50	122,80	147,50			
	PR (años)		1,00	1,06	1,05	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,06</b>		
9/30/1995	P (mm)	1	3,10	10,70	10,90	38,10	85,50	96,40	119,20	240,20	571,30			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,04	1,03	1,02	1,30	11,16	<b>11,16</b>		
8/27/1995	P (mm)	1	19,80	42,20	60,60	105,60	106,20	124,40	185,60	252,20	321,50			
	PR (años)		1,00	1,03	1,08	1,75	1,20	1,21	1,69	1,43	1,27	<b>1,75</b>		
9/28/1989	DP (mm)	1	15,00	44,00	84,40	101,40	107,30	171,50	230,10	302,50	384,50			
	PR (años)		1,00	1,04	1,49	1,61	1,22	2,35	3,49	2,53	1,88	<b>3,49</b>		
9/11/1989	P (mm)	1	41,20	41,20	42,70	42,70	45,10	50,80	90,00	130,20	176,70			
	PR (años)		1,08	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,08</b>		



		ND	1 día	2 días	3 días	5 días	7 días	10 días	15 días	30 días	60 días	MX	MXE	PROME
6/14/1988	P (mm)	1	4,00	48,20	87,80	105,20	105,20	133,00	171,20	290,50	298,20			
	PR (años)		1,00	1,06	1,59	1,74	1,19	1,31	1,41	2,17	1,16	<b>2,17</b>		
6/3/1985	P (mm)	1	19,10	22,10	31,10	34,50	35,30	35,60	35,60	83,20	142,70			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,00</b>		
9/6/1984	P (mm)	1	2,50	4,30	13,60	73,20	121,10	127,00	127,50	148,80	333,30			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,09	1,45	1,24	1,04	1,00	1,35	<b>1,45</b>		
6/4/1984	P (mm)	1	5,80	6,80	12,10	57,60	58,90	109,70	109,80	110,50	150,10			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,02	1,00	1,09	1,01	1,00	1,00	<b>1,09</b>		
6/29/1983	P (mm)	1	4,40	4,50	37,00	37,50	37,50	123,00	207,30	331,80	337,10			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,19	2,34	3,83	1,38	<b>3,83</b>		
6/15/1983	P (mm)	1	49,70	54,00	54,00	54,20	127,60	127,60	156,70	174,90	182,60			
	PR (años)		1,29	1,12	1,04	1,01	1,61	1,24	1,23	1,01	1,00	<b>1,61</b>		
10/11/1980	P (mm)	1	24,20	28,20	37,20	63,70	68,70	183,50	201,40	308,50	382,00			
	PR (años)		1,00	1,00	1,00	1,03	1,01	2,96	2,13	2,75	1,84	<b>2,96</b>		
10/3/1980	P (mm)	1	47,50	47,50	47,60	56,50	65,40	93,90	99,20	209,40	253,70			
	PR (años)		1,22	1,06	1,01	1,01	1,00	1,02	1,00	1,09	1,04	<b>1,22</b>		

\* *ND*, número de deslizamientos, *P (mm)*, precipitación en mm para los distintos indicadores de precipitación considerados para cada uno de los episodios de deslizamiento, *PR (años)*, periodo de retorno para cada episodio de deslizamiento, *MX*, máximo de los periodos de retorno para los distintos indicadores, para cada episodio de deslizamiento, *MXE*, máximo para cada tipo de evento, definido por el número de deslizamientos, el valor se redondeó y se excluyeron del cálculo valores que se consideraron anómalos, marcados en amarillo, *PROME*, promedio de periodo de retorno por tipo de evento, redondeado y estimado excluyendo valores anómalos.

Anexo 11. Principales indicadores de las unidades homogéneas y resultados de la modelación probabilista de pérdidas para la condición de FS < 1\*

	Tipo_Viv	Pob 2014	Ha	Po01/viv01	Pob2020	Viv20	Den20VivHa	AHacol	Exviv20	Expob20	% Areaviv	Arevivm2	valorm2	ExpUSD	P/FS < 1	P/FS < 1/ ExpUSD (%)	Pixeles	PFS < 1/pix
1	Residencial	721	41,05	2,78	789	283	9,37	0,01	0	0	0,7	108,5	1246	135191	50308,61	37	2	25154,3
2	Popular	3337	18,07	4,05	3653	901	60,38	0,11	7	28	0,7	770,7	357,48	275509,8	123984,75	45	9	13776,08
3	Precaria	2696	11,23	4,55	2951	648	66,32	1,44	96	437	0,8	11593,84	46,27	536447	268769,24	50	145	1853,58
4	Precaria	1126	4,69	4,55	1233	271	75,66	1,61	123	560	0,8	12952,32	46,27	599303,9	305687,45	51	156	1959,53
5	Popular	13294	55,39	4,17	14553	3485	88,44	0,24	22	92	0,7	1721,65	357,48	615455,4	271482,58	44	26	10441,64
6	Precaria	25	3,30	4	27	7	2,42	2,02	5	20	0,8	16172,8	46,27	748315,5	364496,51	49	204	1786,74
7	Precaria	184	8,78	5	201	40	5,07	2,21	11	55	0,8	17710,96	46,27	819486,1	419641,92	51	224	1873,40
8	Precaria	31	4,11	4	34	9	2,47	3,51	9	36	0,8	28151,52	46,27	1302571	675763,76	52	354	1908,93
9	Popular	7	0,90	4	8	2	2,64	0,75	2	8	0,7	5292,14	357,48	1891834	872674,01	46	75	11635,65
10	Popular	1811	7,55	4,93	1983	402	65,78	0,85	56	276	0,7	5958,33	357,48	2129984	934120,14	44	80	11676,5
11	Media	10627	162,71	3,82	11634	3045	27,57	0,56	15	57	0,6	3369	940,5	3168545	143927,00	45	54	26653,24
12	Popular	7232	39,09	4,44	7917	1780	62,69	1,67	105	467	0,7	11695,39	357,48	4180868	1957135,25	47	165	11861,43
13	Precaria	7301	32,66	4,55	7993	1756	79,75	1,96	1194	5435	0,8	119748,5	46,27	5540763	2772118,25	50	1493	1856,74
14	Precaria	6458	26,91	4,55	7070	1553	75,07	20,59	1546	7038	0,8	164766,8	46,27	7623760	3801063,85	50	2065	1840,70
15	Media	123	1,88	3,82	135	35	18,41	1,45	27	103	0,6	8739,18	940,5	8219199	3646866,60	44	144	25325,46
16	Residencial	16	2,13	3,33	18	5	2,88	1,55	5	17	0,7	10917,41	1246	13603093	5027287,90	37	151	33293,3
17	Media	4819	33,05	3,66	5276	1438	57,31	2,81	161	591	0,6	16888,02	940,5	15883183	7194047,13	45	288	24979,33
18	Popular	4263	84,89	3,15	4667	1480	21,51	6,35	137	432	0,7	44509,57	357,48	15911281	6817936,10	43	633	10770,83
19	Precaria	2749	49,98	4,50	3009	668	14,94	43,52	651	2934	0,8	348212,6	46,27	16111797	8057914,99	50	4338	1857,51
20	Precaria	18217	75,90	4,55	19943	4382	78,19	52,55	4110	18705	0,8	420440,8	46,27	19453796	9963295,12	51	5245	1899,58
21	Popular	87894	488,30	4,47	96221	21508	51,12	8,33	426	1906	0,7	58338,07	357,48	20854693	8869871,45	43	837	10597,22
22	Precaria	22492	408,94	4,50	24623	5467	16,90	58,79	994	4477	0,8	470391,8	46,27	21765029	11026306,02	51	5876	1876,49
23	Precaria	102207	425,86	4,55	111890	24583	71,70	98,12	7036	32024	0,8	784993,2	46,27	36321635	17926446,24	49	9822	1825,13
24	Precaria	36380	162,73	4,55	39827	8750	65,39	123,86	8100	36868	0,8	990946,9	46,27	45851113	22835928,90	50	12413	1839,67
25	Popular	3945	32,87	4,05	4319	1065	39,97	24,64	985	3996	0,7	172523,2	357,48	61673594	27840696,23	45	2477	11239,68
26	Precaria	1072	248,68	4,95	1174	237	1,07	183,35	197	977	0,8	1466827	46,27	67870085	34827286,39	51	18353	1897,63
27	Residencial	6941	481,73	3,31	7599	2293	5,07	17,42	88	292	0,7	121951,2	1246	1.52E+08	52984739,64	35	1736	30521,16
28	Residencial	3348	31,00	3,12	3665	1174	44,72	24,69	1104	3446	0,7	172853,8	1246	2.15E+08	78570440,29	36	2452	32043,41
29	Popular	49944	208,10	4,17	54676	13096	85,68	89,75	7691	32111	0,7	628308,1	357,48	2.25E+08	98522171,12	44	8918	11047,56
30	Media	10092	69,22	3,66	11048	3011	57,71	51,40	2967	10887	0,6	308450,6	940,5	2.9E+08	126796325,45	44	5131	24711,82
<b>Promedio</b>																<b>46</b>		
<b>Desviación típica</b>																<b>5</b>		

*\*Tipo\_Viv*, tipo de barrio por calidad de vivienda, *Pob 2014*, población proyectada al año 2014, *Ha*, hectáreas totales de la unidad homogénea, *Po01/viv01*, relación población vivienda para el año 2001, *Pob2020*, población proyectada a 2020, *Viv20*, número de viviendas proyectadas para 2020, con base a las relaciones población/vivienda de 2001, *Den20VivHa*, densidad de viviendas por Ha para 2020 para toda la unidad homogénea, *AHacol*, hectáreas de la unidad homogénea sobre el coluvión, *Exviv20*, número de viviendas expuestas, situadas sobre el coluvión y suelos para 2020, *Expob20*, población expuesta a los deslizamientos para 2020 (situada sobre el coluvión y suelos residuales), *%Areaviv*, porcentaje del área de vivienda del total de la superficie de la unidad, *Arevivm2*, área de vivienda en m<sup>2</sup> que se sitúa sobre el coluvión y suelos residuales, *valorm2*, valores para 2020 del m<sup>2</sup> de vivienda para la unidad homogénea, *ExpUSD*, valor total en dólares americanos de las viviendas expuestas a los deslizamientos en la unidad, *P/FS < 1*, valor que se podría perder del valor expuesto, estimado en base al análisis probabilista de la vulnerabilidad, *P/FS < 1/ExpUSD*, porcentaje que representa el valor que se podría perder para la condición FS<1 con relación al valor total expuesto, *Pixeles*, número de pixeles de la unidad homogénea, *PFS < 1/pix*, valor de la pérdida probable por pixel para cada unidad.

Anexo 12. Microcuencas urbanas con sus principales parámetros.

ID	Área (m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Desnivel (m)	Pendiente cauce principal (m/m)	Tiempo de Concentración (min)	Intensidad (mm/h)
1	791075,72	205	70	0,34	1,78	218,22
2	862720,15	1013,50	140	0,13	8,61	159,10
3	727712,77	987,84	220	0,22	7,02	169,67
4	1192335,68	1288,75	210	0,16	9,72	152,53
5	238677,64	480,18	90	0,18	4,31	191,54
6	83838,08	248,05	50	0,20	2,52	209,65
7	647354,39	785,81	190	0,24	5,70	179,60
8	886600,14	1087,80	160	0,14	8,87	157,48
9	526492,14	873,65	130	0,14	7,46	166,61
10	176977,76	508,60	140	0,27	3,88	195,54
11	301714,07	307,44	80	0,26	2,69	207,70
12	157502,84	339,20	190	0,56	2,16	213,65
13	157121,36	233,49	20	0,08	3,34	200,94
15	575544,36	401,86	90	0,224	3,50	199,23
14	94167,48	191,04	30	0,15	2,27	212,44
16	539946,25	1126,66	270	0,24	7,55	165,98
17	1612793,35	1488,12	330	0,22	9,64	152,98
19	1189905,61	1488,27	220	0,14	11,27	144,24
18	335034,75	989,89	190	0,19	7,45	166,69
20	1533563,39	920,51	200	0,21	6,72	171,84
<b>Promedio</b>	<i>631553,90</i>	<i>748,29</i>	<i>151,00</i>	<i>0,22</i>	<i>5,82</i>	<i>181,78</i>
<b>Desviación típica</b>	<i>468759,74</i>	<i>435,91</i>	<i>82,07</i>	<i>0,10</i>	<i>2,97</i>	<i>23,89</i>

Anexo 13. Drenajes trazados con sus principales parámetros y su presupuesto\*

ID	Drenaje	Area (m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Desnivel (m)	Pendiente (m/m)	Micro	Intensidad (mm/h)	Caudal (m <sup>3</sup> /seg)	Seccion canal (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/seg)	Vm Manning Strikler	Precio (m/\$)	Presupuesto (\$)
1	Secundario	12598,42	237,84	3	0,013	9	166,61	0,41	0,25	1,63	1,749	187,89	44687,60
2	Principal	32423,19	307,55	40	0,13	16	165,98	1,05	0,25	4,19	5,532	187,89	57784,90
3	Secundario	9388,77	140,22	40	0,285	11	207,70	0,8	0,12	3,16	6,128	157,73	22116,81
4	Secundario	8721,53	164,64	3	0,018	16	165,98	0,28	,2	1,41	1,809	173,98	28644,57
5	Secundario	12466	441,83	20	0,045	2	159,10	0,39	0,15	2,57	2,580	163,64	72303,49
6	Secundario	8302,54	167,98	5	0,03	9	166,61	0,27	0,15	1,79	2,107	163,64	27489,90
7	Secundario	60612,56	544,22	20	0,037	2	159,10	1,88	0,64	2,93	4,017	249,55	135812,88
8	Secundario	12113,53	71,45	5	0,07	5	191,54	0,45	0,15	3,01	3,218	163,64	11692,69
9	Secundario	27942,58	152,61	30	0,197	2	159,10	0,86	0,25	3,46	6,810	187,89	28674,69
10	Secundario	103149,1	862,02	80	0,093	2	159,10	3,19	0,64	4,99	6,369	249,55	215120,57
11	Secundario	12405,45	228,93	5	0,022	2	159,10	0,38	0,2	1,92	1,999	173,98	39829,32
12	Secundario	51633,51	559,54	60	0,107	2	159,10	1,60	0,3	5,32	5,405	199,61	111692,86
13	Secundario	198525,7	647,85	60	0,093	2	159,10	6,14	1	6,14	7,281	318,75	206503,14
14	Secundario	19582,52	225,06	10	0,044	2	159,10	0,61	0,25	2,42	3,218	187,89	42286,61
15	Secundario	134420,9	1086,27	90	0,083	2	159,10	4,16	0,72	5,78	6,311	264,09	286876,26
16	Secundario	10304,53	235,32	10	0,042	2	159,10	0,32	0,15	2,13	2,493	163,64	38509,69
17	Secundario	9317,10	170,02	30	0,176	6	209,65	0,38	0,12	3,17	4,815	157,73	26818,10
18	Secundario	61416,81	386,38	40	0,104	7	179,60	2,14	0,42	5,11	5,696	221,35	85528,70
19	Secundario	7533,31	161,20	5	0,031	2	159,10	0,23	0,12	1,94	2,021	157,73	25426,45
20	Principal	727712,8	1526,51	150	0,098	3	169,67	2,01	2,56	9,38	10,250	597,32	911818,93
21	Principal	727712,8	554,18	130	0,235	3	169,67	2,01	1,96	12,25	14,651	490,18	271648,63
22	Secundario	12611,46	287,02	5	0,017	3	169,67	0,42	0,25	1,66	2,000	187,89	53928,36
23	Secundario	12919,48	323,53	5	0,015	3	169,67	0,43	0,25	1,70	1,879	187,89	60788,06
24	Secundario	12136,98	381,83	5	0,013	3	169,67	0,40	0,25	1,60	1,749	187,89	71740,46
25	Secundario	1897,34	80,86	5	0,062	9	166,61	0,06	0,12	0,51	2,858	157,73	12755,42
26	Secundario	26986,16	400,87	20	0,05	3	169,67	0,89	0,3	2,97	3,695	199,61	80018,72
27	Principal	52579,21	393,31	60	0,153	8	157,48	1,61	0,3	5,37	6,463	199,61	78510,25
28	Principal	647354,4	928,07	230	0,248	7	179,60	22,61	1,96	11,53	15,051	490,18	454921,99
29	Secundario	48462,44	88,2	5	0,057	8	157,48	1,48	0,42	3,53	4,217	221,35	19523,41
30	Secundario	16871,63	54,61	5	0,092	3	169,67	0,56	0,2	2,78	4,089	173,98	9501,68
31	Secundario	17311,67	220,82	20	0,091	9	166,61	0,56	0,2	2,80	4,066	173,98	38418,17
32	Secundario	17140,7	392,31	20	0,051	3	169,67	0,57	0,25	2,26	3,465	187,89	73709,50
33	Secundario	16611,61	116,13	5	0,043	3	169,67	0,55	0,25	2,19	3,182	187,89	21820,63

ID	Drenaje	Area (m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Desnivel (m)	Pendiente (m/m)	Micro	Intensidad (mm/h)	Caudal (m <sup>3</sup> /seg)	Seccion canal (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/seg)	Vm Manning Strikler	Precio (m/\$)	Presupuesto (\$)
34	Secundario	14494,03	118,10	5	0,042	3	169,67	0,48	0,2	2,39	2,763	173,98	20547,77
35	Secundario	12372,89	56,93	5	0,088	3	169,67	0,41	0,12	3,40	3,405	157,73	8980,95
36	Secundario	71793,83	393,18	20	0,051	3	169,67	2,37	0,64	3,70	4,717	249,55	98120,13
37	Secundario	42276,82	459,03	70	0,152	3	169,67	1,39	0,3	4,65	6,442	199,61	91628,39
38	Secundario	29624,77	117,54	10	0,085	3	169,67	0,98	0,25	3,91	4,473	187,89	22084,05
39	Secundario	43097,85	496,89	5	0,01	3	169,67	1,42	0,72	1,97	2,190	264,09	131225,07
40	Secundario	112556,5	731,38	40	0,055	4	152,53	3,34	0,72	4,64	5,137	264,09	193152,74
41	Secundario	45942,07	603,96	5	0,008	3	169,67	1,52	0,81	1,87	2,004	284,82	172021,60
42	Secundario	36623,89	90,78	2	0,022	17	152,98	1,09	0,42	2,59	2,620	221,35	20096,28
43	Secundario	68025,21	595,83	10	0,017	4	152,53	2,02	0,72	2,80	2,856	264,09	157354,58
44	Secundario	36963,29	202,84	30	0,148	4	152,53	1,10	0,25	4,39	5,903	187,89	38111,80
45	Secundario	20465,2	195,09	20	0,103	7	179,60	0,71	0,25	2,86	4,924	187,89	36655,87
46	Secundario	37977,54	381,16	70	0,184	4	152,53	1,13	0,25	4,51	6,581	187,89	71614,57
47	Secundario	69061,91	451,73	90	0,199	4	152,53	2,05	0,3	6,83	7,371	199,61	90171,62
48	Secundario	66867,45	574,89	100	0,174	4	152,53	1,98	0,3	6,61	6,893	199,61	114755,91
49	Secundario	135448	397,42	80	0,201	4	152,53	4,02	0,64	6,28	9,364	249,55	99178,73
50	Secundario	98766,36	573,16	100	0,174	4	152,53	2,93	0,42	6,97	7,368	221,35	126872,73
51	Secundario	138669,1	606,61	80	0,132	4	152,53	4,11	0,64	6,43	7,588	249,55	151382,39
52	Secundario	181127,7	974,28	170	0,174	4	152,53	5,37	0,64	8,39	8,712	249,55	243133,97
53	Secundario	80736,94	639,28	100	0,156	4	152,53	2,39	0,36	6,65	6,753	210,50	134568,15
54	Principal	238677,6	732,06	130	0,178	5	191,54	8,89	1	8,89	10,073	318,75	233346,68
55	Secundario	33084,26	431,06	30	0,07	2	159,10	1,02	0,3	3,41	4,372	199,61	86045,63
56	Principal	9609,22	127,93	20	0,156	5	191,54	0,36	0,12	2,98	4,533	157,73	20178,95
57	Secundario	4455,55	110,98	10	0,09	5	191,54	0,17	0,12	1,38	3,443	157,73	17506,23
58	Secundario	83838,08	448,59	70	0,156	6	209,65	3,42	0,64	5,34	8,249	249,55	111948,02
59	Secundario	10051,01	122,38	5	0,041	5	191,54	0,37	0,16	2,34	2,598	165,98	20313,99
60	Secundario	12418,11	169,67	10	0,059	5	191,54	0,46	0,2	2,31	3,274	173,98	29519,33
61	Secundario	15188,59	166,30	5	0,03	2	159,10	0,47	0,25	1,88	2,657	187,89	31246,28
62	Secundario	75667,95	540,58	80	0,148	4	152,53	2,24	0,36	6,23	6,578	210,50	113793,02
63	Secundario	28232,95	311,87	5	0,016	5	191,54	1,05	0,64	1,64	2,642	249,55	77829,85
64	Secundario	18553,16	229,24	10	0,044	5	191,54	0,69	0,25	2,76	3,218	187,89	43071,59
65	Secundario	23311	329,54	5	0,015	5	191,54	0,87	0,42	2,07	2,163	221,35	72946,95
66	Secundario	22621,35	15548	5	0,032	17	152,98	0,67	0,25	2,69	2,745	187,89	29213,73
67	Secundario	21491,36	357,86	20	0,056	5	191,54	0,80	0,25	3,20	3,631	187,89	67237,60
68	Secundario	31192,17	170,36	30	0,176	2	159,10	0,96	0,25	3,86	6,437	187,89	32008,53
69	Secundario	7027,14	62,31	20	0,321	6	209,65	0,29	0,12	2,39	6,503	157,73	9828,91

ID	Drenaje	Area (m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Desnivel (m)	Pendiente (m/m)	Micro	Intensidad (mm/h)	Caudal (m <sup>3</sup> /seg)	Seccion canal (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/seg)	Vm Manning Strikler	Precio (m/\$)	Presupuesto (\$)
70	Secundario	2713,37	79,03	20	0,253	6	209,65	0,11	0,12	0,92	5,773	157,73	12465,51
71	Secundario	12215,27	142,66	20	0,14	6	209,65	0,50	0,12	4,15	4,295	157,73	22503,09
72	Secundario	15643,51	125,54	20	0,159	6	209,65	0,64	0,15	4,25	4,850	163,64	20543,87
73	Secundario	10646,07	223,45	40	0,179	6	209,65	0,43	0,12	3,62	4,856	157,73	35244,95
74	Secundario	7739,7	94,34	5	0,053	6	209,65	0,32	0,12	2,63	2,642	157,73	14880,35
75	Secundario	27644,76	233,74	60	0,257	7	179,60	0,97	0,25	3,86	7,778	187,89	43917,08
76	Secundario	31684,02	185,19	20	0,108	7	179,60	1,11	0,3	3,69	5,430	199,61	36966,87
77	Secundario	34759,85	521,08	50	0,096	7	179,60	1,21	0,3	4,05	5,120	199,61	104015,16
78	Secundario	53196,43	249,28	40	0,16	7	179,60	1,86	0,3	6,19	6,610	199,61	49759,64
79	Secundario	31072,18	194,06	20	0,103	4	152,53	0,92	0,25	3,69	4,924	187,89	36462,73
80	Secundario	16415,27	203,72	30	0,147	7	179,60	0,57	0,15	3,82	4,664	163,64	33337,89
81	Secundario	77675,16	606,54	110	0,181	7	179,60	2,71	0,42	6,46	7,515	221,35	134260,64
82	Secundario	73580,62	482,91	50	0,104	2	159,10	2,28	0,42	5,42	5,696	221,35	106894,44
83	Secundario	32480,4	197,95	20	0,101	7	179,60	1,13	0,3	3,78	5,251	199,61	39514,32
84	Secundario	27602,4	303,54	100	0,329	7	179,60	0,96	0,2	4,82	7,732	173,98	52811,09
85	Secundario	81439,4	869,32	280	0,322	7	179,60	2,84	0,36	7,90	9,703	210,50	182990,95
86	Secundario	9358,06	111,97	40	0,357	7	179,60	0,33	0,12	2,72	6,858	157,73	17660,96
87	Secundario	20037,69	192,61	10	0,052	6	209,65	0,82	0,25	3,27	3,499	187,89	36189,54
88	Interceptor	157121,4	1752,33	130	0,074	13	200,94	6,14	1	6,14	6,495	318,75	558556,78
89	Principal	176977,8	533,04	130	0,244	10	195,54	6,73	0,72	9,35	10,820	264,09	140771,99
90	Principal	526492,1	1026,54	130	0,127	9	166,61	17,06	1,96	8,70	10,771	490,18	503188,89
91	Secundario	13189,3	169,21	5	0,03	11	207,70	0,53	0,25	2,13	2,657	187,89	31792,65
92	Secundario	73387,54	487,24	30	0,062	3	169,67	2,42	0,64	3,78	5,201	249,55	121593,19
93	Secundario	16414,17	246,52	20	0,081	9	166,61	0,53	0,2	2,66	3,837	173,98	42890,30
94	Secundario	15100,6	245,81	30	0,122	9	166,61	0,49	0,15	3,26	4,249	163,64	40226,48
95	Secundario	27246,21	146,04	5	0,034	9	166,61	0,88	0,3	2,94	3,047	199,61	29152,83
96	Secundario	38785,21	328,50	30	0,091	3	169,67	1,28	0,3	4,27	4,985	199,61	65574,15
97	Secundario	16274,15	109,92	5	0,045	9	166,61	0,53	0,25	2,11	3,255	187,89	20652,74
98	Secundario	25244,15	166,24	20	0,12	17	152,98	0,75	0,25	3,00	5,315	187,89	31234,63
99	Secundario	7997,43	100,21	30	0,299	9	166,61	0,26	0,12	2,16	6,276	157,73	15806,06
100	Principal	980767,6	2224,87	210	0,094	8	157,48	30,03	3,24	9,27	10,905	718,75	1599129,63
101	Secundario	34386,45	252,87	60	0,237	9	166,61	1,11	0,25	4,46	7,469	187,89	47511,51
102	Secundario	25555,49	400,17	60	0,15	9	166,61	0,83	0,25	3,31	5,942	187,89	75187,40
103	Secundario	49908,79	98,96	30	0,303	8	157,48	1,53	0,3	5,09	9,096	199,61	19754,87
104	Secundario	5572,52	162,09	40	0,247	8	157,48	0,17	0,12	1,42	5,705	157,73	25567,46
105	Secundario	160792,5	498,97	5	0,01	16	165,98	5,19	1,96	2,65	3,022	490,18	244587,34

ID	Drenaje	Area (m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Desnivel (m)	Pendiente (m/m)	Micro	Intensidad (mm/h)	Caudal (m <sup>3</sup> /seg)	Seccion canal (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/seg)	Vm Manning Strikler	Precio (m/\$)	Presupuesto (\$)
106	Secundario	61597,47	140,09	50	0,357	9	166,61	2,00	0,3	6,65	9,873	199,61	27963,74
107	Secundario	6855,98	190,14	40	0,21	8	157,48	0,21	0,12	1,75	5,260	157,73	29991,77
108	Secundario	26028,28	308,07	30	0,097	8	157,48	0,80	0,25	3,19	4,779	187,89	57881,85
109	Secundario	1192336	1500,96	230	0,153	4	152,53	35,36	3,24	10,91	13,912	718,75	1078820,03
110	Secundario	15653,45	192,93	40	0,207	8	157,48	0,48	0,12	3,99	5,222	157,73	30431,68
111	Secundario	26188,26	195,91	20	0,102	9	166,61	0,85	0,25	3,39	4,900	187,89	36810,31
112	Secundario	46713,16	349,42	20	0,057	3	169,67	1,54	0,42	3,67	4,217	221,35	77345,91
113	Secundario	282346,3	1214,04	80	0,066	8	157,48	8,65	1,44	6,00	6,973	397,32	482365,30
114	Secundario	109149,2	1338,28	60	0,045	8	157,48	3,34	0,72	4,64	4,647	264,09	353430,81
115	Secundario	156356	1849,27	90	0,049	8	157,48	4,79	1	4,79	5,285	318,75	589457,36
116	Secundario	50887,14	1715,37	90	0,052	8	157,48	1,56	0,42	3,71	4,028	221,35	379704,01
117	Secundario	51094,37	411,34	10	0,024	8	157,48	1,56	0,64	2,44	3,236	249,55	102652,23
118	Principal	301714,1	756,83	100	0,132	11	207,70	12,18	1,44	8,46	9,861	397,32	300704,78
119	Secundario	53465,02	634,00	10	0,016	8	157,48	1,64	0,64	2,56	2,642	249,55	158215,86
120	Interceptor	642083,7	1162,23	130	0,112	19	144,24	18,01	1,96	9,19	10,115	490,18	569703,67
121	Interceptor	733047,2	2859,30	140	0,049	15	199,23	28,40	4	7,10	8,389	854,46	2443176,57
122	Principal	1612793	2130,19	260	0,122	17	152,98	47,98	4	1,99	13,238	854,46	1820172,99
123	Secundario	204972,3	1029,59	120	0,117	17	152,98	6,10	0,81	7,53	7,664	284,82	293249,86
124	Secundario	281437	956,49	260	0,272	0	174,62	9,56	1	9,56	12,452	318,75	304881,51
125	Principal	1189906	1739,46	150	0,086	19	144,24	33,37	3,24	10,30	10,430	718,75	1250240,47
126	Principal	335034,8	64283	190	0,296	18	166,69	10,86	1	10,86	12,990	318,75	204903,34
127	Secundario	284116,8	1517,28	70	0,046	18	166,69	9,21	1,96	4,70	6,482	490,18	743738,63
128	Secundario	13144,89	175,63	50	0,285	2	159,10	0,41	0,12	3,39	6,128	157,73	27703,12
129	Secundario	15281,15	166,55	5	0,03	5	191,54	0,57	0,25	2,28	2,657	187,89	31292,68
130	Secundario	11201,93	129,05	10	0,077	11	207,70	0,45	0,15	3,02	3,375	163,64	21119,57
131	Secundario	29043,58	208,96	50	0,239	11	207,70	1,17	0,25	4,69	7,501	187,89	39260,71
132	Secundario	42410,83	323,98	50	0,154	11	207,70	1,71	0,3	5,71	6,484	199,61	64670,91
133	Secundario	56655,48	374,79	50	0,133	11	207,70	2,29	0,42	5,45	6,442	221,35	82961,44
134	Secundario	38294,47	422,40	50	0,118	11	207,70	1,55	0,12	12,89	3,943	157,73	66625,21
135	Secundario	44808,85	441,76	40	0,091	11	207,70	1,81	0,36	5,03	5,158	210,50	92989,70
136	Principal	539946,3	1281,90	160	0,125	16	165,98	17,43	1,96	8,89	10,685	490,18	628362,85
137	Interceptor	1533563	5185,39	180	0,035	20	171,84	51,24	6,4	8,01	8,654	1283,04	6653044,41
138	Secundario	862720,2	1073,61	140	0,13	2	159,10	26,69	2,56	10,43	11,806	597,32	641292,05
139	Secundario	44913,91	503,19	5	0,01	16	165,98	1,45	0,72	2,01	2,190	264,09	132889,12
140	Secundario	9381	280,41	5	0,018	2	159,10	0,29	0,2	1,45	1,809	173,98	48785,40
141	Secundario	49061,7	495,08	30	0,061	17	152,98	1,46	0,36	4,05	4,223	210,50	104214,09



ID	Drenaje	Area (m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Desnivel (m)	Pendiente (m/m)	Micro	Intensidad (mm/h)	Caudal (m <sup>3</sup> /seg)	Seccion canal (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/seg)	Vm Manning Strikler	Precio (m/\$)	Presupuesto (\$)
142	Secundario	79252,7	600,38	30	0,05	17	152,98	2,36	0,64	3,68	4,670	249,55	149827,68
143	Secundario	60361,14	535,31	30	0,056	17	152,98	1,80	0,64	2,81	4,942	249,55	133588,37
144	Secundario	94009,94	763,83	20	0,026	17	152,98	2,80	0,81	3,45	3,613	284,82	217556,58
145	Secundario	161540,1	730,99	40	0,055	17	152,98	4,81	1	4,81	5,599	318,75	233003,70
146	Secundario	54742,87	334,40	30	0,09	17	152,98	1,63	0,36	4,52	5,130	210,50	70391,66
147	Secundario	51850,49	298,59	10	0,033	17	152,98	1,54	0,64	2,41	3,794	249,55	74514,06
148	Secundario	116635,6	666,00	30	0,045	17	152,98	3,47	0,81	4,28	4,753	284,82	189692,78
149	Secundario	75419,28	323,03	25	0,077	17	152,98	2,24	0,64	3,51	5,796	249,55	80612,60
150	Secundario	42833,92	205,05	30	0,146	17	152,98	1,27	0,3	4,25	6,314	199,61	40930,57
151	Secundario	127421,3	911,37	20	0,022	4	152,53	3,78	1,44	2,62	4,026	397,32	362110,41
152	Secundario	16848,52	117,78	30	0,255	17	152,98	0,50	0,12	4,18	5,796	157,73	18577,68
153	Secundario	63443,48	630,29	20	0,032	5	191,54	2,36	0,64	3,69	3,736	249,55	157291,52
154	Secundario	85180,59	332,41	40	0,12	9	166,61	2,76	0,64	4,31	7,235	249,55	82955,39
155	Secundario	72900,67	780,55	70	0,09	17	152,98	2,17	0,42	5,16	5,299	221,35	172779,31
156	Secundario	48892,17	398,92	30	0,075	17	152,98	1,45	0,36	4,04	4,683	210,50	83972,16
157	Secundario	42680,15	419,23	20	0,048	17	152,98	1,27	0,36	3,53	3,746	210,50	88248,22
158	Secundario	70532,4	545,41	70	0,128	17	152,98	2,10	0,36	5,83	6,117	210,50	114808,47
159	Secundario	52518,01	401,90	30	0,075	17	152,98	1,56	0,36	4,34	4,683	210,50	84600,50
160	Secundario	40679,12	194,18	50	0,257	17	152,98	1,21	0,25	4,84	7,778	187,89	36483,77
161	Secundario	72726,59	595,31	80	0,134	17	152,98	2,16	0,36	6,01	6,259	210,50	125313,38
162	Secundario	245709,7	584,77	70	0,12	17	152,98	7,31	1	7,31	8,271	318,75	186398,31
163	Secundario	791075,7	3657,45	410	0,112	1	218,22	33,57	3,24	10,36	11,903	718,75	2628792,91
164	Secundario	2376443	1256,87	200	0,159	17	152,98	7,07	0,81	8,73	8,934	284,82	357985,50
165	Secundario	2439014	1428,20	60	0,042	18	166,69	7,91	1,44	5,49	5,563	397,32	567457,25
166	Secundario	87295,24	243,52	30	0,123	18	166,69	2,83	0,64	4,42	7,325	249,55	60772,01
167	Secundario	23950,15	522,38	30	0,057	3	169,67	0,79	0,25	3,16	3,663	187,89	98148,50
168	Secundario	57636,59	622,51	110	0,177	2	159,10	1,78	0,3	5,94	6,952	199,61	124262,67
169	Secundario	88892,52	546,60	40	0,073	3	169,67	2,93	0,64	4,58	5,643	249,55	136405,56
170	Secundario	514576,1	813,88	50	0,061	0	151,18	15,13	2,56	5,91	8,087	597,32	486149,76
		<b>TOTAL</b>	<b>92,990,52</b>									<b>TOTAL</b>	<b>38.412.879,13</b>

\*El area (m<sup>2</sup>) se refiere al área que drena a ese canal, micro se refiere a la microcuenca en que se situa el canal, el caudal (m<sup>3</sup>/seg) se obtuvo con base al área, la intensidad de la lluvia de diseño, que es característica de cada microcuenca, y aplicando el número de curva. La sección del canal se basó en secciones tipo, la velocidad (m/seg) se obtuvo con base al caudal y la sección, Vm se refiere a la velocidad media aplicando la fórmula de Manning Strikler. Con base al precio por m y la longitud se obtuvo el presupuesto en dólares americanos.

Anexo 14. Información recopilada de costos de canales de mampostería.

	<b>Presupuesto Lempiras</b>
<b>Cuneta rectangular de mampostería E=25cm, A=30cm, P=40cm</b>	
Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9
Acarreo de Material (Desperdicio)	103,02
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	425,42
Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=30cm, p=40cm emplatillado	1125,11
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatras (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73
Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye Acarreo)	50,6
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2 y resane	1337,8
Caja Colectora de Aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5
<b>Presupuesto por metro (Lempiras)</b>	<b>3847,1</b>
<b>Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=40cm, p=40cm</b>	
Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9
Acarreo de Material (Desperdicio)	157,63
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	351,91
Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=40cm, p=40cm emplatillado	1178,13
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatras (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73
Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye Acarreo)	505,6
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2 y resane	1505,0
Caja Colectora de Aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5
<b>Presupuesto por metro (Lempiras)</b>	<b>4048,4</b>
<b>Cuneta rectangular de mamposteria e=25cm, a=30cm, p=50cm</b>	
Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9
Acarreo de Material (Desperdicio)	161,67
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	360,93
Cuneta Rectangular de Mamposteria E=25cm, A=30cm, P=50cm Emplatillado	1275,21
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatras (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73
Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye Acarreo)	505,6
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2 y resane	1337,8
Caja Colectora de Aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5
<b>Presupuesto por metro (Lempiras)</b>	<b>3991,3</b>
<b>Cuneta rectangular de mamposteria e=25cm, a=40cm, p=50cm</b>	
Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9
Acarreo de Material (Desperdicio)	171,77
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	383,49
Cuneta Rectangular de Mamposteria E=25cm, A=40cm, P=50cm Emplatillado	1327,39
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatras (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73
Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye Acarreo)	505,6
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2 y resane	1505,0
Caja Colectora de Aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5
<b>Presupuesto por metro (Lempiras)</b>	<b>4243,4</b>
<b>Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=50cm, p=50cm</b>	
Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9
Acarreo de Material (Desperdicio)	202,09
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	451,17
Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=40cm, p=40cm emplatillado	1401,36
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatras (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73

Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye Acarreo)	505,6
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2 y resane	1672,3
Caja Colectora de Aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5
<b>Presupuesto por metro (Lempiras)</b>	<b>4582,6</b>

#### **Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=40cm, p=60cm**

Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9
Acarreo de Material (Desperdicio)	206,13
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	460,19
Cuneta Rectangular de Mamposteria E=25cm, A=40cm, P=60cm Emplatillado	1494,55
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatras (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73
Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye Acarreo)	505,6
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2 y resane	1505,0
Caja Colectora de Aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5
<b>Presupuesto por metro (Lempiras)</b>	<b>4521,6</b>

#### **Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=60cm, p=50cm**

Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9
Acarreo de Material (Desperdicio)	222,30
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	496,28
Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=60cm, p=50cm emplatillado	1454,84
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatras (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73
Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye Acarreo)	505,6
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2 y resane	1839,5
Caja Colectora de Aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5
<b>Presupuesto por metro (Lempiras)</b>	<b>4868,6</b>

#### **Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=60cm, p=60cm**

Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9
Acarreo de Material (Desperdicio)	251,94
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	562,46
Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=60cm, p=60cm emplatillado	1624,53
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatras (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73
Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye Acarreo)	505,6
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2 y resane	1839,5
Caja Colectora de Aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5
<b>Presupuesto por metro (Lempiras)</b>	<b>5134,1</b>

#### **Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=60cm, p=70cm**

Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9
Acarreo de Material (Desperdicio)	281,58
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	628,63
Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=60cm, p=70cm emplatillado	1793,49
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatras (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73
Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye Acarreo)	505,6
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2 y resane	1839,5
Caja Colectora de Aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5
<b>Presupuesto por metro (Lempiras)</b>	<b>5398,9</b>

#### **Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=80cm, p=80cm**

Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9
Acarreo de Material (Desperdicio)	367,80
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	821,12
Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=80cm, p=80cm emplatillado	1868,06
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatras (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73

Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye Acarreo)	505,6
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2 y resane	2173,9
Caja Colectora de Aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5
<b>Presupuesto por metro (Lempiras)</b>	<b>6086,6</b>

<b>Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=90cm, p=80cm</b>	
Demolicion de Elementos de Concreto/Mamposteria	48,0
Trazado y Marcado con Teodolito	45,9
Acarreo de Material (Desperdicio)	396,10
Excavacion Material Tipo II (Semi-Duro)	884,29
Cuneta rectangular de mampostería e=25cm, a=90cm, p=80cm emplatillado	1964,02
Vigas para Drenaje Tipo Quiebrapatras (Hasta 1.10 m de Longitud) Concreto 1:1.5:1.5	141,73
Relleno Compactado con Material Selecto (Incluye Acarreo)	505,6
Losa de Concreto e=15 cm #3@10cm A/S 1:2:2	2341,2
Caja Colectora de Aguas Lluvias de 1.20mx1.20mx1.60m	114,5
<b>Presupuesto por metro (Lempiras)</b>	<b>6441,3</b>

Anexo 15. Flujos de beneficios y costos para los distintos escenarios del análisis costo/beneficio.

**Escenario mejor estimado.**

<b>Año</b>	<b>Beneficios medidas de reducción del riesgo (\$)</b> (1)	<b>Costos de la inversión (\$)</b> (2)	<b>Costos de mantenimiento (\$)</b> (3)	<b>Beneficios anuales (\$)</b> (4) = (1) - (2) - (3)
1	2.366.913	18.039.131	360.783	-16.033.001
2	4.828.502	18.039.131	721.565	-13.932.194
3	4.925.072		721.565	4.203.507
4	5.023.573		721.565	4.302.008
5	5.124.045		721.565	4.402.480
6	5.226.526		721.565	4.504.961
7	5.331.056		721.565	4.609.491
8	5.437.677		721.565	4.716.112
9	5.546.431		721.565	4.824.866
10	5.657.360		721.565	4.935.794
11	5.770.507		721.565	5.048.942
12	5.885.917		721.565	5.164.352
13	6.003.635		721.565	5.282.070
14	6.123.708		721.565	5.402.143
15	6.246.182		721.565	5.524.617
16	6.371.106		721.565	5.649.541
17	6.498.528		721.565	5.776.963
18	6.628.499		721.565	5.906.933
19	6.761.068		721.565	6.039.503
20	6.896.290		721.565	6.174.725
			<b>VPN</b>	<b>2.663.563,03</b>
			<b>IRR (%)</b>	<b>13,3</b>

**Escenario sin incluir el precio social de la mano de obra.**

<b>Año</b>	<b>Beneficios medidas de reducción del riesgo (\$)</b> (1)	<b>Costos de la inversión (\$)</b> (2)	<b>Costos de mantenimiento (\$)</b> (3)	<b>Beneficios anuales (\$)</b> (4) = (1) - (2) - (3)
1	2.366.913	19.206.440	384.129	-17.223.656
2	4.828.502	19.206.440	768.258	-15.146.195
3	4.925.072		768.258	4.156.814
4	5.023.573		768.258	4.255.316
5	5.124.045		768.258	4.355.787
6	5.226.526		768.258	4.458.268
7	5.331.056		768.258	4.562.799
8	5.437.677		768.258	4.669.420
9	5.546.431		768.258	4.778.173
10	5.657.360		768.258	4.889.102
11	5.770.507		768.258	5.002.249
12	5.885.917		768.258	5.117.659
13	6.003.635		768.258	5.235.378
14	6.123.708		768.258	5.355.450
15	6.246.182		768.258	5.477.925
16	6.371.106		768.258	5.602.848

17	6.498.528	768.258	5.730.270
18	6.628.499	768.258	5.860.241
19	6.761.068	768.258	5.992.811
20	6.896.290	768.258	6.128.032
<b>VPN (\$)</b>			86.742,65
<b>IRR (%)</b>			12.0%

**Escenario sin incrementar la exposición.**

Año	Beneficios medidas de reducción del riesgo (dólares) (1)	Costos de la inversión (dólares) (2)	Costos de mantenimiento (dólares) (3)	Beneficios anuales (dólares) (4) = (1) - (2) - (3)
1	2.366.913	18.039.131	360.783	-16.033.001
2	4.733.825	18.039.131	721.565	-14.026.871
3	4.733.825		721.565	4.012.260
4	4.733.825		721.565	4.012.260
5	4.733.825		721.565	4.012.260
6	4.733.825		721.565	4.012.260
7	4.733.825		721.565	4.012.260
8	4.733.825		721.565	4.012.260
9	4.733.825		721.565	4.012.260
10	4.733.825		721.565	4.012.260
11	4.733.825		721.565	4.012.260
12	4.733.825		721.565	4.012.260
13	4.733.825		721.565	4.012.260
14	4.733.825		721.565	4.012.260
15	4.733.825		721.565	4.012.260
16	4.733.825		721.565	4.012.260
17	4.733.825		721.565	4.012.260
18	4.733.825		721.565	4.012.260
19	4.733.825		721.565	4.012.260
20	4.733.825		721.565	4.012.260
<b>VPN (\$)</b>			-2.585,953,64	
<b>IRR (%)</b>			10.6%	

**Escenario sin incluir las pérdidas indirectas.**

Año	Beneficios medidas de reducción del riesgo (dólares) (1)	Costos de la inversión (dólares) (2)	Costos de mantenimiento (dólares) (3)	Beneficios anuales (dólares) (4) = (1) - (2) - (3)
1	4.303.478	18,039,131	360.783	-16.248.175
2	4.389.547	18,039,131	721.565	-14.371.149
3	4.477.338		721.565	3.755.773
4	4.566.885		721.565	3.845.320
5	4.658.223		721.565	3.936.657
6	4.751.387		721.565	4.029.822
7	4.846.415		721.565	4.124.850
8	4.943.343		721.565	4.221.778
9	5.042.210		721.565	4.320.645
10	5.143.054		721.565	4.421.489
11	5.245.915		721.565	4.524.350
12	5.350.834		721.565	4.629.268

13	5.457.850	721.565	4.736.285
14	5.567.007	721.565	4.845.442
15	5.678.347	721.565	4.956.782
16	5.791.914	721.565	5.070.349
17	5.907.753	721.565	5.186.187
18	6.025.908	721.565	5.304.343
19	6.146.426	721.565	5.424.861
20	6.269.354	721.565	5.547.789
<b>VPN (\$)</b>			-1.198.685,31
<b>IRR (%)</b>			11,4%

**Escenario aumentando el mantenimiento del 2% al 3%.**

<b>Año</b>	<b>Beneficios medidas de reducción del riesgo (dólares)</b>	<b>Costos de la inversión (dólares)</b>	<b>Costos de mantenimiento (dólares)</b>	<b>Beneficios anuales (dólares)</b>
	(1)	(2)	(3)	(4) = (1) - (2) - (3)
1	4.733.825	18.039.131	541.174	-16.213.392
2	4.828.502	18.039.131	1.082.348	-14.292.977
3	4.925.072		1.082.348	3.842.724
4	5.023.573		1.082.348	3.941.226
5	5.124.045		1.082.348	4.041.697
6	5.226.526		1.082.348	4.144.178
7	5.331.056		1.082.348	4.248.709
8	5.437.677		1.082.348	4.355.330
9	5.546.431		1.082.348	4.464.083
10	5.657.360		1.082.348	4.575.012
11	5.770.507		1.082.348	4.688.159
12	5.885.917		1.082.348	4.803.569
13	6.003.635		1.082.348	4.921.287
14	6.123.708		1.082.348	5.041.360
15	6.246.182		1.082.348	5.163.834
16	6.371.106		1.082.348	5.288.758
17	6.498.528		1.082.348	5.416.180
18	6.628.499		1.082.348	5.546.151
19	6.761.068		1.082.348	5.678.721
20	6.896.290		1.082.348	5.813.942
<b>VPN (\$)</b>				-174.272,52
<b>IRR (%)</b>				11,9%





Valores del ratio  $\cos 2\beta \tan \emptyset / \sin \beta \cos \beta$  en función del valor de la pendiente ( $\beta$ ) en grados (eje y) y el ángulo de rozamiento en grados ( $\emptyset$ ) (eje X) . Los valores mayores de 1 aparecen en rojo y los menores de 1 en verde

